

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**MODELOS MULTICRITÉRIO PARA APOIAR DECISÕES NA  
GESTÃO DA MANUTENÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO  
DE ÁGUA PARA A REDUÇÃO DE CUSTOS E PERDAS**

TESE SUBMETIDA À UFPE  
PARA OBTENÇÃO DE GRAU DE DOUTOR  
POR

FLAVIO TROJAN

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Danielle Costa Morais, DSc

RECIFE, abril de 2012

T845m Trojan, Flavio.

Modelos multicritério para apoiar decisões na gestão da manutenção de redes de distribuição de água para a redução de custos e perdas. /Flavio Trojan. - Recife: O Autor, 2012.

xiv, 117 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientadora: Profª Dra: Danielle Morais.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Produção, 2012.

Inclui Referências Bibliográficas e Apêndices

1. Engenharia da produção. 2. Decisão em grupo. 3. Decisão multicritério 4. Manutenção de redes de água I. Morais, Danielle (orientadora). II. Título.

658.5 CDD (22. ed.)

UFPE  
BCTG/2012-181



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

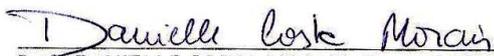
PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA  
DE DEFESA DE TESE DE  
DOUTORADO DE  
**FLÁVIO TROJAN**

*“MODELOS MULTICRITÉRIO PARA APOIAR DECISÕES NA GESTÃO DA  
MANUTENÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA PARA A REDUÇÃO DE  
CUSTOS E PERDAS”*

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PESQUISA OPERACIONAL

A comissão examinadora, composta pelos professores abaixo, sob a presidência do(a) primeiro(a), considera o candidato **FLÁVIO TROJAN APROVADO**.

Recife, 25 de abril de 2012.

  
\_\_\_\_\_

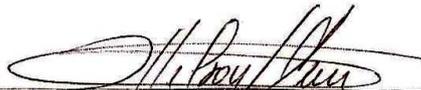
Prof. DANIELLE COSTA MORAIS, Doutor (UFPE)

  
\_\_\_\_\_

Prof. CAROLINE MARIA DE MIRANDA MOTA, Doutor (UFPE)

  
\_\_\_\_\_

Prof. CRISTIANO ALEXANDRE VIRGÍNIO CAVALCANTE, Doutor (UFPE)

  
\_\_\_\_\_

Prof. WILSON FADLO CURE, PhD (UFCG)

  
\_\_\_\_\_

Prof. MANOEL AFONSO DE CARVALHO JÚNIOR, PhD (UFPE)

## **AGRADECIMENTOS**

**À DEUS**, que ilumina nosso caminho;

**À minha família**, pelo apoio e amor dispensados;

**Aos meus amigos e colegas**, pelo grande apoio que me dedicaram;

**À Professora orientadora**, Prof<sup>a</sup>. Danielle Costa Moraes, pela amizade e orientação;

**Aos professores do PPGEP**, que proporcionaram todo o apoio para o Doutorado;

**À instituição**, pela grata satisfação de participar dessa respeitosa comunidade científica;

**À todas as pessoas** a quem devo a felicidade de poder compartilhar minha vida;

**À CAPES / SETEC**, pela bolsa de doutorado (DINTER) concedida.

*“Existe somente uma idade para a gente ser feliz, somente uma época na vida de cada pessoa em que é possível sonhar e fazer planos e ter energia bastante para realizá-los a despeito de todas as dificuldades e obstáculos. Uma só idade para a gente se encantar com a vida e viver apaixonadamente e desfrutar tudo com toda intensidade sem medo nem culpa de sentir prazer. Fase dourada em que a gente pode criar e recriar a vida à nossa própria imagem e semelhança e vestir-se com todas as cores e experimentar todos os sabores e entregar-se a todos os amores sem preconceito nem pudor. Tempo de entusiasmo e coragem em que todo desafio é mais um convite à luta que a gente enfrenta com toda disposição de tentar algo NOVO, de NOVO e de NOVO, e quantas vezes for preciso. Essa idade tão fugaz na vida da gente chama-se PRESENTE e tem a duração do instante que passa.”*

—MÁRIO QUINTANA (A idade de ser feliz)

## RESUMO

Por conta das dificuldades implícitas ao processo decisório em grupo e dos problemas correlatos no setor de abastecimento de água, tais como: perdas físicas e econômicas, uso incorreto da água e custos com manutenção, fica evidente a necessidade de elaboração de pesquisas e estudos, envolvendo métodos para apoiar decisões, a fim de diminuir desperdícios de água e sua exploração desnecessária. Este trabalho tem como objetivo auxiliar nas tomadas de decisões de problemas emergentes no setor de manutenção de redes de distribuição de água. Dois dos principais problemas do setor são abordados. O primeiro deles explora a classificação de áreas de medição de vazão, conforme sua criticidade, para auxiliar no controle de perdas de água. Para este problema é proposto um modelo multicritério para classificação de áreas críticas de medição de vazão, baseado no método ELECTRE TRI, sendo sua estrutura quantitativa com o levantamento dos dados feito por meio de um sistema automatizado. O segundo problema abordado baseia-se na classificação realizada no modelo anterior e explora quais alternativas de manutenção são potencialmente eficazes para serem implementadas nas classes, de acordo com a visão de um grupo de decisores, para reduzir perdas de água e custos de manutenção. Assim, este segundo modelo trata da problemática de ordenação de alternativas de manutenção por meio de uma tomada de decisão em grupo, sendo baseado no método ELECTRE II, a fim de apoiar as ordenações individuais numa primeira fase, e posteriormente, no método COPELAND, para agregação das preferências do grupo. Estes modelos consideram aspectos subjetivos e objetivos ao mesmo tempo, a fim de fornecer como resultado aos decisores uma visão mais clara e global sobre quais alternativas poderão atender os múltiplos objetivos estabelecidos pela organização, decorrentes das preferências de um grupo de decisores de diferentes áreas. Com os modelos desenvolvidos é possível conhecer as áreas críticas de uma rede de distribuição de água para apoiar a gestão da manutenção e priorizar as alternativas potenciais para redução das perdas de água.

**Palavras-chave:** Decisão em grupo, Decisão multicritério, Manutenção de redes de água.

## ABSTRACT

Because of the difficulties implied in the group decision making process and related problems in the sector of water supply, such as: physical and economic losses, incorrect use of water and maintenance costs, the need for research and studies developing methods to support the decisions, reducing unnecessary exploitation and waste becomes evident. This work aims to assist decision-making for arising problems in the maintenance area of the water networks. Two major problems in the sector are addressed. The first explores the correct classification of critical areas of flow measurement, classifying them according to their priorities to help control water loss. For this problem, a multicriteria model that deals with the classification of critical flow measurement is proposed, it is based on the ELECTRE TRI method, presenting an overview of its structure with quantitative data collection through an automated system. The second problem addressed is based on the classification carried out in the previous model and explores which maintenance alternatives are potentially effective to be implemented in priority classes according to the group of decision makers point of view to reduce water losses. The following multicriteria model proposes that a group of decision makers sort out maintenance and investment alternatives for areas previously classified according to their criticality. Thus, this second model deals with the problem of sorting out maintenance alternatives through group decision making, initially based on ELECTRE II, to support individual ordinations, and subsequently, on the Copeland method, for group preference aggregation. These models consider subjective and objective aspects simultaneously, in order to provide the decision makers with a clearer and comprehensive view in which the alternatives can attend the multiple objectives set by companies, arising from the preferences of a group of decision makers from different areas. With the models developed, it is possible to recognize priority classes to support the maintenance management, where the critical points are, and the major potential alternatives to solve maintenance problems and water loss in these classes through aggregation of preferences and global ordering.

**Keywords:** Group Decision, Multicriteria Decision, Water Network Maintenance.

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos do trabalho .....	4
1.1.1 Objetivo Geral .....	4
1.1.2 Objetivos Específicos .....	4
1.2 Estruturação da Tese.....	5
<b>2 BASE CONCEITUAL .....</b>	<b>6</b>
2.1 Demanda por recursos hídricos e nível de perdas de água .....	6
2.2 Gestão da manutenção de redes no abastecimento água .....	8
2.2.1 Tipos de Manutenção.....	10
2.2.2 Redução de perdas de água.....	10
2.3 Estruturação de problemas.....	12
2.4 Decisão Multicritério .....	16
2.4.1 Tipos de problemáticas .....	17
2.4.2 Atores .....	18
2.4.3 Preferências .....	19
2.4.4 Estrutura de preferências .....	21
2.5 Abordagens multicritério .....	21
2.5.1 Relação de dominância e não-dominância .....	23
2.6 Métodos multicritérios de decisão em grupo.....	24
2.7 Métodos utilizados como apoio ao trabalho .....	27
2.7.1 Método ELECTRE II .....	27
2.7.2 O método Copeland .....	31
2.7.3 O método ELECTRE TRI .....	32
2.8 Considerações finais sobre este capítulo .....	35
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>37</b>
3.1 Gestão da manutenção .....	37
3.1.1 Expectativas da gestão da manutenção.....	39
3.1.2 Gestão eficiente da manutenção para o abastecimento de água .....	39
3.2 Métodos multicriteriais na gestão da manutenção e perdas de água .....	41

3.3	Reabilitação de redes no abastecimento de água.....	44
3.4	Considerações finais sobre este capítulo .....	48
<b>4</b>	<b>MODELO PARA CLASSIFICAÇÃO DE ÁREAS CRÍTICAS DE MANUTENÇÃO (MODELO-1).....</b>	<b>50</b>
4.1.1	Formação das áreas de medição de vazão em um sistema de abastecimento de água .....	50
4.1.2	Pesquisa dos dados relevantes para o estudo.....	54
4.1.3	Definição das classes e prioridades .....	54
4.1.4	Determinação dos critérios e pesos .....	55
4.1.5	Cálculo do desempenho das alternativas e limites de classes .....	55
4.1.6	Aplicação do método ELECTRE TRI e avaliação dos resultados .....	55
4.2	Aplicação do Modelo-1: classificação de áreas para manutenção .....	56
4.3	Considerações sobre os resultados do Modelo-1.....	68
<b>5</b>	<b>MODELO PARA ORDENAÇÃO EM GRUPO DAS ALTERNATIVAS DE MANUTENÇÃO (MODELO-2).....</b>	<b>69</b>
5.1	Ordenações Individuais .....	72
5.1.1	Elicitação das preferências: cenário específico .....	72
5.1.2	Primeira Fase: Análise Individual .....	73
5.1.3	Organização das ordenações.....	74
5.2	Análise de Agregação.....	75
5.2.1	Segunda fase: Agregação das ordenações individuais .....	75
5.3	Aplicação do Modelo-2: ordenação de alternativas de manutenção .....	76
5.3.1	Primeira Fase: Ordenações Individuais .....	76
5.3.1.1	Ações A – Meta de Redução do Índice de Perdas .....	77
5.3.1.2	Ações B – Meta de Redução de Custos .....	78
5.3.1.3	Critérios de Avaliação.....	79
5.3.2	Segunda Fase: Agregação das ordenações individuais.....	83
5.3.3	Análise de sensibilidade .....	85
5.4	Software desenvolvido.....	86
5.5	Considerações sobre os resultados do Modelo-2.....	89
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....</b>	<b>91</b>
6.1	Conclusões.....	91
6.2	Sugestões para Futuros Trabalhos .....	94
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>95</b>

<b>APÊNDICE 1</b> .....	<b>102</b>
<i>Avaliação pelo modelo-2 com 5 grupos diferenciados de pós-graduação</i> .....	<b>102</b>
<b>APÊNDICE 2</b> .....	<b>103</b>
<i>Avaliação pelo modelo-2 com 5 grupos diferenciados de pós-graduação (resultado pelo software - Grupo 1)</i> .....	<b>103</b>
<b>APÊNDICE 3</b> .....	<b>104</b>
<i>Avaliação pelo modelo-2 com 5 grupos diferenciados de pós-graduação (resultado pelo software - Grupo 2)</i> .....	<b>104</b>
<b>APÊNDICE 4</b> .....	<b>105</b>
<i>Avaliação pelo modelo-2 com 5 grupos diferenciados de pós-graduação (resultado pelo software - Grupo 3)</i> .....	<b>105</b>
<b>APÊNDICE 5</b> .....	<b>106</b>
<i>Avaliação pelo modelo-2 com 5 grupos diferenciados de pós-graduação (resultado pelo software - Grupo 4)</i> .....	<b>106</b>
<b>APÊNDICE 6</b> .....	<b>107</b>
<i>Avaliação pelo modelo-2 com 5 grupos diferenciados de pós-graduação (resultado pelo software - Grupo 5)</i> .....	<b>107</b>
<b>APÊNDICE 7</b> .....	<b>108</b>
<i>Formulários do Modelo-2 apresentado aos decisores</i> .....	<b>108</b>
<b>APÊNDICE 8</b> .....	<b>112</b>
<i>Software ELECTRE TRI – Desempenho no Modelo-1</i> .....	<b>112</b>
<b>APÊNDICE 9</b> .....	<b>113</b>
<i>Software ELECTRE TRI – Comparações</i> .....	<b>113</b>
<b>APÊNDICE 10</b> .....	<b>114</b>
<i>Software ELECTRE TRI – Resultados da classificação</i> .....	<b>114</b>
<b>APÊNDICE 11</b> .....	<b>115</b>
<i>Software ELECTRE TRI – Classe1 e Classe2</i> .....	<b>115</b>
<b>APÊNDICE 12</b> .....	<b>116</b>
<i>Software ELECTRE TRI – Classe3 e Classe4</i> .....	<b>116</b>
<b>APÊNDICE 13</b> .....	<b>117</b>
<i>Software ELECTRE TRI – Classe5 e Estatística</i> .....	<b>117</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Relação de dominância .....	23
Figura 2.2 – Método de agregação em nível de entrada .....	25
Figura 2.3 – Método de agregação em nível de saída .....	26
Figura 2.4 – Limites entre categorias .....	33
Figura 2.5 – Modelo de classificação pelo ELECTRE TRI.....	35
Figura 3.1 – Curva da Banheira .....	47
Figura 4.1 – Crescimento de edificações em uma cidade .....	51
Figura 4.2 – Crescimento de estrutura em um sistema de abastecimento de água .....	52
Figura 4.3 – Divisão das áreas de medição em um sistema de abastecimento de água ..	53
Figura 4.4 – Diagrama de síntese do Modelo-1 .....	54
Figura 4.5 – Sistema de Monitoramento Especializado, SME.....	57
Figura 4.6 – Resultado da Classificação pelo ELECTRE TRI .....	65
Figura 4.7 – Resultado da Classificação – Mapa Temático .....	66
Figura 5.1 – Conexão entre os modelos .....	69
Figura 5.2 – Fluxograma do modelo proposto .....	71
Figura 5.3 – Tela de Abertura .....	87
Figura 5.4 – Tela de Definições .....	87
Figura 5.5 – Tela do Resultado Final .....	88
Figura 5.6 – Tela das Matrizes .....	88
Figura 5.7 – Tela de Sensibilidade .....	89

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Perdas de água com vazamentos em algumas cidades do mundo.....	7
Tabela 2.2 – Consumo médio per capita em alguns países.....	8
Tabela 2.3 – Matriz critérios x alternativas.....	28
Tabela 4.1 – Dados levantados para o estudo .....	58
Tabela 4.2 – Tipo de criticidade e necessidade de intervenções por classes .....	59
Tabela 4.3 – Definição dos critérios de avaliação e respectivos pesos.....	59
Tabela 4.4 – Cálculo do desempenho das alternativas.....	61
Tabela 4.5 – Desempenho das alternativas .....	62
Tabela 4.6 – Limites de indiferença e preferência.....	62
Tabela 4.7 – Parâmetros para os limites entre as classes .....	63
Tabela 4.8 – Resultado da Classificação.....	64
Tabela 4.9 – Resumo das comparações.....	67
Tabela 4.10 – Estatística da Classificação .....	67
Tabela 5.1 – Organização das Ordenações Individuais .....	74
Tabela 5.2 – Dados agregados das classes do Modelo-1 (abordagem otimista).....	76
Tabela 5.3 – Estratégias e ações de intervenção .....	77
Tabela 5.4 – Alternativas de solução .....	78
Tabela 5.5 – Critérios de Avaliação.....	79
Tabela 5.6 – Pesos dos critérios de avaliação .....	80
Tabela 5.7 – Níveis dos critérios de avaliação.....	80
Tabela 5.8 – Características dos Decisores .....	81
Tabela 5.9 – Resultado das ordenações individuais.....	83
Tabela 5.10 – Matriz de avaliação para a agregação com Copeland .....	84
Tabela 5.11 – Matriz de Condorcet e ordenação Copeland .....	84
Tabela 5.12 – Análise de sensibilidade atribuindo pesos aos decisores .....	85

## SIMBOLOGIA

$\succ$	Preferência
%	Percentual
$\sim$	Não Preferência
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
CGT	<i>Cooperative Game Theory</i> - Teoria dos Jogos cooperativos
CP	<i>Compromise. Programming</i> - Programação de Compromisso
CSH	<i>Critical Systems Heuristics</i> - Sistemas críticos de heurísticas
ELECTRE	<i>Elimination Et Choice Traidusaint la REalitiè</i>
FT	<i>Flow transmitter</i>
GAIA	<i>Geometrical Analysis for Interactive Assistance</i>
GD	<i>Group Decision</i>
GDDS	<i>Group Decision Support System</i>
hab.	Habitantes
J	Presunção de Preferência
K	K-preferência
LAMSADE	<i>Laboratoire d'Analyse et Modélisation de Systèmes pour l'Aide à la Décision</i>
l/hab/dia	Litros por habitante por dia
m/lig	Metros por ligação
m <sup>3</sup> /mês	Metros cúbicos por mês
MAUT	<i>Multiple Attribute Utility Theory</i>
Max.	Máximo
MCDA	<i>Multicriteria Decision Aid</i>
MCDM	<i>Multiple Criteria Decision Making</i>
Méd.	Média
PROMETHEE	<i>Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation</i>
S	Superação
SCA	<i>Strategic choice approach</i>
SD	<i>System dynamics</i>
SDM	<i>Supra Decision Maker</i>

SME	Sistema de Monitoramento Especializado
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SODA	<i>Strategic options development and analysis</i>
SSM	<i>Soft systems methodology</i>
TRS	Taxa de rendimento sintético
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i>
$u(x)$	Função Utilidade
unid.	Unidade
VSM	<i>Viable systems model</i>

## 1 INTRODUÇÃO

As questões relacionadas com priorização de alternativas ou tomadas de decisões nas organizações em geral, estão sempre ligadas a conflitos de preferências entre os gestores e aos diferentes interesses em atender objetivos distintos. O fato de existir mais de um decisor em um processo qualquer de decisão pode implicar em conflitos. Sejam eles em relação às prioridades ou atendimento aos objetivos e metas.

Ainda sim, quando se considera um número elevado de alternativas e critérios que devem ponderar essas decisões, essas questões ficam mais complexas. Atualmente muitas técnicas de apoio à decisão multicritério tem sido estudadas e aplicadas para auxiliar na resolução de problemas em diversas áreas, que apresentam características tanto subjetivas quanto conflitantes.

Na gestão da manutenção do abastecimento público de água as divergências podem se tornar ainda maiores, pois os decisores deste setor estão envolvidos com questões ambientais e econômicas simultaneamente. Assim, o que parece uma alternativa ideal para um gestor (decisor) num determinado intervalo de tempo, pode não agradar e não ser uma opção muito atrativa para outro.

Então, decidir sobre quais caminhos o setor de manutenção do abastecimento de água deverá seguir é uma tarefa difícil, pois os gestores das áreas correlatas são afetados diretamente pelas consequências das decisões e, por esse motivo, eles também devem estar envolvidos com o processo decisório.

Historicamente, quando existem perdas elevadas num sistema de abastecimento é muito mais econômico aperfeiçoar, racionalizar a utilização da água e realizar manutenção continuamente com vistas a deixar o sistema em ordem, do que construir novos sistemas de abastecimento, que certamente acarretarão em elevados custos de instalação, além de impactos ambientais.

Também é notório que, no Brasil e em alguns países do mundo, existem deficiências no gerenciamento do uso da água potável, o que leva a desperdícios indesejáveis, tais como: perdas físicas e econômicas. Isto se deve às deficiências nas realizações e na gestão da manutenção no sistema. Por conta da importância da oferta desse recurso natural, essencial ao ser humano e do cenário presente na maioria das organizações, a cada momento procuram-se desenvolver estudos que visem melhorar as ações em manutenção nas redes de distribuição e diminuir os problemas nessas redes, e conseqüentemente, o desperdício.

Lambert & Hirner (2000) apontam que sistemas de abastecimento de água, por sua natureza e complexidade, apresentam certo grau de perdas na produção e distribuição. Um problema maior evidenciado é que empresas de saneamento vêm convivendo com elevados índices de perdas, principalmente pela falta de gerenciamento e de decisões adequadas. A consequência de perdas em um sistema de abastecimento para o consumidor é que ocorre uma redução da qualidade do serviço em termos de disponibilidade da água e até problemas de contaminação, decorrentes de pressões negativas, oriundas da intermitência no abastecimento, além da consequência financeira para as empresas. Esses problemas normalmente se destacam nas médias e grandes cidades e os fatores que ajudam a agravá-los ainda mais são:

- ✓ o crescimento populacional,
- ✓ grandes períodos de estiagem,
- ✓ o uso irracional da água, principalmente pela carência de manutenção planejada e, em algumas vezes, até da inadequada operação dos sistemas de tratamento e distribuição, o que provoca a elevação dos índices de perdas por constantes danos nas tubulações.

Por estes motivos surgem, a necessidade e a urgência de se tomar corretas decisões na aplicação de medidas preventivas e reparadoras, para que se tenha no mínimo a operação do sistema de distribuição com níveis de perdas iguais ou abaixo de um nível aceitável, visando assim prolongar a oferta do recurso natural e diminuir impactos ao meio ambiente.

Porém, para atingir objetivos que visem à solução desses problemas, são encontradas dificuldades nas tomadas de decisões no que diz respeito à classificação de áreas críticas num sistema de distribuição de água, ou ainda a priorização das alternativas de manutenção a serem implantadas nessas áreas. Tudo isso por se tratarem de avaliações de aspectos subjetivos em alguns casos e objetivos em outros.

Esse contexto pode ficar ainda mais complexo, se considerar que a melhor decisão (solução de melhor compromisso) deve ser resultado das preferências de um grupo de gestores e sujeita a vários critérios a serem ponderados. Tudo isso sempre visa à melhoria na rede de distribuição e combate ao desperdício.

Assim, fica claro sobre a necessidade da aplicação de um método multicritério, que considera tanto critérios objetivos quanto os subjetivos de forma igualitária ou pela atribuição de pesos, conforme a sua importância no contexto, dando o auxílio necessário aos decisores e aos grupos de decisores, nas alternativas a serem priorizadas.

Os problemas normalmente encontrados neste setor demandam decisões que requerem a priorização de ações ou de investimentos em determinadas áreas para atingir fins específicos, relacionados à redução de custos e de perdas de água, através da correta gestão da manutenção. Desse modo, gerentes e responsáveis pelo planejamento e pelas decisões de gestão da manutenção no saneamento básico, procuram integrar os recursos disponibilizados com as metas. Contudo, na maioria das vezes eles não têm acesso a modelos específicos de apoio à tomada de decisão e ferramentas apropriadas para utilização e auxílio a essas decisões.

Este trabalho aborda dois problemas relacionados à tomada de decisão na gestão da manutenção de redes de distribuição água e desenvolve modelos multicritérios que visam auxiliar esses problemas em diferentes problemáticas:

- Inicialmente, um primeiro modelo é desenvolvido para auxiliar no controle às perdas através da classificação de áreas críticas de controle e medição de vazão, baseado no método ELECTRE TRI.
- Sequencialmente, um segundo modelo é desenvolvido e visa orientar as alternativas mais eficientes a serem implantadas nas áreas pertencentes às classes encontradas na classificação anterior. Este modelo se utiliza da visão de um grupo de decisores para a ordenação das alternativas de manutenção, considerando os pontos de vista de gerentes de diferentes setores da organização, os quais são vitais para a eficiência produtiva e trabalham interconectados, sendo eles: manutenção de redes; produção; planejamento; administração e comercial. O segundo modelo é baseado no método ELECTRE II, numa primeira fase, para apoiar nas ordenações individuais dos membros do grupo e na sequência, numa segunda fase, essas ordenações individuais são agregadas com o método COPELAND, a fim de oferecer uma ordenação global para o grupo.

Como consequência, este desenvolvimento também ajuda a incrementar os procedimentos de manutenção, através de medidas prioritárias para manter e melhorar a qualidade dos serviços de abastecimento de água para a população interligada às redes de distribuição.

Com o auxílio dos modelos e levando em consideração as ações com maiores potenciais (mais preferenciais), desenvolvem-se medidas que podem auxiliar as decisões na gestão da manutenção de redes de abastecimento de água, no que tange ao controle e priorização de

investimentos e ações para redução de perdas de água e custos de manutenção, assim como no desenvolvimento da malha de abastecimento de água nas cidades.

Para se adotar uma política de trabalho que procura aplicar a manutenção de redes de água de maneira eficaz, deve ser observado dois pontos essenciais, o primeiro deles são as perdas físicas e as não físicas (ou comerciais) e o segundo as alternativas de manutenção.

As questões relativas às perdas de água precisam ser tratadas e gerenciadas com medidas preventivas, voltadas à melhoria dos procedimentos de manutenção e operação de redes. Por outro lado, tomar uma decisão sobre onde e como agir nessas situações também pode ser complicado, pois existe uma série de dificuldades, as quais levam em consideração, critérios diferenciados que constantemente apresentam conflitos.

Em síntese, esse estudo procura elencar alguns dos principais problemas relacionados às decisões na gestão da manutenção para controle das perdas de água e redução dos custos com manutenção nas organizações que atuam no abastecimento de água, e propõe modelos baseados no apoio à decisão multicritério como ferramentas para apoiar as decisões.

## 1.1 Objetivos do trabalho

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é auxiliar decisões na gestão da manutenção de redes de abastecimento de água, a fim de resolver problemas relacionados ao controle de perdas e custos de manutenção encontrados nesse contexto, através do desenvolvimento de modelos multicriteriais, envolvendo as problemáticas de classificação e ordenação.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- ✓ apresentar o estado da arte em métodos de apoio à decisão, discutir o problema da tomada de decisão em manutenção no saneamento básico e elencar os principais problemas existentes no gerenciamento da manutenção desses sistemas;
- ✓ desenvolver modelos que apoiem decisões para a resolução dos problemas abordados;
- ✓ realizar aplicações dos modelos de apoio à decisão multicritério desenvolvidos;
- ✓ apresentar e discutir os resultados dessas aplicações e,
- ✓ desenvolver um *software* para a aplicação do segundo modelo proposto de decisão em grupo.

## 1.2 Estruturação da Tese

A estruturação da presente tese adota a sequência de capítulos que são discriminados, conforme segue:

Este capítulo 1 corresponde à introdução, no qual são apresentados: o tema do estudo, o objetivo geral, objetivos específicos, bem como a organização do trabalho.

O capítulo 2 discorre acerca da base conceitual, sobre a qual está fundamentado todo o estudo e direciona a linha metodológica a ser abordada nesta pesquisa. Neste capítulo é feita uma breve revisão de conceitos fundamentais e a apresentação do problema a ser desenvolvido.

O capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica sobre os temas gestão da manutenção e métodos multicritério na manutenção de redes de água, e ainda sobre a reabilitação de redes no abastecimento de água. São apresentadas também algumas considerações finais sobre o capítulo.

O capítulo 4 aborda o desenvolvimento de um primeiro modelo para apoiar decisões na gestão da manutenção de redes de abastecimento de água, primeiramente através de uma proposta de classificação de áreas por prioridade de atendimento em ações de manutenção (Modelo-1). É realizada uma aplicação em uma situação real do gerenciamento da manutenção no abastecimento de água, através do levantamento de dados em um sistema automatizado e também da análise dos resultados da aplicação do primeiro modelo desenvolvido.

O capítulo 5 estrutura o desenvolvimento de um segundo modelo de decisão em grupo (Modelo-2), desenvolvido em duas fases, com a problemática de ordenação de alternativas para a classificação gerada no Modelo-1, baseado em métodos multicriteriais de apoio associados. Neste capítulo também é realizada uma aplicação em uma situação real do gerenciamento da manutenção no abastecimento de água, através da elicitación de preferências de um grupo de decisores.

O capítulo 6 tece considerações relevantes ao trabalho desenvolvido, são apontadas sugestões que propiciem a continuidade dessa linha de pesquisa e são apresentadas as conclusões do estudo, decorrentes dos resultados obtidos quando da aplicação dos modelos propostos. São discutidas as principais restrições e contribuições inerentes ao estudo e sugestões para futuros trabalhos.

## **2 BASE CONCEITUAL**

Neste capítulo são discorridos, de forma sucinta, os conceitos que fundamentam o desenvolvimento deste trabalho. Uma vez que existe literatura disponível, na qual podem ser obtidos mais detalhes e um maior aprofundamento sobre os temas abordados.

Procurou-se enfatizar os principais conceitos diretamente relacionados ao foco da pesquisa, de modo a permitir um melhor entendimento quanto a alguns aspectos teóricos que aparecem contextualizados, quando da aplicação destes fundamentos ao problema de interesse sob a abordagem.

### **2.1 Demanda por recursos hídricos e nível de perdas de água**

Os recursos hídricos são objeto de estudos em todo o planeta, por conta da oferta restrita desse recurso natural. Esta oferta, da ordem de 0,49% das reservas disponíveis no planeta, é de água destinada para a exploração e consumo humano, normalmente presentes no subsolo, rios e lagos. Contudo, há uma diminuição gradativa dessas reservas em consequência do mau uso da água, exploração excessiva, desperdícios, crescimento populacional e urbanização descontrolada, que geram aumento na escassez de água para consumo humano.

Todo sistema de produção e distribuição de água está sujeito a perdas, porém no Brasil o problema é mais grave, pois o nível de perda aceitável gira em torno de 20% em sistemas de pequeno porte, e 30% em sistemas de grande porte. Segundo o SNIS (2009) a perda média por ano está em torno de 37%, relativa ao volume de água desperdiçada no Brasil. Ainda segundo o SNIS as empresas nacionais operam normalmente com perdas entre 30% e 60% ou mais. Essas perdas apresentam-se em dois tipos: perdas físicas e não-físicas.

As perdas físicas são as decorrentes de:

- ✓ vazamentos visíveis ou não visíveis,
- ✓ aparelhos danificados, sem manutenção ou fora de sua vida útil,
- ✓ baixa qualidade dos materiais hidráulicos,
- ✓ extravasamentos nos reservatórios,
- ✓ falta de setorização em zonas de pressão e manobra, que causam pressões elevadas nas redes, conseqüentemente resultando em rompimentos nas tubulações, conexões, válvulas e equipamentos de medição.

As perdas não físicas, ou comerciais, são os casos em que a água chega ao consumidor, porém de forma ilícita. Ocorre o impedimento de serem registrados os valores sobre o

consumo das unidades, causando perdas econômicas para a empresa e aumentando o índice de desperdício, já que essas perdas são somadas ao índice global. As ligações clandestinas, além da perda econômica, por serem mal instaladas, facilmente se rompem e resultam em um vazamento desconhecido ou de difícil acesso. Como ilustração, a tabela 2.1, traz algumas informações sobre perdas estimadas em várias localidades no mundo:

Tabela 2.1 – Perdas de água com vazamentos em algumas cidades do mundo

Perdas	Localização	Fonte da Informação
50%	Boston, (1977)	<i>U.S. Environmental Protection Agency Office of Water</i>
36%	Boston, (recentemente)	<i>U.S. Environmental Protection Agency Office of Water</i>
81 bilhões de galões por ano	Califórnia	<i>U.S. Environmental Protection Agency Office of Water</i>
10 - 30%	Sistemas de Produção no Canadá	<i>Agência de Meio Ambiente - Canadá</i>
25 - 30%	Municípios do Canadá	<i>National Research Council of Canada, (1998)</i>
30%	Damasco	<i>Marq de Villiers: "Water", Stoddart Publishing Co., (1999)</i>
40%	Principais cidades da Itália	<i>U.S. Water News Online, "Dry Faucets Enrage Italians", (2002)</i>
12,5%	Johannesburg (Sul da África)	<i>Open letter of Johannesburg Water, (2002)</i>
50%	Londres	<i>Marq de Villiers: "Water", Stoddart Publishing Co., (1999)</i>
55%	Manila	<i>International Finance Corporation, (1997)</i>
32%	Cidade do México	<i>Mexico Connect, (1999)</i>
40%	Montreal	<i>"More water shortages forecast for communities across nation" by Dennis Bueckert, (2004)</i>
10%	New York	<i>U.S. Environmental Protection Agency Office of Water</i>
50%	Cidades no Oeste da Noruega	-
20%	Ontário	<i>Ontario Sewer and Watermain Construction Association – OSWCA, (2001)</i>
50-70%	Noruega	<i>"Civil Engineering Practice", P.N. Cheremisinoff et al. Editors, Technomic Publishing Co, Inc., Basel, (1988)</i>
35%	Seoul, Korea	<i>Seoul Metropolitan government</i>
>30%	Ucrânia	< <a href="http://www.mama-86.kiev.ua">www.mama-86.kiev.ua</a> >
3,42 bilhões de litros por dia	Inglaterra	<i>Weekly Telegraph, August 15-21, (2007)</i>
35-55%	Sistemas Antigos com condições precárias	<i>A.C. Twort et al.: "Water Supply", Fourth Edition, Arnold, (1994)</i>

Fonte: WATER PAGES, 2001

Portanto, o gerenciamento da disponibilidade de água é que deve ser considerado problema do século atual e não a redução da sua oferta. A única forma de inviabilizar a água para o consumo é através da contaminação da mesma por poluentes. Assim cabe: às autoridades tomar decisões no sentido de criar programas e leis que orientam e punam exemplarmente aqueles que poluem e contaminam as águas; e às empresas gerenciar a manutenção e diminuir os índices de perdas, pois é o consumo de água no planeta que deve ditar sobre as políticas de gerenciamento da água. O consumo de água *per capita* varia em diversos países do mundo, conforme suas tradições e disponibilidade. Alguns exemplos podem ilustrar essa afirmação e estão destacados na tabela 2.2:

*Tabela 2.2 – Consumo médio per capita em alguns países*

<b>País</b>	<b>Consumo de água per capita</b>
Estados Unidos	576 litros/habitante/dia
Austrália	492 litros/habitante/dia
Itália	384 litros/habitante/dia
Japão	375 litros/habitante/dia
México	365 litros/habitante/dia
Espanha	319 litros/habitante/dia
França	291 litros/habitante/dia
Alemanha	192 litros/habitante/dia
Brasil	187 litros/habitante/dia
China	85 litros/habitante/dia

Fonte: UNDP, 2006

No Brasil, por exemplo, o volume do consumo de água *per capita* multiplicou-se por mais de 10 vezes ao longo do século XX. Mesmo assim existem alguns milhões de cidadãos sem acesso a água com qualidade. Da mesma forma, milhões de casas não estão interligadas nas redes de esgoto e conseqüentemente, não possuem tratamento para esses detritos, fato que pode gerar poluição tanto nos mananciais quanto em rios e lagos (SNIS, 1999).

Portanto, são necessárias decisões sobre investimentos por parte das autoridades em programas de conservação e eficiência no uso da água e também na manutenção das redes de distribuição para redução de perdas. Porém, se esses investimentos não forem efetuados, no futuro pode-se incorrer em um caos social derivado da provável redução da oferta de água para consumo humano.

## **2.2 Gestão da manutenção de redes no abastecimento água**

Há um ponto importante a se considerar, quando a manutenção é estratégica numa organização: parar de produzir ou de prestar serviços aos clientes por quebras ou situações indesejáveis pode ser prejudicial ao desempenho e desenvolvimento de uma empresa. A

gestão da manutenção tem um papel importante no sucesso dos programas de combate ao desperdício e na correta aplicação das técnicas de controle e gerenciamento de sistemas. As atividades não podem cessar sem que causem perdas inaceitáveis ao processo produtivo. Por isso a manutenção frequentemente chega a ter um grau de importância similar ao da produção.

Normalmente, a principal causa do mau funcionamento e elevada manutenção num sistema de abastecimento de água é a gestão ineficiente da manutenção. Mas os estudos, reorganizações e assistência técnica aos serviços públicos de água e saneamento, têm geralmente focado na expansão e no aumento da qualidade dos serviços oferecidos. A pressão de fornecer água para mais pessoas é particularmente intensa no setor de abastecimento de água. Como resultado, novas instalações tendem a receber maior prioridade, em termos de orçamentos, de pessoal, de operação e de manutenção, mas em uma crise financeira, orçamentos em operação e manutenção são os primeiros a serem cortados, com conseqüente deterioração de tubulações, equipamentos e serviços.

Para ser sustentável, uma operação deve ser financeiramente viável. Por causa da pressão para expandir a área servida, a viabilidade geralmente implica na recuperação dos custos de implantação, operação e manutenção, bem como os custos de capital. Nos serviços públicos, muitas vezes são encontradas dificuldades em obter aprovação para aumentar as taxas para níveis que são financeiramente e economicamente mais adequados. Muitas vezes isso decorre de razões políticas, mas também porque os serviços são mal administrados e sua urgência não é bem percebida. Taxas elevadas devem ser justificadas não apenas à entidade governamental, mas também para os consumidores. Campanhas de relações públicas podem ser úteis, mas um serviço de qualidade, relacionado ao fornecimento de água é muitas vezes crucial para assegurar a aceitação dos consumidores em relação às elevações de preços.

Pelo fato de que, na maioria dos países, o abastecimento de água é gerenciado por entidades públicas, os esforços para melhorar a sua eficiência são importantes.

Três instrumentos se mostram úteis em inculcar disciplina comercial em órgãos públicos (WORLD BANK, 2001):

- ✓ **Empresarialização**: o que dá a organização um grau de autonomia, isolando-a de pressões e restrições não-comerciais;
- ✓ **Contratos explícitos e procedimentos regulatórios entre o governo e a organização gerenciadora**: que especificam os serviços a serem entregues, mas deixam ao critério da organização o planejamento e gestão;

- ✓ **Políticas de preços destinadas a assegurar a recuperação dos custos:** uma forma desejável de independência financeira para a organização.

### 2.2.1 Tipos de Manutenção

World Bank (2001) aponta na manutenção do abastecimento de água alguns dos tradicionais tipos encontrados, assim como suas especificidades relativas ao setor:

- ✓ **Manutenção preventiva ou de rotina:** incluindo detecção de vazamentos, são realizadas de forma contínua em horários pré-estabelecidos, de acordo com considerações racionais e estudos sobre o comportamento do sistema. Uma vez definidos, estes períodos devem ser mantidos e os resultados registrados. Programas especiais tais como: intensiva detecção de vazamentos, pesquisas para detectar ligações clandestinas ou análise de rede de distribuição, podem ser programados numa base de tempo anual ou periódica.

Um aspecto importante da manutenção preventiva para a gestão da manutenção no abastecimento de água é a inspeção sistemática e substituição de medidores de consumo e distribuição. Isso geralmente requer uma oficina para a limpeza, testes e reparação.

Em geral, os medidores domésticos devem ser tirados de serviço a cada 5 a 7 anos e completamente substituídos.

- ✓ **Manutenção corretiva ou reativa:** é necessária quando a manutenção preventiva foi insuficiente, após acidentes decorrentes do envelhecimento e degradação do sistema. Todas as intervenções são analisadas e as causas de mau funcionamento ou quebra anotadas, de forma a orientar as decisões para aquisição futura e ajudar a decidir se parte ou a totalidade de uma rede deve ser atualizada ou substituída.

### 2.2.2 Redução de perdas de água

Em associação com um serviço contínuo de distribuição de água de boa qualidade, um baixo índice de perdas é um dos melhores indicadores globais que um sistema de abastecimento de água deve ter para ser bem sucedido. Esses índices podem variar de sistema para sistema, mas os resultados de diversas avaliações confirmam que no abastecimento de água normalmente são elevados.

Segundo o World Bank (2001) as principais razões para os problemas de perdas incluem:

- ✓ Projetos de engenharia pobres (construção e manutenção);
- ✓ Medição mal administrada (faturamento ou cobrança);
- ✓ Informações ineficientes aos consumidores;
- ✓ Ligações clandestinas e roubo (endêmica em algumas cidades).

Em sistemas onde o consumo não é medido, isto é, onde os consumidores são cobrados com base em uma taxa fixa, às vezes como parte de seus impostos de propriedade, as perdas não podem ser medidas com precisão; melhores estimativas podem ser feitas a partir de áreas de medição ou vazão mínima noturna e inspeções de rotina para medição e vazamentos.

Programas de redução de perdas, muitas vezes podem conter projeções bastante otimistas em relação aos meios financeiros, técnicos e administrativos necessários para atingir as metas fixadas. Uma característica comum desses programas é o seu viés técnico. Os gestores assumem que o vazamento físico é a parte principal do problema, e assim lançam intensivos estudos de detecção de vazamentos, sem tomar medidas para rastrear e endereçar as perdas administrativas ou não-físicas.

Assim, as empresas que atuam no abastecimento de água, frequentemente realizam os tipos de manutenção nas redes de abastecimento na forma corretiva. A manutenção é uma constante neste setor, visto que as tubulações transportadoras rompem com frequência, em virtude de diversos fatores: seja por consertos nas vias urbanas, seja pelo aumento nas pressões nessas redes ou ainda por fatores climáticos. A manutenção estratégica precisa ser aplicada de forma sistematizada através de planos de gestão e programação, juntamente com decisões sobre melhorias no sistema de abastecimento, com isso as empresas deste ramo podem melhorar a disponibilidade dos produtos e serviços relacionados ao abastecimento.

As alternativas de manutenção voltadas à conservação e ao combate ao desperdício de água vinculam-se, simultaneamente:

- ✓ ao planejamento,
- ✓ ao projeto,
- ✓ à construção,
- ✓ à operação e,
- ✓ à própria manutenção dos sistemas.

Porém, são encontradas algumas dificuldades nas tomadas de decisões no que diz respeito às alternativas para otimização dos processos de manutenção quanto a sua priorização. Isto por se tratarem de avaliações de aspectos subjetivos e objetivos simultaneamente e, ainda, com conflito de critérios.

### 2.3 Estruturação de problemas

Franco *et al.* (2004) afirmam que os métodos de estruturação de problemas são um conjunto de métodos de apoio a decisão que auxiliam os grupos de formações variadas a concordarem com um determinado problema e a se comprometerem com uma ação subsequente. São mais comumente usados como uma base para a identificação ou resolução de assuntos estratégicos específicos dentro das organizações. A característica desses métodos é o uso de um modelo para representar alternativas da situação complexa de interesse comum, combinado com facilitadores que ajudam os membros do grupo a fazerem ajustes mútuos e construtivos. Os problemas não-estruturados são caracterizados por Mingers & Rosenhead (2001), pela existência de:

- ✓ múltiplos atores;
- ✓ múltiplas perspectivas;
- ✓ conflito de interesses;
- ✓ importâncias intangíveis;
- ✓ incertezas.

Os problemas desse tipo são mais estratégicos conforme sugerido por alguns autores (ACKOFF, 1979; CHECKLAND, 1985; RITTEL & WEBBER, 1973; SCHON, 1987). Nessa perspectiva, na verdade torna-se difícil falar a respeito de “**problemas**”, como tal, pois desde a sua construção, muito da situação do problema de um tipo particular é resultado do processo de estruturação do próprio problema, ao invés de ser um dado ponto de partida. Por outro lado, pode ser melhor para relatar diferentes aspectos ou dimensões de uma situação-problema, ao contrário de diferentes tipos de problemas (MINGERS & GILL, 1997).

O que cada método de estruturação de problemas pode oferecer é uma forma de representar uma situação, que permitirá aos participantes esclarecer a situação de modo a convergirem para um problema potencialmente comum, ou alguma questão dentro dele, e concordarem com as ações que vão ajudar a resolver, total ou parcialmente o problema. Para fazer isso a obrigação de um método de estruturação de problemas é:

- ✓ permitir que várias alternativas potenciais formem uma conjunção entre elas;
- ✓ ser acessível aos atores apresentando informações claras e sem necessidade de treinamento especializado, de modo a criar um processo participativo para a estruturação do problema;

- ✓ ser interativo, de modo que a representação do problema seja ajustada para refletir o estado e estágio da discussão entre os decisores;
- ✓ permitir melhorias pontuais ao invés de exigir uma solução global, o que implicaria em uma fusão dos diversos interesses e ampla discussão.

A consequência desses requisitos é que métodos de estruturação de problemas, embora sofisticados na maneira de conceitualizar e interagir com o processo de decisão em curso, são relativamente rudimentares no modelamento matemático.

As principais características em um texto amplamente referenciado (ROSENHEAD, 1989) sobre os métodos de estruturação de problemas, podem ser resumidas da seguinte forma:

- ✓ *Strategic Options Development and Analysis (SODA)*: Opções estratégicas de desenvolvimento e análise é um método de identificação geral de problemas que usa mapeamento cognitivo como um dispositivo de modelagem e elicitación de pontos de vistas individuais sobre uma situação-problema. A fusão dos mapas cognitivos individuais fornece a estrutura para discussões em grupo e facilitam aos participantes à construção de um conjunto de ações;
- ✓ *Soft Systems Methodology (SSM)*: Metodologia de sistemas flexíveis é um método geral para redesenhar sistemas. Participantes constroem um tipo ideal de modelos conceituais, um para cada visão relevante do mundo. Comparam com as percepções do sistema existente, a fim de gerar um debate sobre as mudanças que são culturalmente viáveis e sistemicamente desejáveis;
- ✓ *Strategic Choice Approach (SCA)*: Abordagem da escolha estratégica é uma abordagem centrada no planejamento de gestão em situações de incerteza. Facilitadores ajudam os participantes a modelar a interligação de áreas de decisão. Comparação das alternativas nos sistemas interativos de decisão ajuda a detectar as incertezas do contexto. Nesta fase o grupo identifica as áreas prioritárias para uma solução parcial, além de explorações de projetos e planos de contingência;
- ✓ *Robustness analysis*: Análise de robustez é uma abordagem que se concentra em manter a flexibilidade em situações de incerteza. Em um

processo interativo, os participantes e analistas avaliam a compatibilidade de alternativas e compromissos iniciais com possíveis configurações futuras do sistema a ser planejado e o desempenho de cada configuração viável em ambiente futuro. Isso permite compará-los à flexibilidade mantida pela alternativa nos compromissos iniciais;

- ✓ *Drama Theory*: Teoria drama baseia-se em duas abordagens anteriores, *metagames* e *hypergames*. É um método interativo de análise de cooperação entre múltiplos atores para resolução dos conflitos. Um modelo é construído a partir de percepções das alternativas disponíveis para os atores, e como elas são classificadas. A Teoria drama olha para os dilemas apresentados aos atores dentro deste modelo da situação. Cada dilema é um ponto de mudança, que tende a causar em um ator a percepção de emoções específicas e produzir argumentos racionais pelo qual o modelo em si é redefinido. Quando tais redefinições sucessivas tiverem eliminado todos os dilemas, o problema é totalmente resolvido através da ação conjunta dos atores. Analistas comumente trabalham com as partes individualmente, ajudando a serem mais eficazes no processo racional-emocional de resolução dramática.

Dada a indefinição dos limites entre os métodos de estruturação de problemas e os que não os são, há uma série de outros métodos com algumas similaridades. Estes incluem sistemas críticos de heurísticas (ULRICH, 2000), planejamento interativo (ACKOFF, 1981). Aqueles que são particularmente familiares aos métodos de estruturação de problemas em pelo menos alguns de seus modos de usos são os seguintes (MINGERS & ROSENHEAD, 2001):

- ✓ *Viable Systems Model (VSM)*: Modelo de sistemas viáveis é um modelo genérico de uma organização viável baseada em princípios cibernéticos. Ele especifica cinco sistemas ideais que devem existir dentro de uma organização de alguma forma: operações, coordenação, controle, inteligência e política, juntamente com controle apropriado e comunicação eficaz. Embora tenha sido desenvolvido com uma intenção prescritiva, também pode ser usado como parte de um debate sobre os problemas do desenho organizacional e redesenho (HARNDEN, 1990);

- ✓ *System Dynamics* (SD): Dinâmica de sistema é uma forma de percepção de modelagem de pessoas no mundo real e de sistemas baseados principalmente em relações causais e *feedback*. Foi desenvolvido como uma ferramenta de simulação tradicional, mas pode ser usado especialmente em combinação com diagramas de influência, como forma de facilitar a discussão em grupo (LANE, 2000; VENNIX, 1996);
- ✓ *Decision conferencing*: Conferência de decisão é uma variante das análises de decisões mais amplamente conhecidas. Essas análises constroem modelos de apoio a escolha entre alternativas de decisão nos casos em que as conseqüências podem ser multidimensionais e onde não pode haver incerteza sobre eventos futuros que afetam as conseqüências. O que distingue a conferência de decisão é que ela opera em modo de *workshop*, com um ou mais facilitadores direcionando o grupo de participantes para a estrutura do modelo e as possibilidades e ações a serem incluídas nela. O objetivo é fundido, não como a identificação de uma solução melhor objetivamente, mas como a realização de entendimento comum, o desenvolvimento de um senso de propósito comum. (PHILLIPS, 1989; WATSON & BUEDE, 1987).

Esses métodos podem ser e têm sido projetados para uso em situações particulares. E até mesmo aqueles métodos que têm alcançado um peso considerável de aplicações, são comumente empregados com variantes criativas que levam em consideração as circunstâncias locais.

Há uma série de textos que apresentam uma seleção de diferentes métodos mais *soft* do que os apresentados por Mingers e Rosenhead. Estes incluem Flood & Jackson (1991), que se concentram em sistemas baseados em métodos, Dyson & O'Brien (1998), que consideram uma série de abordagens *hard* e *soft* na área de formulação de estratégia e de Sorensen & Vidal (1999), que apresentam uma ampla gama de métodos acessíveis ao público escandinavo. Há claramente um extenso repertório de métodos disponíveis. De fato, é comum a combinação entre uma série de métodos de estruturação de problemas, ou dos métodos de estruturação de problemas, juntamente com métodos mais tradicionais. Essa é uma prática conhecida como multimetodologia (MINGERS & BROCKLESBY, 1997). Assim, o leque de escolha metodológica é maior até do que uma simples lista de métodos poderia sugerir.

A complexidade da situação do problema é o que faz o uso dos métodos de estruturação valioso. A questão é como representar essa complexidade de uma maneira que não exclua nenhuma camada envolvida. Para esses autores, certamente o tratamento matemático poderia tornar a análise de difícil compreensão para a maioria dos participantes, e é provável que promova uma sensação de que o conhecimento elicitado está sendo manipulado.

A fim de evitar tais problemas, é sugerido então o uso de métodos gráficos. Os diagramas podem mostrar, em termos espaciais, uma rede de influências. Representações da considerável complexidade podem ser visualizadas com facilidade. Até mesmo aqueles sem noção prévia das notações, são freqüentemente capazes de compreender prontamente a linguagem, de modo que até possam, em pouco tempo de uso, dar sugestões de modificações para o modelo. O propósito dessas representações não é permitir que o consultor encontre a solução, mas habilitar o grupo a contribuir com suas experiências e julgamentos de uma maneira mais eficiente.

## 2.4 Decisão Multicritério

Tomar decisões para solucionar problemas parece ser uma atividade simples e natural ao ser humano, porém pode ser considerada bastante complexa, se envolver possíveis alternativas de ação, diferentes pontos de vista e formas específicas de avaliação, traduzidos como múltiplos critérios que geralmente são envolvidos em conflitos entre si. O que chama a atenção neste tipo de problema é que não existe, normalmente, nenhuma alternativa que seja a melhor, simultaneamente, para todos os critérios.

Zeleny (1982) aponta que a tomada de decisão pode ser definida como um esforço para resolver o dilema dos critérios conflituosos, cuja presença impede a existência da “**solução ótima**” e conduz à procura da “**solução de melhor compromisso**”. Daí a grande importância dos métodos multicritério como instrumento de apoio à tomada de decisões. O apoio multicritério a decisão oferece ao decisor algumas ferramentas capazes de torná-lo apto a resolver problemas levando em consideração os mais diversos pontos de vista, muitas vezes contraditórios (VINCKE, 1992).

A seguir são apresentados alguns conceitos básicos em relação ao apoio multicritério à decisão, descrevendo as problemáticas de referência, a modelagem de preferências e alguns dos métodos multicritério utilizados no trabalho.

A relevância de uma metodologia de apoio a tomada de decisão multicritério deriva do fato de que, na maioria das situações em que se tem que decidir, não existe apenas um objetivo e sim, são considerados vários pontos de vista, sendo eles, geralmente conflitantes entre si. Por isso, o processo de decisão, deve ser orientado por uma análise com métodos multicritério para apoiar o decisor na otimização das alternativas. Essa metodologia, por um lado visa auxiliar no processo de escolher, ordenar ou classificar as ações potenciais e, por outro lado, busca incorporar múltiplos aspectos no processo, ao invés dos métodos monocritérios da pesquisa operacional tradicional.

Segundo Vincke (1992), existem vários métodos e técnicas multicritério, dentre eles, pode-se identificar: os modelos aditivos, que geram um critério único de síntese (*Multiple Attribute Utility Theory* – MAUT; *Analytic Hierarchy Process* - AHP) e os métodos de sobreclassificação, ou *outranking methods* (ELECTRE e PROMETHEE). Esses modelos e métodos seguem duas principais vertentes, a *Multiple Criteria Decision Making* – MCDM e a *Multicriteria Decision Aid* – MCDA, decorrentes de estudos das Escolas Americana e Européia. A adoção de um desses modelos é normalmente justificada por argumentos ditados pela natureza do problema a analisar.

A mais conhecida família de métodos de Subordinação é a família ELECTRE (*Elimination Et Choice Traidusaint la REalite*). Atualmente, a família ELECTRE é composta dos seguintes métodos: ELECTRE I (ROY, 1968), ELECTRE II (ROY & BERTIER, 1971), ELECTRE III, ELECTRE IV (ROY & HUGONNARD, 1982), ELECTRE IS (ROY & SKALKA, 1985) e ELECTRE TRI (YU, 1992).

#### 2.4.1 Tipos de problemáticas

Os métodos multicritério existem para esclarecer um problema que pode ser de seleção, ordenação, classificação ou descrição de alternativas. Os Tipos de Problemáticas são normalmente descritos como (ROY, 1985):

- ✓ **Problemática tipo seleção  $\alpha$  ( $P\alpha$ )**: selecionar a(s) melhor(es) alternativa(s) dado um conjunto de alternativas, esclarecimento da decisão através da escolha de alternativas (o mais restrito possível);
- ✓ **Problemática tipo classificação  $\beta$  ( $P\beta$ )**: classificar as alternativas em categorias definidas *a priori* em função de normas estabelecidas, esclarecimento da decisão

por triagem, por meio da alocação das alternativas a categorias previamente definidas;

- ✓ **Problemática tipo ordenação  $\gamma$  ( $P\gamma$ )**: ordenar as alternativas, esclarecimento da decisão por meio de agrupamento das alternativas em classes de equivalência;
- ✓ **Problema tipo descrição  $\delta$  ( $P\delta$ )**: descrever detalhadamente as alternativas para facilitar ao decisor no processo da decisão.

É importante notar que esses tipos de problemas não são independentes entre si, pois a ordenação das alternativas pode ser a base para resolver problemas de seleção da melhor alternativa (GOMES *et al.*, 2004).

#### 2.4.2 Atores

O apoio à tomada de decisão é um processo em que modelos são desenvolvidos com o objetivo de trazer uma solução para uma escolha entre alternativas, classificação entre as alternativas, ordenação das alternativas, ou ainda, descrição das alternativas. Esse processo envolve alguns atores e os modelos criados se fundamentam-se nas preferências desses atores (ROY, 1985). Os agentes no processo de tomada de decisão são: o decisor e o analista da decisão (GOMES, 2007).

O decisor é o indivíduo que tem o poder final e a responsabilidade das conseqüências da sua decisão. Dados seu juízo de valor e pontos de vista, caberá a esse agente tomar a decisão com base nas recomendações apresentadas. É para o decisor que o modelo de apoio à decisão é construído.

No entanto, segundo Roy (1985), apoiar o decisor não quer dizer que somente suas preferências, opiniões e estratégias devem ser consideradas, em detrimento dos outros agentes do processo de decisão.

Durante um processo de decisão, o decisor pode assumir o papel de desenvolver a atividade de apoio à decisão. No entanto, o decisor não tem um olhar crítico sobre seus problemas e preferências. Como exemplificado por Roy (1985), é como se um médico cuidasse da sua própria saúde. Por isso, normalmente entra um segundo ator, o “**homem de estudo**” (*homme d'étude*, por Roy (1985)) ou o analista.

Por último, pode existir um terceiro ator no processo decisório. Esse é o solicitante (ou *demandeur*, em francês) que pode encomendar um estudo no caso de não haver nenhum contato possível entre o decisor e o analista.

### 2.4.3 Preferências

Frente a duas alternativas do seu conjunto de alternativas  $A$ , considera-se que o decisor seja capaz de declarar sua preferência ou indiferença entre essas. Ou seja, segundo Gomes, *et al.* (2004), as preferências do decisor são expressas por uma relação binária ( $\mathfrak{R}$ ). Essa relação binária  $\mathfrak{R}$  é de grande importância para modelagem das preferências e segue algumas propriedades clássicas descritas pelos autores a seguir:

- ✓ **Reflexividade**: a relação binária é considerada reflexiva se  $\forall a \in X$  (conjunto de alternativas), tem-se  $(a,a) \in \mathfrak{R}$ ;
- ✓ **Irreflexividade**: a relação binária é considerada irreflexiva se  $\forall a \in X$ , tem-se  $(a,a) \notin \mathfrak{R}$ ;
- ✓ **Simetria**: a relação binária é considerada simétrica se  $(a,b) \in \mathfrak{R}$  supõe também que  $(b,a) \in \mathfrak{R}$ ;
- ✓ **Assimetria**: a relação binária é considerada assimétrica se  $(a,b) \in \mathfrak{R}$  supõe também que  $(b,a) \in \mathfrak{R}^-$ ;
- ✓ **Transitividade**: a relação binária é considerada transitiva se  $(a,b) \in \mathfrak{R}$  e  $(b,c) \in \mathfrak{R}$  implicam  $(a,c) \in \mathfrak{R}$ .

Outras situações importantes na modelagem das preferências são as que o decisor pode se encontrar quando compara duas alternativas (ROY, 1985). Segundo Gomes *et al.* (2004), são quatro as situações fundamentais e mutuamente excludentes das preferências do decisor:

- ✓ **Indiferença (I)**: o decisor é indiferente entre as alternativas, ou seja, existe claramente uma equivalência entre as duas alternativas. Essa relação é expressa por  $aIb$  e é simétrica e reflexiva;
- ✓ **Preferência Estrita (P)**: o decisor prefere estritamente e sem dúvida uma alternativa a outra. Essa relação é expressa por  $aPb$  e é uma relação assimétrica e irreflexiva;
- ✓ **Preferência Fraca (Q)**: o decisor não consegue definir se prefere uma alternativa a outra ou se essas são indiferentes. Essa relação é expressa por  $aQb$  e, assim como a preferência estrita, também é uma relação assimétrica e irreflexiva;
- ✓ **Incomparabilidade (R ou NC)**: situação que não se enquadra em nenhuma das situações anteriores. É denominada por  $aRb$  e é simétrica e irreflexiva.

As últimas situações (Preferência Fraca e Incomparabilidade) foram introduzidas pela Escola Francesa, nos métodos da família ELECTRE. A idéia foi esclarecer algumas situações em que não era possível identificar nem a Preferência Estrita nem a Indiferença, admitindo a incomparabilidade. Segundo Gomes *et al.* (2004) essas situações podem ocorrer quando:

- ✓ Os agentes da decisão não conseguem decidir entre duas alternativas, pois a informação pode ser incompleta ou não ser subjetiva;
- ✓ Os agentes da decisão não conseguem determinar as reais preferências dos decisores por serem inacessíveis. Os decisores podem ser uma entidade remota (por exemplo, Chefe de Estado ou Presidente de Empresa) ou uma entidade esparsa (opinião pública) que podem ter preferências mal definidas ou contraditórias;
- ✓ Os agentes de decisão não conseguem discriminar uma alternativa.

A combinação das quatro situações fundamentais, descritas anteriormente, deu origem a outras situações importantes. Essa combinação permite criar novas situações que refletem melhor o que ocorre na prática com os agentes de decisão. Essas novas situações, resumidas por Gomes *et al.* (2004), são:

- ✓ **Não-preferência** ( $\sim$ ): situação em que as alternativas são indiferentes ou incomparáveis para o decisor, isto é,  $a \sim b$  se e somente se  $aIb$  ou  $aRb$ ;
- ✓ **Preferência (em sentido amplo)** ( $\succ$ ): o decisor não é capaz de definir se há preferência estrita ou fraca entre duas alternativas. Nesse caso,  $a \succ b$  se e somente se  $aPb$  ou  $aQb$ ;
- ✓ **Presunção de preferência** ( $J$ ): quando o decisor tem uma preferência fraca por uma alternativa e que, no limite, ela pode chegar a indiferença. Essa situação é representada por  $aJb$  se e somente se  $aQb$  ou  $aIb$ ;
- ✓ **K-preferência** ( $K$ ): o decisor se depara com uma situação em que ou tem uma preferência estrita por uma alternativa ou identifica uma incomparabilidade entre as alternativas. A reação é representada por  $aKb$  se e somente se  $aPb$  ou  $aRb$ ;
- ✓ **Superação** ( $S$ ): combina três situações (preferência estrita, preferência fraca e indiferença) sem que o decisor seja capaz de distinguí-las. Assim,  $aSb$  se e somente se  $aPb$  ou  $aQb$  ou  $aIb$ .

#### 2.4.4 Estrutura de preferências

Dadas as propriedades e as relações binárias apresentadas acima, podem-se definir alguns tipos de estrutura das preferências sobre um conjunto de alternativas  $A$ . Uma das estruturas é a pré-ordem completa, uma classificação com possibilidade de empate (GOMES, 2007). No entanto, as relações de preferência nessa estrutura e a imposição de transitividade dessas conduzem a uma modelagem pouco realista e, portanto, foram definidos outros tipos de estrutura: quase-ordem, ordem de intervalo, pré-ordem parcial e pseudo-ordem.

A quase-ordem e a ordem de intervalo admitem que “**a relação simétrica não é perfeitamente transitiva em decorrência de casos extremos**”. Esses casos são definidos pelo limite da indiferença  $q$ . A diferença entre as duas é que a quase-ordem é uma ordem de intervalo onde o limite da indiferença é constante.

A pré-ordem parcial conta com três relações binárias em um conjunto de alternativas  $A$ . Ela é uma generalização da pré-ordem completa, pois permite que haja incomparabilidade na classificação, porém guardando a transitividade.

Por fim, a estrutura mais complexa, a pseudo-ordem é similar à quase-ordem com uma relação binária adicional. Essa relação corresponde à preferência fraca e se dá por meio da introdução de um limite de preferência  $p$ . A pseudo-ordem é a estrutura utilizada no ELECTRE em que são admitidos três tipos de relações binárias: a preferência estrita ( $P$ ), a preferência fraca ( $Q$ ) e a indiferença ( $I$ ). Essas relações são como “**regiões**” delimitadas pelos limites de indiferença ( $q$ ) e de preferência ( $p$ ).

### 2.5 Abordagens multicritério

Roy (1985) classifica essas famílias da seguinte forma:

**Abordagem critério único de síntese**: Consiste na agregação de diferentes pontos de vista em uma única função. Estuda as condições matemáticas de agregação, formas particulares de função de agregação e a construção do método. Dentre os métodos dessa abordagem, destaca-se a Teoria da Utilidade Multiatributo (*Multiple Attribute Utility Theory - MAUT*). É chamada de teoria porque a função utilidade multiatributo é obtida a partir da relação existente entre a estrutura de preferência do decisor e a estrutura axiomática da teoria da utilidade (GOMES *et al.*, 2006). A função utilidade  $u$  associa a cada consequência  $x$  um número  $u(x)$  que representa a utilidade, ou seja, representa a medida de preferência que o decisor atribui à consequência  $x$ . A solução do problema de decisão é determinar a função

utilidade,  $u$ , e maximizar o seu valor esperado, sabendo que o valor esperado é associado a uma distribuição de probabilidade das alternativas.

**Abordagem de sobreclassificação:** Consiste, primeiramente, na construção da relação chamada de sobreclassificação que representa as preferências dos decisores. O segundo passo consiste em explorar a relação de sobreclassificação com o objetivo de ajudar os decisores a resolverem seus problemas. Segundo Haralambopoulos & Polatidis (2003), os métodos de sobreclassificação são os mais indicados para tratar de problemas relacionados a questões de energia e planejamento ambiental. Os autores justificam a afirmativa alegando que os métodos de sobreclassificação possibilitam aos decisores *insights* durante a estruturação do problema, modelam de forma realista as estruturas de preferência dos decisores com a inclusão de limiares de preferência e indiferença. Dentre os métodos dessa abordagem, destacam-se os métodos da família ELECTRE, desenvolvidos por Roy e membros do *Laboratoire d'Analyse et Modélisation de Systèmes pour l'Aide à la Décision- LAMSADE, University of Paris Dauphine* (BELTON & STEWART, 2002). Os métodos ELECTRE são baseados em índices de concordância e discordância. O índice de concordância mede a “força” da informação de que uma alternativa  $a$  é pelo menos tão boa quanto uma alternativa  $b$ . O índice de discordância mede a força da evidência contrária a essa hipótese (BELTON & STEWART, 2002). Para cada par ordenado de ações será associado um índice de concordância e um índice de discordância. A cada critério é atribuído um peso, que deve ser proporcional à importância do critério. Os pesos servem como escala para comparar critérios (BELTON & STEWART, 2002). Os seguintes métodos da família ELECTRE são apresentados por Roy (1996), sendo cada um deles aplicados a uma situação diferente:

- ✓ ELECTRE I: procura selecionar um conjunto de alternativas dominantes, sendo indicado para problemáticas de escolha (P.  $\alpha$ );
- ✓ ELECTRE II: resulta num *ranking* das alternativas não dominadas, sendo indicado para problemática de ordenação (P.  $\gamma$ );
- ✓ ELECTRE III: aplicável aos casos em que a família de pseudo-critério se verifica, sendo indicado para problemáticas de ordenação (P.  $\gamma$ );
- ✓ ELECTRE IV: é igualmente aplicável nos casos em que a família de pseudo-critério se verifica. Sua característica principal consiste na não utilização de ponderação associada à importância relativa dos critérios, sendo indicado para problemáticas de ordenação (P.  $\gamma$ );

- ✓ ELECTRE IS: indicado para problemáticas de escolha (P.  $\alpha$ ) e para família de estrutura de pseudo-critério;
- ✓ ELECTRE TRI: aplicável aos casos da família de pseudo-critério, sendo indicado para problemáticas de classificação (P.  $\beta$ ).

**Abordagem do julgamento iterativo:** Esta abordagem propõe métodos que alternam passos de cálculo, fornecendo sucessivas soluções de compromisso, e passos de diálogo, que são fonte extra de informação sobre as preferências dos decisores.

### 2.5.1 Relação de dominância e não-dominância

O conceito de dominância ou não-dominância pode ser ilustrado pelos estudos de Cohon (1978), onde afirma que uma solução não-dominada é aquela em que a melhoria de uma função-objetivo só pode ser conseguida à custa da degradação de outras funções-objetivo. Na figura 2.1, para os objetivos  $Z_1$  e  $Z_2$ , ambos de maximização, a região viável no espaço das possibilidades é o conjunto de soluções não-dominadas.

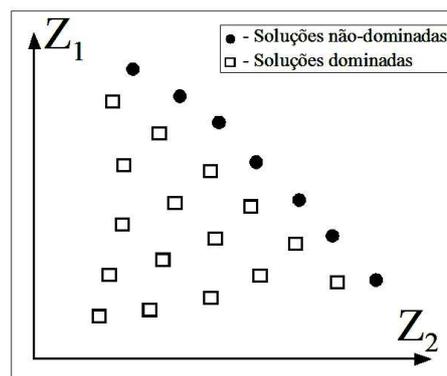


Figura 2.1 – Relação de dominância  
Fonte: adaptado de PORTO & AZEVEDO, 1998.

Essa análise, através de vários métodos, possibilita o apoio ao processo decisório na escolha da mais adequada das soluções não-dominadas, sob os critérios de avaliação adotados e para as condições específicas de cada problema. Cada um dos problemas é mensurado através da sua função-objetivo, não havendo a necessidade de que estas funções-objetivo se utilizem de uma mesma unidade de medida. Questões sociais, ambientais, culturais e de bem estar da população, ressaltam um dos aspectos mais críticos da análise multiobjetivo que é a subjetividade, inerente a esse processo.

Na idéia dos métodos da família ELECTRE, se caracteriza a utilização do conceito francês *súrclassante* - traduzido para a língua inglesa como *outranking* e para a língua

portuguesa como superação, subordinação, superclassificação, prevalência e, até mesmo, dominação. Segundo este conceito, uma alternativa genérica  $a_n$  domina a alternativa genérica  $b_n$  ( $aSb$ ), se não existirem argumentos suficientes para dizer que  $a_n$  é pior do que  $b_n$ . Como princípio básico, nestes métodos considera-se como dominada a alternativa que "**perde**" para as demais ou são piores em um maior número de critérios.

## 2.6 Métodos multicritérios de decisão em grupo

Decisão em grupo é usualmente entendida como a redução de diferentes preferências individuais em uma preferência coletiva única (JELASSI, 1990 *apud* LEYVA-LÓPEZ & FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, 2003).

Decisão em grupo pode ser entendida como a decisão tomada com base numa preferência coletiva obtida a partir de diferentes preferências individuais.

Segundo Srdjevic (2007), duas abordagens são comumente utilizadas para tratar de apoio à decisão em grupo. A primeira abordagem utiliza o apoio à decisão multicritério, particularmente útil para tratar de problemas estruturados. A segunda abordagem utiliza a teoria da escolha social, útil quando as informações disponíveis sobre o problema são limitadas, confidenciais e predominantemente qualitativas. As características inerentes ao problema é que irão determinar a abordagem e o método mais adequado.

Nos métodos multicritérios para decisão em grupo pode surgir o papel de um ator especial chamado de supra decisor (*Supra Decision Maker* – SDM). O SDM pode ser visto como uma entidade que representa o interesse da organização a qual ele representa. O papel dele pode ser desempenhado pelo analista de decisão (LEYVA-LÓPEZ & FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, 2003).

Na decisão em grupo, surge também o conceito de grupo colaborativo. De uma maneira geral, este elemento pode ser entendido como um grupo onde os integrantes expressam as preferências individuais e aceitam a decisão final obtida a partir da agregação de preferências de acordo com as regras estabelecidas pelo SDM (LEYVA-LÓPEZ & FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, 2003).

Leyva-López & Fernández-González (2003) destacam duas abordagens principais utilizadas para agregar preferências individuais:

- ✓ agregação em nível de entrada;
- ✓ agregação em nível de saída.

Na abordagem agregação nível de entrada, os indivíduos entram em consenso sobre todos os parâmetros. A determinação dos parâmetros é obtida através de discussão estabelecida no início do processo. O método multicritério é aplicado utilizando os parâmetros que foram acordados pelo grupo. Esta abordagem é mais indicada quando não há muita divergência entre os membros do grupo sobre a determinação dos parâmetros.

Na abordagem nível de saída, só é necessário haver consenso sobre as alternativas. Cada indivíduo aplica o método multicritério escolhido para o grupo à sua estrutura de preferência. Em seguida, os resultados individuais são agregados e o resultado da agregação irá representar a decisão do grupo. Durante a agregação, os indivíduos são considerados como sendo critérios, sendo atribuídos pesos a cada um deles que representam a importância de cada indivíduo dentro do grupo.

Segundo Dias & Clímaco (2005), nos métodos de agregação em nível de entrada, um operador  $f(.)$  agrega os as preferências individuais dos  $k$  decisores ( $T_k$ ) em um conjunto  $T$  de valores aceitos pelo grupo. Em seguida, um operador  $e(.)$  obtêm o resultado do método  $R$  compatível com  $T$ , figura 2.2

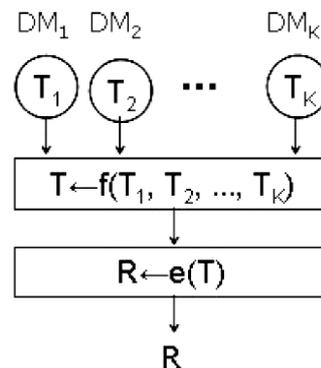


Figura 2.2 – Método de agregação em nível de entrada  
Fonte: DIAS & CLÍMACO, 2005

Nos métodos de agregação em nível de saída, um operador  $e(.)$  obtêm os resultados do método  $R$  compatível com o  $T_k$  de cada decisor. Em seguida, um operador  $h(.)$  agrega os resultados individuais  $R_k$  em um conjunto  $R$ , figura 2.3.

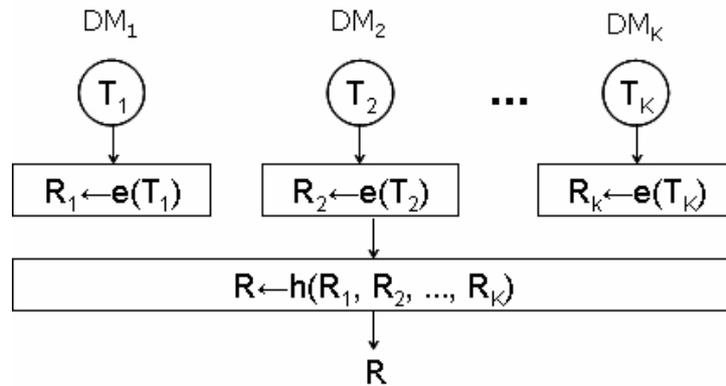


Figura 2.3 – Método de agregação em nível de saída

Fonte: DIAS & CLÍMACO, 2005

O ELECTRE-GD é um método que também pode ser citado como exemplo para apoiar questões relacionadas à agregação de preferências.

O ELECTRE-GD é uma extensão do ELECTRE III para uma decisão colaborativa em grupo, utilizando algoritmos genéricos para explorar as relações de sobreclassificação *fuzzy*, derivadas de idéias de concordância, discordância, veto e incomparabilidade do ELECTRE (MORAIS & ALMEIDA, 2006b).

Segundo Leyva-López & Fernández-González (2003) o ELECTRE-GD consiste de duas etapas:

- ✓ primeiro, é necessário propor uma forma para resolver possíveis conflitos entre a informação provinda dos *rankings* individuais e as relações de preferência *fuzzy*.
- ✓ em seguida, é definida uma relação de sobreclassificação *fuzzy* para o SDM, que possa ser explorada de forma racional de maneira a se obter um ranking final para o grupo.

A resolução de conflitos se dá da seguinte forma: cada membro do grupo é considerado como sendo um critério  $k$ . Cada par de ações  $(a, a')$ , deve ser comparado de acordo com o ponto de vista de cada decisor  $(k)$ . Para esta comparação, o SDM utiliza uma nova função, chamada de  $u_k(a_i)$ , que irá depender da posição relativa de  $a$  e  $a'$  no *ranking* do decisor  $k$  e dos valores  $\sigma_k(a, a')$  e  $\sigma_k(a', a)$ , que representa a relação binária do decisor  $k$  (LEYVA-LÓPEZ & FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, 2003).

Dois limiares  $(\alpha$  e  $\beta)$  foram introduzidos para refletir o sentimento do SDM na relação de preferência *fuzzy*, ou seja, na “**região nebulosa**” onde não se sabe a verdadeira preferência do decisor.

O resultado da etapa de resolução de conflitos é uma matriz chamada de “**matriz de preferência**”. A matriz de preferência é composta por um número de elementos que

contemplam a comparação entre um par de alternativas utilizando as relações binárias de preferência:

- ✓ preferência estrita ( $P$ ),
- ✓ preferência fraca ( $Q$ ),
- ✓ indiferença ( $I$ ) e
- ✓ incomparabilidade ( $R$ ).

A relação binária de preferência vai depender da nova função,  $u_k(a_i)$ , e das zonas obtidas na matriz de preferência. A definição da relação binária valorada é obtida utilizando o método ELECTRE III.

A definição da relação de sobreclassificação *fuzzy* para o grupo é obtida a partir da relação binária *fuzzy* ELECTRE-GD ( $\sigma G$ ). Esta relação depende do índice de concordância, do índice de discordância e ainda da validade da decisão com base no número de participantes.

## 2.7 Métodos utilizados como apoio ao trabalho

Neste trabalho, os métodos multicritérios de apoio a decisão são utilizados como auxílio aos modelos desenvolvidos, mais especificamente, empregando os métodos ELECTRE II, Copeland e ELECTRE TRI. O primeiro método, no seu processo de análise, decompõe o objetivo em critérios.

### 2.7.1 Método ELECTRE II

As comparações entre alternativas são feitas no último nível de decomposição e aos pares, através do estabelecimento de uma relação que acompanha as margens de preferência ditadas pelos agentes decisores, buscando uma ordenação do conjunto de alternativas potenciais, através do conceito de dominância. É um método não-compensatório que requer informações intercritério correspondente a relativa importância entre os vários objetivos, ou seja, pesos dos critérios.

Esses pesos podem ser decorrentes de cálculos técnicos ou de expressões de julgamento de valor. Assim, esses métodos favorecem as ações mais balanceadas, que possuem melhor *performance* média.

A abordagem fica mais clara quando estruturada na forma matricial. Em resumo, cada uma das alternativas  $a_n$  de solução é avaliada sob os aspectos  $C_n$  de critérios estabelecidos pelo processo decisório. Esses critérios de avaliação das alternativas representam os objetivos

característicos e qualitativos que possam ser traduzidos em medidas de desempenho das soluções de planejamento esperadas.

Assim, deve ocorrer uma comparação de cada alternativa com as demais, onde se estabelece e aponta as soluções mais atrativas (não-dominadas) e a escolha da solução mais “robusta”, que atende o conjunto de objetivos sob a delimitação dos critérios fixados na análise, como ilustrado na tabela 2.3. O resultado dessas comparações na matriz de avaliação gera uma outra matriz no método ELECTRE II que é denominada “**Matriz de Concordância**”.

Tabela 2.3 – Matriz critérios x alternativas

Critérios	Alternativas				
	$a_1$	$a_2$	$a_3$	...	$a_m$
$C_1$	$g_{11}$	$g_{12}$	$g_{13}$	...	$g_{1m}$
$C_2$	$g_{21}$	$g_{22}$	$g_{23}$	...	$g_{2m}$
$C_3$	$g_{31}$	$g_{32}$	$g_{33}$	...	$g_{3m}$
...	...	...	...	...	...
$C_n$	$g_{n1}$	$g_{n2}$	$g_{n3}$	...	$g_{nm}$

Sendo:

$C_1, C_2 \dots C_n$  = critérios;

$a_1, a_2 \dots a_m$  = alternativas;

$g_{11}, g_{21} \dots g_{nm}$  = avaliação das alternativas à luz dos critérios.

Já para o estabelecimento da matriz de avaliação de discordância no ELECTRE II ou “**Matriz de Discordância**”, inicialmente é definida uma escala numérica comum para todos os critérios, sendo que cada critério deve ter um intervalo de escala diferente. A escala é usada para comparar o desconforto causado entre o menor valor numérico (pior escolha) e o maior valor numérico (melhor escolha) de cada critério para cada par de alternativas. Essa escala comum é usada para medir o desconforto que o decisor sente ao preferir a alternativa  $a$  a alternativa  $b$ , considerando todos os critérios.

Uma vez definidas as matrizes de concordância e discordância, passa-se para uma segunda fase, fixando-se valores limites para  $p$  (índice mínimo de concordância) e  $q$  (índice máximo de discordância). Por meio desse procedimento, conhecido como “**filtragem**”, separam-se as alternativas não-dominadas que atendem os limites fixados para  $p$  e  $q$ , simultaneamente, mas sem a classificação dessas.

Os critérios para a fixação dos parâmetros  $p$  e  $q$ , com base na estrutura de preferências de cada problema multiobjetivo, são de livre escolha dos decisores que podem para isto fazer

uso da estatística ou da experiência pessoal. Os “**Valores Limites**” ( $p, q$ ), dados pelo decisor, variam entre zero e um, tal que a alternativa  $a$  é preferível a alternativa  $b$  se e somente se:

$$C(a,b) \geq p$$

$$D(a,b) \leq q$$

Sendo,  $p$  = índice mínimo de concordância;

$q$  = índice máximo de discordância.

O método ELECTRE II pela forma como as relações de sobreclassificação são exploradas, tem como meta ordenar ações da melhor para a pior, através dos conceitos de Índice de Concordância –  $C(a, b)$ , Índice de Discordância -  $D(a, b)$ , Limiar de Concordância –  $p$ , Limiar de Discordância –  $q$ , e Relações de Sobreclassificação. (VINCKE, 1992; ROY, 1996).

Segundo Vincke (1992), para cada critério é atribuído um peso  $p_j$  que cresce com a importância do critério, e para cada par ordenado  $(a,b)$  de ações é associado índices para a construção da relação de sobreclassificação. Assim, a concordância entre duas alternativas  $a$  e  $b$  é uma medida ponderada do número de critérios sob os quais a alternativa  $a$  é preferida ou equivalente à alternativa  $b$ . As expressões matemáticas para esses índices foram propostas por Olson (1996), a saber:

O índice de concordância é calculado pela seguinte expressão:

$$C_{(a,b)} = \frac{\sum W^+ + W^=}{\sum W^+ + W^= + W^-} \quad (2.1)$$

$W^+$  → pesos dos critérios sob os quais  $a > b$ ;

$W^=$  → pesos dos critérios sob os quais  $a = b$ ;

$W^-$  → pesos dos critérios sob os quais  $a < b$ ;

O índice de discordância é representado pela expressão:

$$D_{(a,b)} = \max \left[ \frac{Z_{bk} - Z_{ak}}{Z_k^* - Z_k^-} \right] \text{ para todo } k \text{ onde } b > a \quad (2.2)$$

$(b > a)$  → conjunto onde a alternativa  $b$  é preferida à  $a$ ;

$k$  → critérios sob os quais  $b > a$ ;

$Z_{bk}$	→ a avaliação da alternativa $b$ sob o critério $k$ ;
$Z_{ak}$	→ a avaliação da alternativa $i$ sob o critério $k$ ;
$Z_k^*$	→ melhor grau de avaliação obtido para o critério $k$ .
$Z_k^-$	→ pior grau de avaliação obtido para o critério $k$

Os índices de concordância são apresentados na forma de uma matriz de concordância, onde da expressão (2.1),  $C(a, b)$  representa o elemento da linha  $a$  e coluna  $b$ , ou seja, a satisfação que o decisor terá se preferir a alternativa  $a$  frente à alternativa  $b$ , sob certo critério.

Os índices de discordância da expressão (2.2),  $D(a, b)$  representam o desconforto sentido pelo decisor ao escolher a alternativa  $a$  frente à alternativa  $b$ .

Este método ainda explora dois níveis de sobreclassificação: uma forte ( $S^F$ ), (2.3) e uma fraca ( $S^f$ ), (2.4) e para isso considera alguns parâmetros ( $p^*$ ,  $q^*$ ,  $p^0$ ,  $q^0$ ) que servirão como fronteiras de concordância e discordância necessárias à identificação dos relacionamentos de dominância. Admitindo que  $0 < p^0 < p^* < 1$  e  $0 < q^0 < q^* < 1$  tem-se as seguintes relações sobreclassificação:

$$aS^F b \left\{ \begin{array}{l} C(a, b) \geq p^* \\ D(a, b) \leq q^* \\ \sum W^+ \geq \sum W^- \end{array} \right\} = \text{Sobreclassificação Forte } (S^F) \quad (2.3)$$

$$aS^f b \left\{ \begin{array}{l} C(a, b) \geq p^0 \\ D(a, b) \leq q^0 \\ \sum W^+ \geq \sum W^- \end{array} \right\} = \text{Sobreclassificação Fraca } (S^f) \quad (2.4)$$

O método ELECTRE II fornece uma ordenação completa das alternativas através da construção de duas pré-ordens completas, uma descendente, das melhores alternativas para as piores ( $Rank_S$ ) e outra, construída a partir das menos favoráveis em direção as melhores ( $Rank_W$ ). As alternativas são analisadas em relação aos ( $Rank_S$ ) e ( $Rank_W$ ) em várias interações.

Para as alternativas que passam nos dois testes é atribuída uma ordem, e estas são retiradas do processo de análise que se reinicia com as alternativas restantes, até que todas tenham sido ordenadas. A segunda pré-ordem é construída de maneira análoga, porém no

sentido ascendente, na qual é obtida a ordem reversa. A partir da ordem reversa, é realizada a ordenação fraca, considerando a seguinte fórmula proposta por Olson (1996):

$$Rank_w = 1 + \text{número de interações} - \text{ordem reversa da alternativa em questão.}$$

Segundo Vincke (1992), as duas pré-ordens obtidas, em geral, não são as mesmas e deve ser oferecido ao decisor uma pré-ordem mediana ( $Rank_M = (Rank_S + Rank_W) / 2$ ), sendo sua posição a identificação de sua ordem de preferência. De acordo com Gomes *et al.* (2004) os métodos multicritério são puras ferramentas de apoio a decisão e agregação de valor à informação. Eles servem essencialmente:

- ✓ para quantificar as soluções segundo os critérios definidos e escalonados,
- ✓ para priorizar as soluções em ordem crescente de valor,
- ✓ ou gerar um novo subconjunto de soluções de alternativas, por meio das preferências e consequências dos decisores.

Desse modo, esta metodologia multicritério apresentada, torna-se vital para apoiar os gerentes das concessionárias de água na tomada de decisões no que diz respeito à priorização das alternativas de redução de perdas a serem implantadas.

### 2.7.2 O método Copeland

O método Copeland pode ser considerado uma evolução dos tradicionais métodos Borda e Condorcet, na ordenação de alternativas. Para o uso do método de Borda o decisor deve ordenar as alternativas de acordo com as suas preferências. A alternativa mais preferida recebe um ponto, a segunda, dois pontos e assim sucessivamente. Os pontos atribuídos pelos decisores a cada alternativa são somados e a alternativa que tiver obtido a menor pontuação é a escolhida (DIAS & CLÍMACO, 2005). Todas as alternativas são ordenadas por ordem decrescente de pontuação (o que garante o respeito ao axioma da totalidade). No entanto, apesar de sua simplicidade e amplo uso de suas variações, o método de Borda não respeita um dos mais importantes axiomas de Arrow (ARROW & RAYNAUD, 1986): o da independência em relação às alternativas irrelevantes, ou seja, a posição final de duas alternativas não é independente em relação às suas classificações em relação às alternativas irrelevantes. Tal fato pode gerar distorções, com destaque para a extrema dependência dos resultados em referência ao conjunto de avaliação escolhido e a possibilidade de manipulações pouco honestas. Já o método de Condorcet, considerado precursor da atual escola francesa de

multicritério, trabalha com relações de superação. As alternativas são comparadas sempre duas a duas e constrói-se um grafo que expressa a relação entre elas (BOAVENTURA NETO, 2003). Através da representação da relação de preferência por um grafo a determinação de alternativas dominantes e dominadas (quando existem) fica bastante facilitada. Quanto existe uma e só uma alternativa dominante, ela é a escolhida. Este método, menos simples, tem a vantagem de impedir distorções ao fazer com que a posição relativa de duas alternativas independa de suas posições relativas a qualquer outra. No entanto, pode conduzir ao chamado “**paradoxo de Condorcet**”, ou situação de intransitividade. Isso acontece quando a alternativa  $a$  supera a alternativa  $b$ , que supera a  $c$ , que por sua vez supera a alternativa  $a$  (“**Tripleta de Condorcet**”).

Já o método de Copeland usa a mesma matriz de adjacência que representa o grafo do método de Condorcet. A partir dela calculam-se a soma das vitórias menos as derrotas, em uma votação por maioria simples. As alternativas são então ordenadas pelo resultado dessa soma. O método de Copeland alia a vantagem de sempre fornecer uma ordenação total (ao contrário do método de Condorcet) ao fato de dar o mesmo resultado de Condorcet, quando este não apresenta nenhum ciclo de intransitividade. Quando esses ciclos existem, o método de Copeland permite fazer a ordenação e mantém a ordenação das alternativas que não pertencem a nenhum ciclo de intransitividade. Apesar de computacionalmente mais exigente que Borda, quando há necessidade de estabelecer uma relação de pré-ordem, ou ordem *latus sensu*, este método fornece sempre uma resposta (ao contrário do método de Condorcet) e, apesar de não eliminar, reduz bastante a influência de alternativas irrelevantes (GOMES JUNIOR *et al.*, 2007). O método de Copeland pode ser considerado um compromisso entre as filosofias opostas de Borda e Condorcet, reunindo, dentro do possível, as vantagens dos dois (COPELAND, 1951). Por isso, foi a abordagem escolhida para uma das fases desse trabalho.

### 2.7.3 O método ELECTRE TRI

O ELECTRE TRI é um método multicritério que aloca alternativas em categorias prédefinidas. Essa alocação de uma alternativa  $a$  resulta da comparação de  $a$  com perfis definidos de limites das categorias (MOUSSEAU & SLOWINSKI, 1998; YU, 1992).

Dado um conjunto de índices de critérios  $\{g_1, \dots, g_i, \dots, g_m\}$  e um conjunto de índices de perfis  $\{b_1, \dots, b_h, \dots, b_p\}$ , definem-se  $(p+1)$  categorias, em que  $b_h$  representa o limite superior da categoria  $C_h$  e o limite inferior da categoria  $C_{h+1}$ ,  $h= 1, 2, \dots, p$ . Como ilustrado na figura 2.4.

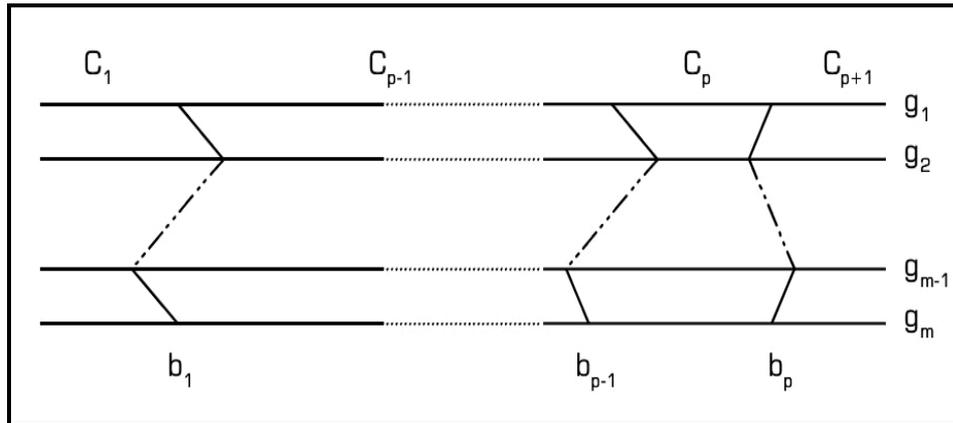


Figura 2.4 – Limites entre categorias  
 Fonte: MOUSSEAU & SLOWINSKI, 1998

Sendo:

- $C_1, C_{p-1}, C_p, C_{p+1}$  = classes;
- $b_1, b_{p-1}, b_p$  = limites entre as classes;
- $g_1, g_{m-1}, g_m$  = critérios.

As preferências para cada critério são definidas mediante um pseudo-critério, no qual os limiares de preferência e indiferença  $p_j[g(b_h)]$  e  $q_j[g(b_h)]$  constituem as informações intra-critérios. Assim,  $q_j[g(b_h)]$  especifica a maior diferença  $g_j(a) - g_j(b_h)$ , que preserva a indiferença entre  $a$  e  $b_h$  no critério  $g_j$  e  $p_j[g(b_h)]$  representam a menor diferença  $g_j(a) - g_j(b_h)$ , compatível com uma preferência de  $a$  no critério  $g_j$ . A estrutura de preferência com pseudo-critérios – modelo com duplo limiar  $p_j[g(b_h)]$  e  $q_j[g(b_h)]$ , evita uma passagem repentina entre a indiferença e a preferência estrita, existindo uma zona de hesitação, representada pela preferência fraca. O ELECTRE TRI constrói relações de sobreclassificação  $S$ , isto é, válida ou inválida a afirmação de que  $aSb_h$  e  $(b_hSa)$ , cujo significado é “ $a$  é ao menos tão bom quanto  $b_h$ ”.

Duas condições devem ser verificadas para validar a afirmação  $aSb_h$  :

- ✓ **Concordância:** para uma sobreclassificação  $aSb_h$  ser aceita, a maioria dos critérios deve estar a favor da afirmação  $aSb_h$  .
- ✓ **Não-discordância:** quando a condição de concordância não for atendida, nenhum dos critérios deve opor-se à afirmação  $aSb_h$ .

Na construção de  $S$  é utilizado um conjunto de limiares veto ( $v_1(b_h)$ ,  $v_2(b_h)$ , ...,  $v_m(b_h)$ ), usado no teste de discordância.  $v_j(b_h)$ , que representa a menor diferença  $g_j(b_h) - g_j(a)$ , incompatível com a afirmação  $aSb_h$ . Os índices de concordância parcial  $c_j(a,b)$ , concordância

$c(a,b)$  e discordância parcial  $d_j(a,b)$  são calculados pelas expressões (2.5), (2.6) e (2.7) a seguir.

$$c_j(a,b) = \begin{cases} 0 & \text{se } g_j(b_h) - g_j(a) \geq p_j(b_h) \\ 1 & \text{se } g_j(b_h) - g_j(a) \leq q_j(b_h) \\ \frac{p_j(b_h) + g_j(a) - g_j(b_h)}{p_j(b_h) - q_j(b_h)} & \text{noutros casos} \end{cases} \quad (2.5)$$

$$c(a,b) = \frac{\sum_{j \in F} k_j c_j(a,b_h)}{\sum_{j \in F} k_j} \quad (2.6)$$

$$d_j(a,b) = \begin{cases} 0 & \text{se } g_j(b_h) - g_j(a) \leq p_j(b_h) \\ 1 & \text{se } g_j(b_h) - g_j(a) > v_j(b_h) \\ \frac{g_j(b_h) + g_j(a) - p_j(b_h)}{v_j(b_h) - p_j(b_h)} & \text{noutros casos} \end{cases} \quad (2.7)$$

O ELECTRE TRI constrói um índice  $\sigma(a, b_h) \in [0,1]$  ( $\sigma(b_h, a)$ , respectivamente) que representa o grau de credibilidade da afirmação que  $aSb_h$ ,  $a \in A$ ,  $h \in B$  ( Expressão 2.8 ).

A afirmação  $aSb_h$  é considerada válida se  $\sigma(a, b_h) \geq \lambda$ .  $\lambda$  inicia um nível de corte tal que  $\lambda \in [0,5,1]$ . (MOUSSEAU *et al.*, 2001)

$$\sigma(a, b_h) = c(a, b_h) \cdot \prod_{j \in \bar{F}} \frac{1 - d_j(a, b_h)}{1 - c(a, b_h)} \quad (2.8)$$

$$\text{onde, } \bar{F} = \{j \in F : d_j(a, b_h) > c_j(a, b_h)\}$$

Após calcular os índices  $\rho(a_k, b_h)$  e  $\rho(b_h, a_k)$ , utiliza-se um nível de corte  $\lambda \in [0,5, 1]$  para determinar as relações de preferência através da condição:  $\rho(a_k, b_h) \geq \lambda \Rightarrow a_k S b_h$ . Assim, quanto maior o valor de  $\lambda$ , mais severas são as condições de subordinação de uma alternativa em relação às fronteiras. Assim com o ELECTRE TRI, utilizado essencialmente em problemas de classificação de alternativas, busca-se atribuir o desempenho das alternativas a uma das classes de desempenho pré-definidas (a figura 2.5 ilustra essa questão).

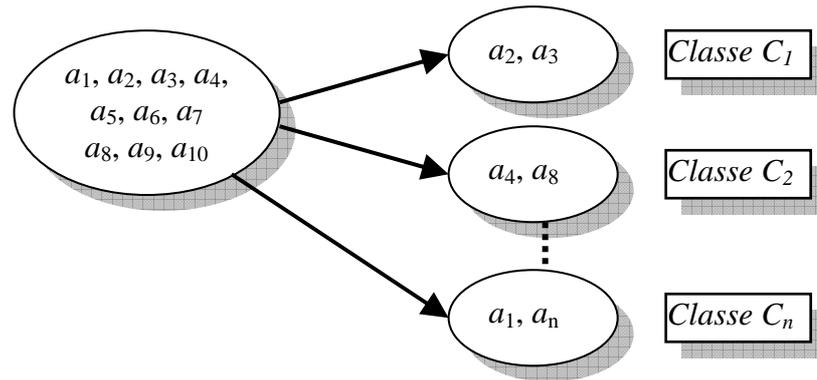


Figura 2.5 – Modelo de classificação pelo ELECTRE TRI  
 Fonte: MOUSSEAU & SLOWINSKI, 1998

Dois procedimentos de atribuições podem ser avaliados (MOUSSEAU *et al.*, 2002):

- ✓ **Procedimento pessimista:** comparar a sucessivamente com  $b_i$ , para  $i = p, p-1, \dots, 0, b_h$ , começando pelo primeiro perfil, tal que  $aSb_h$ , afirma  $a$  para categoria  $C_{h+1}$  ( $a \rightarrow C_{h+1}$ ).
- ✓ **Procedimento otimista:** comparar a sucessivamente com  $b_i$ , para  $i = 1, 2, \dots, p, b_h$ , começando pelo primeiro perfil, tal que “ $b_h$ , seja preferível a  $a$ ”, afirma  $a$  para a categoria  $C_h$  ( $a \rightarrow C_h$ ).

Sendo  $b_h$  o primeiro valor limite tal que  $a_kSb_h$ , atribui a alternativa  $a_k$  à classe  $C_{h+1}$ . Se  $b_{h-1}$  e  $b_h$  são os valores dos limites inferior e superior da classe  $C_h$ , esse procedimento atribui  $a_k$  à mais alta classe  $C_h$ , tal que  $a_k$  subordina o valor  $b_{h-1}$  ( $a_kSb_{h-1}$ ). Por outro lado, o procedimento otimista compara o desempenho de  $a_k$  sucessivamente a  $b_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, p$ . Sendo  $b_h$  o valor limite tal que  $b_hPa_k$ , deve-se atribuir  $a_k$  à classe  $C_h$ . Esse procedimento atribui  $a_k$  à classe  $C_h$  mais inferior, para a qual o valor do limite superior  $b_h$  é preferido a  $a_k$  ( $b_hPa_k$ ). A descrição e o entendimento do algoritmo de classificação ELECTRE TRI exigem um esforço adicional, principalmente pelo fato de que esse método está fundamentado em conceitos recentes da lógica nebulosa (*fuzzy logic*). Apesar disso, o entendimento e a modelagem pelo ELECTRE TRI dispensam a descrição pormenorizada do algoritmo de classificação (COSTA & FREITAS, 2005).

## 2.8 Considerações finais sobre este capítulo

Este capítulo apresentou os conceitos mais recorrentes da literatura sobre a gestão da manutenção e perdas em sistemas de abastecimento de água, destacando os tipos de

manutenção, perdas e as principais ações de gerenciamento e controle. Foi apresentado também que a tomada de decisão sobre onde agir para minimizar o problema é uma tarefa bastante complexa e que envolve múltiplos atores com diferentes perspectivas e várias ações potenciais para a solução, as quais devem ser analisadas em relação a critérios pré-estabelecidos. Para o tratamento dessa dificuldade, outros conceitos foram explicitados relativos à estruturação de problemas, os quais consideram uma abordagem qualitativa da tomada de decisão, baseada na visão construtivista, em que os atores vão formalizando o modelo no decorrer do processo, considerando o aprendizado gerado entre eles. Tal abordagem mostra-se adequada quando se está explorando problemas organizacionais, por facilitar a interação entre os decisores.

Posteriormente, foram apresentados os conceitos relativos ao apoio a decisão multicritério, destacando-se a relevância da sua utilização, suas problemáticas, a modelagem de preferências e os métodos multicritério utilizados como apoio ao trabalho.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo busca descrever o problema decisão em manutenção no saneamento básico, considerando as diversas visões e abordagens que são encontradas na literatura, de modo a abranger as variantes deste problema, bem como os métodos de resolução mais difundidos. Nesse contexto, é apresentada uma revisão bibliográfica que contempla os estudos desenvolvidos nesta área de pesquisa para decisão multicritério e os métodos e técnicas mais difundidos.

#### 3.1 Gestão da manutenção

Almeida & Campello De Souza (2001) apresentam que um modelo de gestão comumente está baseado na coordenação de atividades sustentadas nas ações de manutenções corretivas, preventivas e preditivas. A questão é como fazer a adoção de novas práticas de gestão baseadas na confiabilidade (RCM – *Reliability Centered Maintenance* – Manutenção Centrada na Confiabilidade) e baseadas na produção (TPM – *Total Productive Maintenance* – Manutenção Produtiva Total).

As técnicas de manutenção para reabilitação de redes no abastecimento de água estão implícitas nos programas de manutenção preventiva que podem ser derivadas de uma filosofia maior dentro das organizações que é o TPM (*Total Productive Maintenance*). Há um ponto relevante ao se adotar essa filosofia.

Apesar de vários recursos investidos para a implementação de um sistema de TPM, no início do processo o que se percebe na maioria dos casos, é que a organização como um todo (operadores, pessoal de manutenção, gerentes, administração superior) nem sempre está realmente inserido na filosofia TPM. A auditoria periódica de desempenho com respectivas avaliações e *feedback* do sistema devem ser adotados, pois ainda são os procedimentos mais positivos para a manutenção e melhoria da estrutura. A TPM é uma filosofia de trabalho excelente que realmente produz ganhos ao processo produtivo (RODRIGUES & HATAKEYAMA, 2006).

Segundo Cabral (2006) os objetivos da manutenção industrial devem estar ligados aos objetivos globais da empresa, já que a manutenção afeta a rentabilidade do processo produtivo tanto no volume e na qualidade da produção quanto nos seus custos. Por um lado, melhora o desempenho e a disponibilidade e por outro, pode elevar os custos de funcionamento. O

conjunto de ações destinadas a encontrar e situar o nível da manutenção num ponto de equilíbrio, constitui a gestão da manutenção.

Atualmente com o reconhecimento da importância de fatores como: segurança, proteção do meio ambiente, qualidade e motivação pessoal, a manutenção assume um papel que não justifica uma natureza exclusivamente econômica de negócio.

Administrar a manutenção na atualidade é uma tarefa complexa que alcança um grande conjunto de disciplinas. O gestor deve ter “*working knowledge*” sobre todas essas disciplinas, que são:

- ✓ Conceitos gerais de manutenção,
- ✓ Planejamento,
- ✓ Gestão de pessoal,
- ✓ Engenharia de máquinas,
- ✓ Lubrificação,
- ✓ Calibração,
- ✓ Gestão de materiais,
- ✓ Técnicas de manutenção e
- ✓ Informática.

Cuignet (2002) destaca três objetivos estratégicos a serem definidos para direcionar a gestão na manutenção, onde se podem aplicar técnicas e boas práticas de manutenção a fim de maximizar a eficiência, são eles:

- ✓ **Aumentar os volumes de produção**: esse objetivo pode ser monitorado através da taxa de rendimento sintético (TRS), que permite medir com precisão o desempenho de uma instalação, relativo aos volumes de produção e identificar as diferentes causas de perdas. Essa taxa está diretamente ligada aos índices de disponibilidade, qualidade e desempenho;
- ✓ **Reduzir as despesas de manutenção**: as despesas de manutenção englobam três grandes famílias de despesas: despesas com pessoal interno, despesas com pessoal externo e consumo de produtos industriais;
- ✓ **Melhorar a rentabilidade dos capitais investidos**: as maneiras de melhorar o retorno sobre os capitais investidos são:

- aumentar o resultado da exploração: mantendo despesas constantes e aumentando o volume de negócios, diminuindo despesas e mantendo volume de negócios ou aumentando volume de negócios e diminuindo despesas simultaneamente,
- diminuir os capitais investidos: diminuindo os estoques de produtos industriais, adiamento de investimento em capacidade através do aumento da taxa de retorno sobre o capital investido e adiamento de investimentos na manutenção através de melhor eficiência das atividades de manutenção.

### 3.1.1 Expectativas da gestão da manutenção

Uma boa gestão da manutenção cria um conjunto de expectativas que podem ser utilizadas em dois sentidos: primeiramente para argumentar com os gestores da empresa sobre os investimentos em manutenção e posteriormente para ajudar a estabelecer metas e objetivos práticos em resultado do esforço na manutenção. Decorrentes destas visões gerais surgem expectativas econômicas direcionadas a menores custos, menores volumes de estoques com peças reservas, economia de energia, enriquecimento da empresa e redução de perdas intangíveis. Ainda em decorrência, existem as expectativas de qualidade, pois a manutenção é um fator indissociável da qualidade. Não há garantia de qualidade sem que haja um bom apoio para a manutenção e a certificação da qualidade em uma empresa também passa pela auditoria do seu sistema de manutenção.

### 3.1.2 Gestão eficiente da manutenção para o abastecimento de água

De acordo com a Organização Mundial da Saúde (WHO – *World Health Organization*, 1994), uma concessionária de água para ser considerada eficiente e eficaz deve ser capaz de atender a certas condições:

- ✓ captar, transportar, tratar e distribuir volumes de água adequados para atender as demandas domésticas, comerciais e industriais da população (quantidade);
- ✓ o abastecimento de água a população deve atender aos padrões de potabilidade exigidos (qualidade);
- ✓ o abastecimento de água a população deve ser sem interrupção e a uma pressão adequada (continuidade);

- ✓ os responsáveis pela operação devem ser capazes de solucionar os problemas que venham a afetar o abastecimento de água (confiabilidade);
- ✓ o custo para alcançar as condições acima citadas devem se manter o mais baixo possível (custo).

Para atingir todas essas condições é necessário um adequado monitoramento do sistema como um todo. Devido à escassez de recursos financeiros, as empresas de saneamento procuram solucionar os problemas com ações locais e que não contemplam melhorias em longo prazo e na maioria das vezes têm caráter emergencial.

Os objetivos dos modernos métodos de controle de perdas de água incluem um aumento na eficiência do uso da água nas operações de serviços públicos e de avaliação econômica das perdas de água, adequada para apoiar as atividades de utilização da água e controle de perdas. Em maio de 2009 da *American Water Works Association* (AWWA) publicou a 3<sup>a</sup> Edição M36 - Manual para Auditoria da Água e Programas de Controle da perda, que procura incorporar novos procedimentos de gestão de perdas de água (AWWA, 2009).

Esses procedimentos são constituídos por, pelo menos, as seguintes ações:

- ✓ **Auditoria padrão de água e Balanço Hídrico**. Todas as agências devem quantificar o seu volume atual de perda de água aparente e real. Agências devem concluir a auditoria padrão de água para determinar o seu volume de perda de água aparente e real e o impacto do custo dessas perdas em operações de serviços públicos em nada menos do que intervalos anuais;
- ✓ **Valores econômicos**. A determinação do valor econômico de recuperação da perda real é baseada em custos evitados pelas agências de abastecimento;
- ✓ **Análise de Componentes**. Uma análise de componentes é exigida pelo menos uma vez a cada quatro anos e é definida como um meio para analisar as perdas aparentes e reais e as suas causas por quantidade e tipo. A meta é identificar volumes de perda de água, a causa da perda de água e o valor da perda de água para cada componente. O modelo de análise de componentes, em seguida, fornece as informações necessárias para apoiar a análise econômica e seleção de ferramentas de intervenção. Um exemplo é o *Breaks and Background Estimates Model* (BABE) que segrega vazamentos em três componentes: perdas invisíveis, vazamentos declarados e vazamentos não declarados;

- ✓ **Intervenções**. Agências devem reduzir as perdas reais na medida de custo-benefício. Agências são encorajadas desenvolver métodos e modelos específicos para reduzir as perdas do sistema;
- ✓ **Vazamentos de clientes**. Agências devem aconselhar os clientes sempre que se detecte a existência de vazamentos próximos ao medidor do cliente.

### 3.2 Métodos multicriteriais na gestão da manutenção e perdas de água

A análise multicritério é uma técnica utilizada para estruturar e analisar decisões complexas, que envolvem vários critérios, algumas delas conflitantes entre si, por isso ao avaliar ações têm consequências e impactos econômicos, sociais e ambientais (HAJKOWICZ, 2008). Hajkowicz & Collins (2007) identificaram oito áreas de aplicação da análise multicritério relacionados aos recursos hídricos:

- ✓ gestão de captação;
- ✓ gestão de águas subterrâneas;
- ✓ seleção de infra-estrutura;
- ✓ avaliação do projeto;
- ✓ distribuição de água;
- ✓ política da água e planejamento da oferta,
- ✓ gestão da qualidade da água e,
- ✓ gestão de áreas marinhas protegidas.

A análise multicritério também pode fornecer soluções para os problemas complexos de tomada de decisões relacionadas à água (SILVA *et al.*, 2010; MORAIS & ALMEIDA, 2006a; MORAIS & ALMEIDA, 2010). Para outros levantamentos sobre o assunto (OPRICOVIC, 2009; RAJU & KUMAR, 2006; RAJU *et al.*, 2000).

Muitas abordagens de tomada de decisão multicritério estão sendo desenvolvidas para resolver problemas inerentes ao processo de decisão (ALENCAR *et al.*, 2010; ALENCAR & ALMEIDA, 2008; SZAJUBOK *et al.*, 2005). Alguns desses modelos podem estar especificamente relacionados com a gestão de manutenção ou priorização de áreas para reduzir as perdas de água. Moraes & Almeida, (2010) apresentaram um modelo baseado no método PROMETHEE I para priorizar áreas críticas de perdas em uma cidade. Esta

abordagem considera critérios relacionados aos aspectos técnicos, a qualidade da água e aspectos sociais, o que levou à conclusão de que embora o modelo tenha sido aplicado a uma pequena cidade, se encaixa perfeitamente para problemas semelhantes envolvendo grandes cidades. Damaso & Garcia (2009) apresentaram uma abordagem sobre a disponibilidade dos sistemas e um modelo de envelhecimento no modo de espera, com base no processo de renovação generalizado, a ser usado para otimizar o agendamento de testes e manutenção preventiva.

De fato, na literatura são encontrados poucos modelos que abordam especificamente a questão da gestão de manutenção em redes de distribuição de água. Normalmente, os modelos encontrados trabalham a problemática de seleção. No entanto, nenhum procedimento foi encontrado relacionado às problemáticas de classificação e ordenação nos contextos da gestão da manutenção de redes explorados neste trabalho.

Nestes contextos, há também algumas dificuldades em alocar procedimentos de manutenção adequados para regiões específicas a fim de manter o sistema de distribuição de água, uma vez que existem muitos aspectos da avaliação e também há diferentes objetivos a serem alcançados. Como afirmado anteriormente, Morais & Almeida, (2010) propuseram uma priorização de áreas na rede de abastecimento de água para ajudar a gestão operacional de rede. No entanto, o resultado alcançado pelo PROMETHEE não era o suficiente para dar uma visão geral da rede de distribuição de água.

Em geral na literatura, o que se pode observar é que a maioria das soluções propostas relacionadas com redução de perdas, que não se baseiam em modelos estruturados ou métodos de apoio, são basicamente intuitivas e consideram a experiência dos técnicos responsáveis ou a conveniência com relação a aspectos políticos. A maior parte da literatura faz somente uma análise econômico-financeira, sem atentar para os aspectos subjetivos inerentes à escolha da alternativa de solução. Os trabalhos elaborados tratam a questão de forma muito qualitativa e não atendem adequadamente à dificuldade da decisão na classificação ou ordenação das alternativas disponíveis para a solução do problema. Morais & Almeida (2003) desenvolveram um estudo para a avaliação de investimentos associados à redução de perdas e desperdícios de água com o enfoque multicritério, abordando a problemática de escolha com o uso do método ELECTRE I. Posteriormente, o problema foi tratado baseado na problemática de ordenação, em que foram utilizados os métodos ELECTRE II e PROMETHEE II. Porém esses estudos consideraram apenas o ponto de vista

de um decisor, o gerente da concessionária da água. Assim, diante da necessidade de incorporar outros pontos de vista a esse problema, tais como os aspectos ambientais, políticos e sociais. Evoluindo este aspecto, Morais & Almeida (2006b) desenvolveram um modelo multicritério em grupo para o gerenciamento das perdas em sistemas de abastecimento de água.

Outros modelos que abordam o problema da gestão de recursos hídricos, o tratam de forma bastante holística, utilizando modelos multicritério, devido ao fato de que decisões nessa área geralmente envolvem alternativas e critérios e freqüentemente são caracterizadas por conseqüências incertas, interações complexas e participação de múltiplos decisores com interesses conflituosos.

Dessa forma, algumas abordagens formais que utilizam a metodologia de análise de decisão multicritério têm sido desenvolvidas para apoiar os decisores durante a análise de tal situação de tomada de decisão (HYDE *et al.*, 2004; CHOI & PARK, 2001; KHEIRELDIN & FAHMY, 2001).

Abu-Taleb & Mareschal (1995) abordaram a questão da crise de água na Jordânia. Apesar de todos os problemas econômicos e restrições de disponibilidade de água que os decisores enfrentavam, havia uma grande variedade de opções para o planejamento dos recursos hídricos do Oriente Médio. Os autores utilizaram o método multicritério PROMETHEE V para avaliar e selecionar as opções potenciais, de acordo com as limitações orçamentárias, para desenvolver o projeto da alternativa e os programas terem continuidade de maneira eficiente. Assuntos como proteção ambiental, demanda de água e gerenciamento do abastecimento podem ser explicitamente considerados usando-se o procedimento multicritério.

Zuffo (1998) propôs a incorporação de características ambientais, sociais, técnicas e econômicas, comumente utilizadas em estudos de planejamento ambiental de recursos hídricos, como critérios. Foram aplicadas cinco diferentes ferramentas de auxílio à tomada de decisão: ELECTRE II, PROMETHEE II, Programação por Compromisso (CP), Teoria dos Jogos Cooperativos (CGT) e o método Analítico Hierárquico (AHP). Os métodos multicriteriais foram aplicados a quatro cenários distintos de pesos para os critérios, obtidos mediante consulta por questionário estruturado a especialistas. Considerou-se viável a inserção dos critérios adotados para os métodos multicriteriais, o que possibilitou melhorar o processo de escolha das alternativas.

Kangas *et al.* (2001) utilizaram métodos *outranking* (ELECTRE III e PROMETHEE II) como ferramentas no planejamento estratégico dos recursos naturais. Eles compararam esses métodos *outranking* com as técnicas baseadas nas idéias da teoria da utilidade multiatributo (MAUT). Os métodos *outranking* foram os mais recomendados para essas situações, nas quais existe um número finito de alternativas discretas para serem escolhidas dentre outras, podendo ser grande o número de critérios e decisores. Uma vantagem importante dos métodos *outranking* é sua habilidade de tratar com informação ordinal e descritiva nos planos alternativos a serem avaliados.

Morais & Almeida (2006a) utilizaram o ELECTRE I para o gerenciamento estratégico de uma companhia de água estadual selecionando os projetos de abastecimento de água mais adequados a serem implantados à luz dos critérios estabelecidos.

### 3.3 Reabilitação de redes no abastecimento de água

Muitas cidades estão enfrentando a grande tarefa de reabilitar suas redes de água. Vinte por cento das redes de alimentação nas grandes áreas metropolitanas estão abaixo de áreas centrais e podem resultar em interrupções de tráfego. Outra situação crítica é também a situação em que tubulações em colapso podem resultar em indisponibilidade de água potável para hospitais e outros clientes importantes, indisponibilidade de água para combate a incêndios, ou por outro lado contaminação e danos consideráveis resultantes de inundações.

São necessárias previsões de confiabilidade, relacionadas com a manutenção preventiva e baseadas na vida útil das tubulações de água para a reabilitação pró-ativa de redes em estado crítico.

Essas previsões podem ser baseadas em:

- ✓ Modelos probabilísticos que dão uma medida da probabilidade de qualidade estrutural do sistema hidráulico e insuficiência de serviços para as áreas de abastecimento e tubulações ao longo dos anos;
- ✓ Avaliação das conseqüências quantitativas e qualitativas das várias opções de reabilitação ao longo do tempo;
- ✓ Priorização das ações de reabilitação ideais para cada segmento da tubulação que falhou;

- ✓ Agregação da qualidade da água e perfil de serviço da rede juntamente com uma avaliação das despesas de reabilitação necessárias;
- ✓ Avaliação da confiabilidade da rede em termos de pontos de conectividade a demanda e adequação de fluxo.

Como a maioria das informações sobre o estado geral de uma rede de distribuição é incompleta, faz-se necessário produzir previsões confiáveis, mesmo quando esses dados são insuficientes, como por exemplo, o fornecimento de curvas de probabilidade para auxiliar os gerentes de manutenção em suas previsões.

Os objetivos principais quando da aplicação de métodos de reabilitação de redes de água são:

- ✓ manter a capacidade hidráulica;
- ✓ evitar problemas futuros de qualidade da água;
- ✓ evitar vazamentos futuros.

O método mais comum de monitorar a operação é pelo registro do fluxo (vazão) de água ou da pressão através de medidores na rede. Se o fluxo ou a pressão por alguma razão se alterar, este pode ser um sinal de uma falha operacional, que pode resultar em um vazamento. Muitas cidades têm separado as redes em "**distritos de fuga**" (setorização de vazão), e têm instalado medidores de vazão e de pressão para monitorar cada distrito. Os dados registrados são verificados e as medidas necessárias são planejadas. Dados sobre vazamentos são coletados e avaliados para estimar a necessidade futura de reabilitação. Apesar de vários bons argumentos para a manutenção preventiva, ainda, em geral, a reabilitação das redes de água é baseada em reparos após falhas. Este método é chamado de manutenção corretiva, o "**método de ambulância**".

Nos últimos anos, vários municípios começaram a usar uma técnica chamada "**teoria cluster**", que diz que a maior parte das falhas nas tubulações vai ocorrer dentro de uma curta distância de fracassos anteriores (SUNDAHL, 1996). Quando várias falhas ocorrerem em uma área limitada, isto pode dar um forte indício para a realização de ações de reabilitação.

Nas últimas décadas, várias cidades já começaram a usar a informática e a automação para realizar registros de dados das redes de água em bases de dados. Estas bases contêm informações sobre as propriedades de rede, tais como material de tubulação, ano de construção e diâmetro, e as informações de falha (onde, quando, descrição falha, etc.) Por

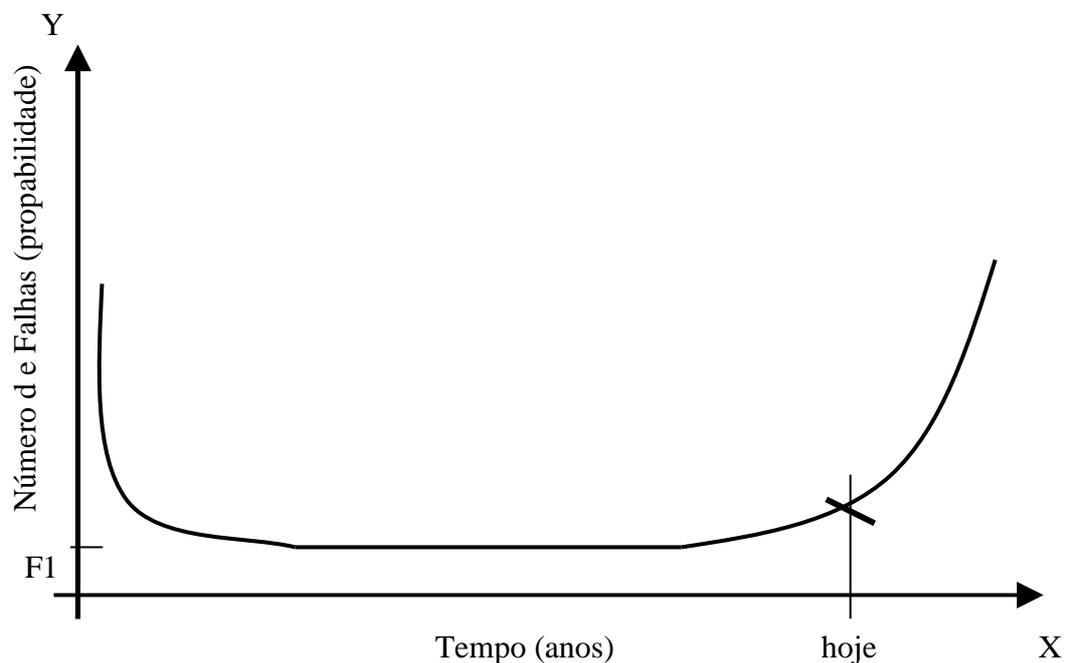
análises simples destes dados ou através do emprego de métodos estatísticos mais complexos, a informação é recolhida para mostrar diferenças na taxas de falhas para as características de diferentes tubulações.

O padrão esperado de uma falha em tubulações é um fator crítico para análises de confiabilidade. A resistência de um tubo *versus* a falha pode ser estimada por métodos determinísticos e probabilísticos. Há uma série de métodos que tem sido usado em vários projetos de pesquisa. Estes métodos podem ser classificados em quatro grupos:

- ✓ Modelagem estrutural tempo de falha de ferro fundido e tubos de ferro dúctil: Este método é baseado no cálculo de cargas mecânicas externas e medição de corrosão em amostras das tubulações. A variação de corrosão e da carga externa pode ser descrita com um modelo probabilístico.
- ✓ Processos de contagem e de técnicas de extrapolação. Estes métodos são baseados no número de quebras e vazamentos registrados dentro de um período de operação. Acumulado em gráficos de frequências de falhas para tubos individuais (ou grupos de tubos de propriedades diferentes), mostram a tendência da frequência falhas. Uma taxa de falha crescente motiva para uma taxa de recuperação ainda maior. Assim, a falha futura pode ser estimada por extrapolação das tendências obtidas a partir de dados históricos.
- ✓ Processo de desenvolvimento da falha. Usando um modelo estocástico que pode ser chamado de "**sobrevivência**", o número esperado de falhas durante um determinado período de tempo é computado. Estas funções de sobrevivência são baseadas nos mesmos dados do processo de contagem, e representam um método baseado no tempo até que uma falha possa ocorrer.
- ✓ Modelagem do ciclo de vida das redes baseada em pareceres de especialistas. A sobrevivência de tubos dentro de uma rede é modelada com funções de envelhecimento derivado de estimativas de especialistas sobre a vida útil das categorias de tubos. Enquanto, a vida útil de um tubo é tratada como uma variável aleatória com distribuição de densidade específica, não há nenhuma relação formal com a sua falha anterior ou taxa de fuga.

Os princípios citados acima, de análise e previsão dos modelos e sistemas para registros de água são bem estabelecidos. Alguns dos autores que apresentaram tais princípios podem ser citados: (DI FEDERICO *et al.*, 1998; HERZ, 1996; HERZ, 1998; PROST *et al.*, 1998; LE

GAUFFRE, 1997; MALANDAIN *et al.*, 1998; LEI & SAEGROV, 1998; ROSTUM *et al.*, 1997; ROSTUM *et al.*, 1999; SAEGROV, 1997). Contudo, apesar da teoria estar desenvolvida há muito tempo, até agora essas ferramentas só foram aplicadas a uma extensão muito limitada e a necessidade de um sistema completo para apoiar as decisões sobre as necessidades de reabilitação, incluindo os dados de custo, não foi ainda desenvolvida. A função de sobrevivência clássica para um grupo de tubulações de água é mostrada na figura 3.1. A parte inicial da curva mostra a "**mortalidade infantil**", que para tubos é um representativo de falha devido a fatores humanos na condição atual do tubo (defeitos de fabricação tendem a aparecer neste momento). A próxima fase da curva da banheira é geralmente baixa e constante e representa a probabilidade de ocorrência de falha (F1). Quando a falha ocorre, pode depender de uma variedade de fatores, tais como cargas excessivas inesperadas. Quando os tubos tendem para o fim de sua vida útil a taxa de falha aumenta. Este perfil de sobrevivência clássico é conhecido como "**Curva da Banheira**". A curva pode ser aplicada a um tubo individual, um grupo de tubos com características similares ou a toda uma rede de tubulação.



*Figura 3.1 – Curva da Banheira*  
*Fonte: CONROY, 1996*

Uma compreensão do princípio subjacente da "**Curva da Banheira**" (e as suas deficiências) é fundamental para perceber o potencial para reabilitação das redes de distribuição.

Com relação à figura 3.1, suponha que a taxa de falha é prevista para aumentar acima e além do nível de F1. Este aumento pode ter iniciado imediatamente ou acontecerá em um futuro próximo. A análise de dados históricos não permite identificar o nível de F1 de falha de rede a menos que se tenham todos os dados que remontam o momento em que os tubos foram colocados. Tubos de ferro fundido têm uma vida útil além dos 100 anos, mas o processo de degradação já poderia ter sido iniciado. A análise dos dados pode expirar em apenas 10 anos, o que pode não ser muito significativo em relação à vida de toda a rede. Quando uma tubulação nova é adicionada à rede ao longo de sua vida, juntamente com alguns tubos mais velhos que já foram reabilitados, a análise se torna ainda mais complexa.

As técnicas acima exigem da manutenção a aferição de grandes quantidades de amostras de tubulações ou condições de avaliação e medição de comprimentos de tubulações necessárias para reabilitação, tudo a um custo alto (CONROY, 1996).

Almeida & Campello de Souza (2001) destacam ainda argumentos e orientações sobre a implementação dos métodos de gestão, dos quais podem ser destacados:

- ✓ a visão de planejamento;
- ✓ fase de produção e controle da vida útil e,
- ✓ modelo de gerenciamento centrado na disponibilidade.

A questão da substituição para Almeida & Campello de Souza (2001) é também analisada como um problema de manutenção programada, onde se pretende prevenir que um nível indesejado de incidência de falhas comprometa o desempenho do sistema. Este nível está associado à probabilidade alta de falhas que pode ocorrer em determinados momentos da vida útil do equipamento. Neste contexto os autores destacam ainda a importância e a evolução dos métodos aplicáveis aos processos de gerenciamento e decisão na área de manutenção.

### **3.4 Considerações finais sobre este capítulo**

Como foram apresentadas neste capítulo, algumas técnicas são essenciais para a gestão eficiente da manutenção em sistemas de abastecimento de água e existem também vários modelos propostos para a agregação de preferências e prioridades, com o uso da informação cardinal das alternativas, dentre outros critérios. Entretanto, o que pode ser observado é que nenhum desses métodos avalia a questão da agregação de preferências para um grupo de

decisores de diferentes áreas que buscam atender as necessidades de gestão da manutenção para áreas prioritárias para redução de perdas de água e custos implícitos de manutenção.

A partir desses estudos e constatações, serão desenvolvidas duas propostas de modelos: o primeiro modelo fará a classificação das áreas da rede de distribuição, conforme as características quantitativas de áreas de medição e controle de fluxo de água, baseado em critérios definidos para identificar as áreas críticas da rede; o segundo modelo desenvolverá a orientação de alternativas preferidas por um grupo de decisores, as quais serão implementadas conforme as prioridades e características de cada classe gerada na classificação do primeiro modelo.

## **4 MODELO PARA CLASSIFICAÇÃO DE ÁREAS CRÍTICAS DE MANUTENÇÃO (MODELO-1)**

Para apoiar a gestão de manutenção de redes de água, frequentemente podem-se encontrar tecnologias que alimentam e controlam informações sobre o processo de manutenção. Um exemplo disso são os medidores de vazão das diversas áreas que constituem um sistema de abastecimento. Esses medidores podem ser acessados por um sistema automatizado ou até por rotinas programadas de leitura que visam informar os gestores de manutenção sobre os momentos para programação de manutenção preventiva.

Este primeiro modelo utiliza-se de informações quantitativas sobre áreas de medição de vazões e as principais características constituintes dessas áreas. Com base nisso é realizada a proposta de classificação dessas áreas por criticidade, as quais são determinadas por critérios relevantes para o decisor do setor de manutenção.

Nesta etapa o estudo são considerados:

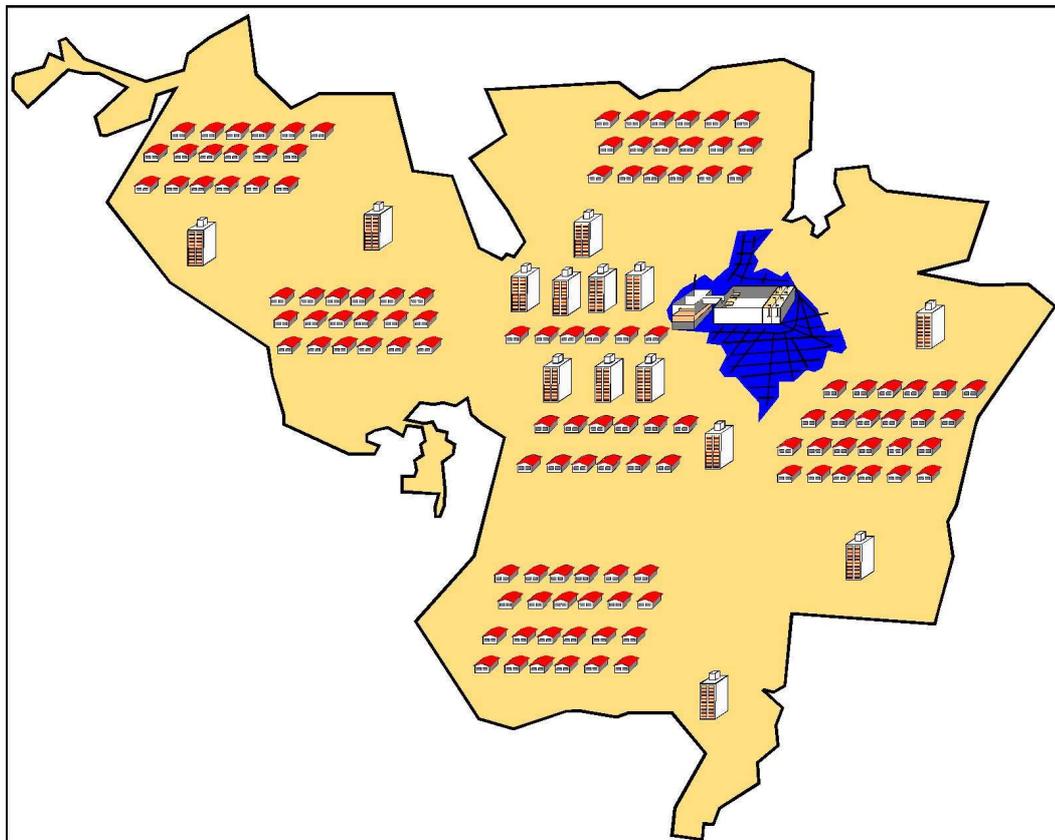
- ✓ alternativas e critérios relevantes envolvidos na classificação de áreas de vazão para execução de ações de manutenção,
- ✓ levantamento de dados através de um sistema informatizado,
- ✓ utilização do método ELECTRE-TRI para a classificação.

Assim, pretende-se que o decisor ao utilizar-se do modelo aqui proposto, tenha inicialmente uma visão de classes críticas de manutenção para atuação eficiente no combate às perdas de água, baseando-se nas informações coletadas nas áreas de medição de vazões do sistema.

### **4.1.1 Formação das áreas de medição de vazão em um sistema de abastecimento de água**

Ao se considerar um sistema de abastecimento de água dentro de uma cidade, encontra-se evidente uma taxa de crescimento constante das edificações e economias domiciliares, conforme ilustrado na figura 4.1. Esse crescimento exige a mobilização de investimentos para uma estrutura, a fim de atender a nova demanda. Várias são as características das áreas emergentes, desde a construção de residências com padrão mínimo para atender populações

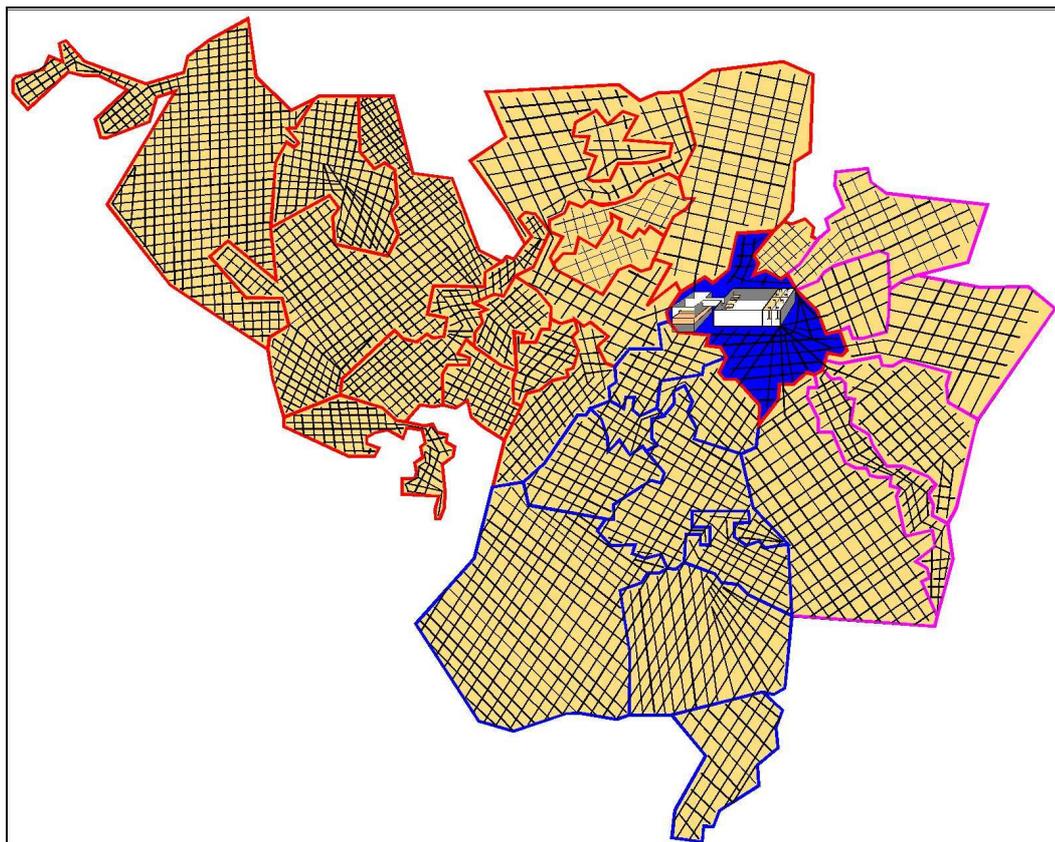
de baixa renda, residências de alto padrão, edifícios residenciais e até mesmo grandes áreas industriais.



*Figura 4.1 – Crescimento de edificações em uma cidade*

Para atender esse crescimento urbano, uma estrutura baseada em novas malhas de redes de distribuição de água, novos reservatórios, instalados estrategicamente para garantir o abastecimento em momentos críticos, e novos equipamentos tais como: conexões, válvulas de controle e medidores de vazão e pressão, é necessária.

Conforme ilustrado na figura 4.2, um sistema de abastecimento em expansão vai gradativamente preenchendo seus espaços disponíveis com construções, loteamentos e toda a infra-estrutura necessária para a sobrevivência da população que habita esses espaços. Várias malhas de tubulações vão sendo instaladas para atender então a nova demanda gerada pelo crescimento social e econômico dessas regiões em desenvolvimento.



*Figura 4.2 – Crescimento de estrutura em um sistema de abastecimento de água*

Assim, o sistema também deve ser organizado, com o objetivo de se administrar e conhecer as características de cada nova área criada pelo desenvolvimento.

A figura 4.3 apresenta uma das técnicas conhecidas de gerenciamento de informações sobre as áreas que se formam em um sistema de abastecimento de água: a divisão do sistema em áreas de medição de vazão.

Fracionar um problema pode muitas vezes, ser a melhor maneira de resolvê-lo. Então, essa técnica baseia-se na divisão das áreas urbanas, atendidas pelas malhas de abastecimento de água, com a instalação de medidores de vazão, a fim de se conhecer o consumo, normalmente expresso em metros cúbicos, de cada área que compõe o sistema.

Juntamente com os dados estatísticos estimados sobre as principais características dessas áreas, elas são nomeadas e apresentam informações aos decisores que influenciarão diretamente nas decisões sobre a criticidade e quais critérios devem nortear uma avaliação.

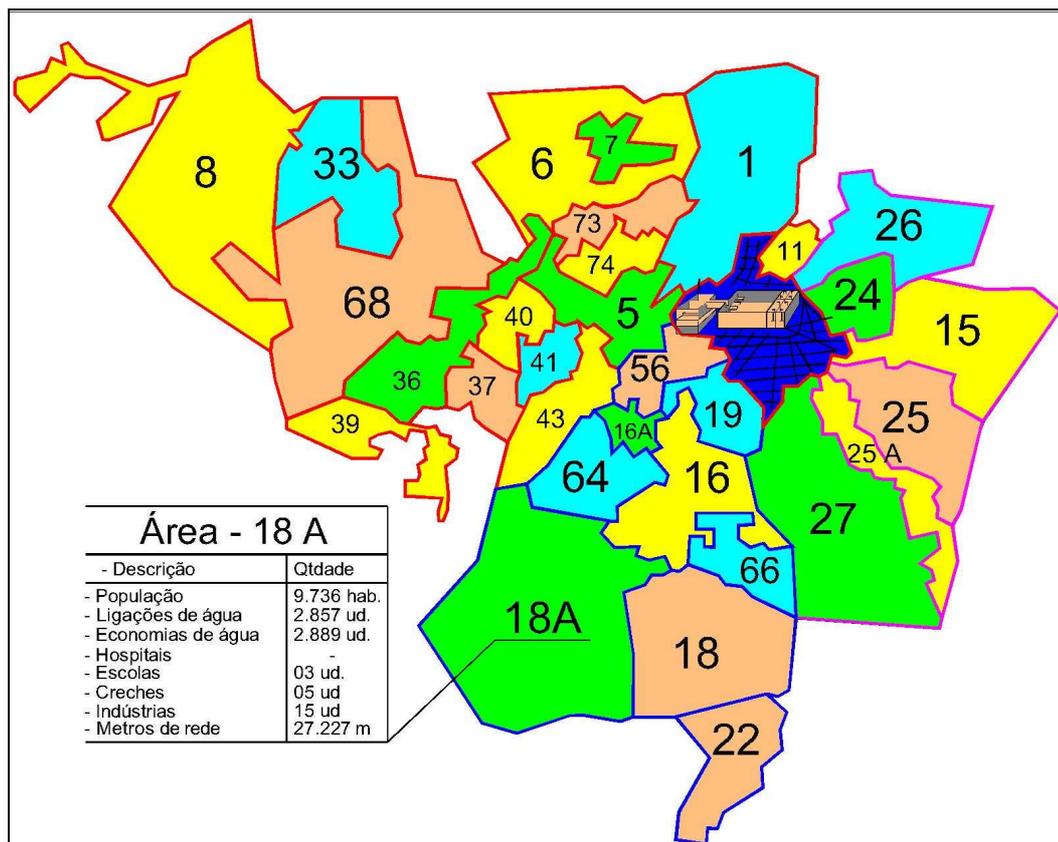


Figura 4.3 – Divisão das áreas de medição em um sistema de abastecimento de água

Com as informações sobre as áreas de medição, que atualmente estão sendo coletadas por meios automatizados, pois as empresas de abastecimento estão aderindo aos projetos de automação, os quais contribuem imediatamente para o controle e redução de perdas, podem-se aplicar novos modelos para a classificação dessas áreas.

O modelo-1, neste trabalho, aborda esse problema e propõe classificar as áreas conforme a sua criticidade, baseando-se em parâmetros coletados dentro das próprias áreas e que representam as características relevantes a serem levadas em consideração nas definições sobre os critérios e limites desejados.

O diagrama a seguir, figura 4.4, apresenta uma síntese do modelo, que trata da problemática de classificação com a estruturação e sequência de etapas, juntamente com a aplicação do método multicritério ELECTRE TRI. Nele é possível visualizar uma sequencialização de etapas e tarefas que devem ser cumpridas para a eficiência deste primeiro modelo proposto. Essas etapas representam uma forma de organizar e tornar mais eficiente o modelo, colocando as informações importantes numa sequência que torna mais clara a visão sobre ele. Cada uma delas é descrita nas seções seguintes e devem ser obedecidas quanto ao formato e características, que se baseiam no objetivo a que se deseja chegar. Nesta etapa do

trabalho o objetivo é classificar as zonas de medição de vazão, considerando sua criticidade com relação ao atendimento para ações de manutenção.

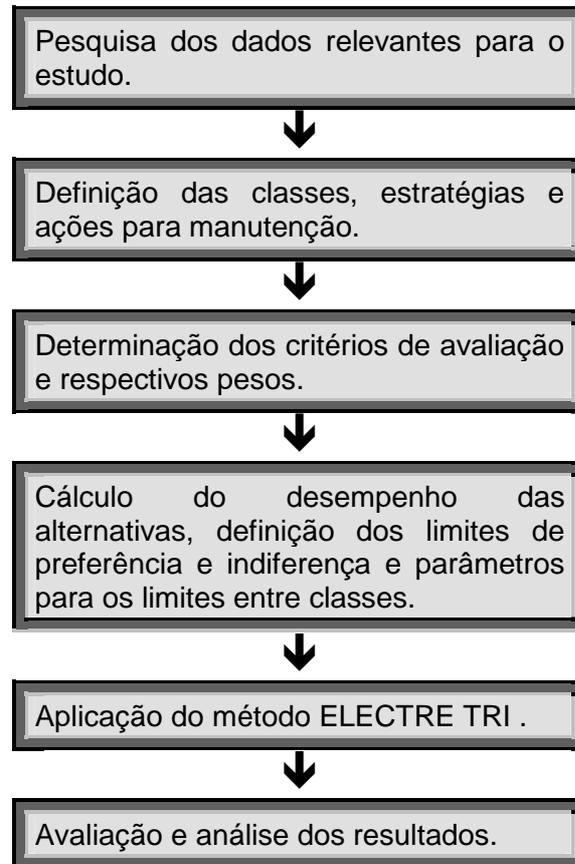


Figura 4.4 – Diagrama de síntese do Modelo-1

#### 4.1.2 Pesquisa dos dados relevantes para o estudo

Os dados que darão relevância ao modelo devem representar as características das áreas as quais se pretende classificar. Dados como população, importância econômica e social da região, número de ligações. Essas características serão definidas pelo decisor do setor de manutenção, pois ele é quem pode dar sugestões por conhecer o problema em sua especificidade. Então, os dados poderão ser aferidos de forma manual, através de levantamentos e medições programadas e periódicas ou ainda por um processo informatizado e automatizado de registro de dados sobre as redes de abastecimento de água, sendo este último o utilizado posteriormente na aplicação deste modelo.

#### 4.1.3 Definição das classes e prioridades

Estas definições devem prever que tipo de classes o decisor deseja explicitar. Por exemplo, classes onde estão concentradas as maiores perdas do sistema, ou ainda em que o

parâmetro analisado pode ser a concentração populacional ou concentração de entidades públicas de atendimento à saúde ou ainda, classes críticas que se destinam a promover a execução de alternativas mais eficientes para manutenção do sistema, como é o caso deste estudo.

#### 4.1.4 Determinação dos critérios e pesos

Definidos os tipos de classes e priorizações que se desejam, critérios para a avaliação das alternativas devem explicitar a preferência do decisor em atender determinados parâmetros mínimos de atendimento para que uma determinada área se enquadre na classe prevista e com prioridade previamente determinada.

#### 4.1.5 Cálculo do desempenho das alternativas e limites de classes

Para o cálculo do desempenho das alternativas, algumas técnicas estatísticas poderão ser utilizadas no intuito de representar a verdadeira importância do critério de análise. Em alguns casos a média e o desvio padrão poderão representar o que se deseja aferir em relação ao desempenho, em outros valores máximos e mínimos podem delimitar a faixa de atuação daquela informação para o cálculo do desempenho da alternativa em questão. É com base neste cálculo que a classificação será efetivada, pois cada alternativa apresenta características estatísticas que serão levadas em consideração para o enquadramento das alternativas nas suas respectivas classes. Nesta fase também se deve relacionar os limites entre as classes a que as alternativas estarão sujeitas para que o enquadramento seja feito sem nenhuma dúvida.

#### 4.1.6 Aplicação do método ELECTRE TRI e avaliação dos resultados

Para a aplicação do ELECTRE TRI foi utilizado o *software* ELECTRE TRI 2.0a, disponível na Lamsade (*Paris-Dauphine University, Paris, France*).

Com os resultados da classificação será possível encontrar duas situações características, resultantes dos procedimentos otimistas e pessimistas de classificação. Para cada situação deve-se avaliar aquela que melhor se adapte aos recursos disponíveis de manutenção da organização, ao qual o modelo seja aplicado. O próximo passo então, será a implementação das alternativas programadas de manutenção, conforme a classificação gerada pelo método ELECTRE TRI. Essas alternativas devem ser previamente ordenadas pelos setores envolvidos, representados por um grupo de decisores, para que, na ocorrência de anormalidade em uma classe de maior prioridade, por exemplo, elas sejam imediatamente

realizadas, conforme programação de manutenção emergencial. As classes que apresentam menor grau de prioridade demandarão de projetos e programações de médio e longo prazo, em que a resolução dos problemas eminentes não seja esquecida e que se possa em algum dado momento no tempo realizar a manutenção. Nesta etapa, contida neste primeiro modelo acontece a conexão entre os modelos propostos neste trabalho. As ordenações de alternativas para a implementação são desenvolvidas no Modelo-2 que será abordado no capítulo 5.

## 4.2 Aplicação do Modelo-1: classificação de áreas para manutenção

O problema foi estruturado com o objetivo em questão para aplicar a metodologia ELECTRE TRI em um cenário complexo com relativo número de alternativas e vários critérios ponderados para avaliação na problemática de classificação por priorização de áreas de medição de fluxo (vazão) para manutenção nas redes de distribuição de sistemas de abastecimento de água. A subjetividade, característica inerente do processo decisório, foi considerada para o estabelecimento dos pesos relativos dos critérios de avaliação fixados.

Num primeiro momento, faz-se a verificação de quais estratégias ou ações poderiam ser empregadas para atingir os objetivos separadamente e definem-se algumas alternativas que possam gerar o resultado esperado para os objetivos. Essas ações são elencadas com base em dados estatísticos do sistema e da experiência do decisor do setor de manutenção, tais como: dados cadastrais, volumes entregues ou distribuídos (total dos volumes de água disponibilizados nas redes de distribuição de uma cidade) e micromedidos (somatório dos volumes medidos em cada unidade consumidora), informações sobre vida útil dos equipamentos, quando deve ocorrer manutenção ou substituição, áreas com maiores índices de vazamentos e assistências, informações sobre as condições administrativo-financeiras, informações sobre o nível de automação do sistema, levantamento das pressões nas redes, etc.

A tabela 4.1 apresenta o levantamento de dados relevantes à aplicação do modelo em uma empresa de saneamento de uma cidade com aproximadamente 350 mil habitantes e atendimento a 100 mil ligações de água. Os dados foram listados a partir das alternativas (áreas de medição de vazão), onde serão executadas as ações de manutenção conforme a classificação realizada pelo método ELECTRE TRI. As áreas de medição de vazão foram divididas conforme características geográficas e de alimentação por ramais troncos. Na entrada e, em alguns casos, dentro de cada área delimitada foram instalados medidores eletromagnéticos de vazão que indicam o consumo de vazão de cada uma delas. Assim pode-se levantar o número de ligações, população, metros de rede e economias públicas, já que

essas áreas são grandes áreas delimitadas e estanques. A cada uma delas foi atribuído um nome de referência representado pelo *tag*: “**número da área + indicação FT (flow transmission) + o número do medidor**”. Por exemplo: 01FT06 = Área 01 + FT + medidor 06.

Neste estudo utilizou-se também uma pesquisa já elaborada anteriormente, o SME (Sistema de Monitoramento Especializado), que proporciona um monitoramento automatizado dessas áreas de medição de vazão (TROJAN & MARÇAL, 2006). Tal sistema de monitoramento foi elaborado com o objetivo de informar quais áreas são importantes no sentido de aplicar algum método de apoio à decisão visando à redução de perdas. O sistema apresentado utiliza as teorias de inteligência artificial para a sua construção e demonstra a capacidade computacional para o gerenciamento de manutenção no abastecimento público de água, que outrora, somente um especialista seria capaz de resolver. A figura 4.5 ilustra como o sistema faz o levantamento dos dados, os quais serão utilizados para a aplicação do método de apoio à decisão ELECTRE TRI no primeiro modelo.



Figura 4.5 – Sistema de Monitoramento Especializado, SME

Fonte: TROJAN & MARÇAL, 2006

No tocante, a obter resultados positivos no controle do índice de desperdício e na gestão da manutenção para as empresas de abastecimento de água, a integração de gestão dos processos e o emprego de um sistema especialista, o SME (Sistema de Monitoramento Especializado) dá suporte às decisões gerando informações que contribuem de forma significativa para o controle e para a redução dos índices de desperdício. Este procedimento

dinamiza com a automatização e o monitoramento integrados, o apoio às prontas decisões e intervenções no processo de forma eficiente e consistente. As anormalidades incipientes são sinalizadas e a análise da severidade está disponível na Interface Homem Máquina (IHM), agilizando e apoiando quaisquer prescrições e intercessões ou decisões posteriores.

Tabela 4.1 – Dados levantados para o estudo

$a_n$	Área (nome)	Ligações (unid.)	Produzido ( $m^3/mês$ )	Medido ( $m^3/mês$ )	Perdas (%)	Redes (m/lig)	Consumo (l/hab/dia)	Economias (unid.)	População (hab.)
$a_1$	01FT06	743	16.950	10.252	39,52	13,80	133,96	757	2.551
$a_2$	01FT08	2.738	76.105	41.232	37,31	15,06	109,21	3.734	12.584
$a_3$	07FT01	1.556	22.044	15.810	28,28	9,70	96,82	1.615	5.443
$a_4$	08FT01	1.102	28.352	13.892	51,00	12,68	129,02	1.065	3.589
$a_5$	11FT01	1.003	14.632	9.442	35,47	8,49	92,18	1.013	3.414
$a_6$	15FT01	2.341	38.531	24.975	35,18	11,41	96,83	2.551	8.597
$a_7$	16FT01	12.092	314.993	149.243	52,62	12,02	122,08	12.092	40.750
$a_8$	18FT01	2.857	53.044	27.223	48,68	9,53	93,20	2.889	9.736
$a_9$	18FT02	2.206	72.451	27.420	62,15	12,43	122,94	2.206	7.434
$a_{10}$	19FT01	2.337	58.352	26.244	49,30	10,80	102,36	2.536	8.546
$a_{11}$	25FT01	2.764	60.775	29.208	37,74	11,14	98,50	2.933	9.884
$a_{12}$	25FT02	1.857	29.043	16.845	42,00	9,46	87,28	1.909	6.433
$a_{13}$	26FT01	2.804	48.475	29.317	39,52	10,02	100,82	2.876	9.692
$a_{14}$	27FT01	2.259	34.789	21.901	37,05	9,69	93,73	2.311	7.788
$a_{15}$	32FT01	19.746	370.917	210.017	32,50	11,75	99,59	20.858	70.291
$a_{16}$	33FT01	1.540	50.631	18.572	63,32	11,66	118,21	1.554	5.237
$a_{17}$	36FT01	7.290	138.517	76.603	44,70	10,25	101,56	7.460	25.140
$a_{18}$	36FT02	4.310	64.128	44.148	31,16	10,25	101,31	4.310	14.525
$a_{19}$	37FT01	1.434	38.559	15.908	58,74	10,75	107,18	1.468	4.947
$a_{20}$	39FT01	727	16.064	8.978	44,11	10,98	115,63	768	2.588
$a_{21}$	39FT02	819	19.766	7.569	61,71	9,51	91,18	821	2.767
$a_{22}$	40FT01	612	16.982	6.185	63,58	9,86	97,24	629	2.120
$a_{23}$	41FT01	1.551	34.320	16.646	51,50	10,56	103,67	1.588	5.352
$a_{24}$	43FT01	2.491	76.668	28.693	62,57	11,25	107,22	2.647	8.920
$a_{25}$	49FT01	3.858	67.710	42.315	37,51	9,94	106,60	3.926	13.231
$a_{26}$	64FT01	1.814	40.704	30.033	26,21	15,94	131,15	2.265	7.633
$a_{27}$	68FT01	3.808	144.400	41.519	71,25	10,90	105,84	3.880	13.076
$a_{28}$	73FT01	1.578	29.574	10.133	35,30	11,47	114,47	1.653	5.571
$a_{29}$	74FT01	3.912	92.920	46.523	49,93	11,41	113,16	4.066	13.703
$a_{30}$	74FT02	2.334	63.346	27.390	56,76	11,37	112,27	2.413	8.132

Fonte: TROJAN & MARÇAL, 2006

Após levantamento dos dados é preciso elicitar a respeito das características necessárias das classes para posteriormente orientar alternativas que podem ser executadas ao se conhecer a prioridade da classe a qual essa alternativa pertence. Essas características são listadas com base na subjetividade do decisor no que tange aos pontos relevantes para cada critério.

Assim, conforme a tabela 4.2, chega-se a delimitação em cada classe que permitirá direcionar alternativas de manutenção, o número de classes e as respectivas criticidades, bem como o momento adequado para a intervenção. Neste contexto foram definidas 5 classes de criticidade: *Altíssima*, *Alta*, *Média*, *Baixa* e *Baixíssima*. As alternativas de ações para resolução dos problemas de cada classe serão estudadas e ordenadas no Modelo-2, que aborda a questão de decisões em grupo na definição dessas ações.

Tabela 4.2 – Tipo de criticidade e necessidade de intervenções por classes

Classes	Criticidade	Necessidade de Intervenção
$C_1$	Altíssima	Imediata
$C_2$	Alta	Moderada Alta
$C_3$	Média	Moderada Baixa
$C_4$	Baixa	Regular
$C_5$	Baixíssima	Baixa

O próximo passo então é definir sobre os critérios que levarão as alternativas ao processo de sobreclassificação. Neste estudo 6 (seis) critérios foram necessários para representar a situação em que cada alternativa se posicionaria para então aplicar o método ELECTRE TRI. Os critérios elencados definem um estudo sobre número de ligações, índice de perdas, volumes medidos para cada uma das áreas em questão e ainda o indicador de metros de rede por ligação, que ajuda na percepção de regiões populosas, tais como prédios de apartamentos e condomínios. Ainda será levada em consideração no critério 6, a localização de edificações destinadas à utilidade pública, tais como: hospitais, creches, escolas e poder público. A tabela 4.3 traz as informações descritas nesse parágrafo.

Tabela 4.3 – Definição dos critérios de avaliação e respectivos pesos

Critérios	Pesos	Itens considerados
$g_1$	8	Número de ligações
$g_2$	5	Volume medido
$g_3$	5	Porcentagem de perdas
$g_4$	5	Metros de redes por ligação
$g_5$	4	População
$g_6$	7	Número de Economias públicas

O algoritmo do ELECTRE TRI leva a consideração de pesos para os critérios e posteriormente, a avaliação das alternativas à luz de cada critério elencado. O método também necessita da consideração de escalas que possam representar cardinalmente a situação de uma alternativa frente aos diversos critérios.

Neste caso considerou-se a escala [0 a 100] e a ocorrência de uma situação dentro dos itens considerados em cada critério, recebe percentualmente o valor relativo ao número de itens elencados para a análise.

Posteriormente, cada critério terá um desempenho calculado e este resultado agregado, deverá ser considerado para o cálculo dos índices de concordância e não-discordância. Também as considerações sobre os limiares (*thresholds*) de indiferença e preferência devem ser definidas nessa etapa, com o objetivo de permitir algumas pequenas variações que são cobertas por esses limiares.

Para o cálculo do desempenho das alternativas foi considerado o valor do levantamento em cada alternativa em relação à média ou ao valor máximo da série estudada para os critérios considerados.

Quando um valor ultrapassa o valor médio é atribuído a ele o valor 100 e os valores abaixo da média são representados por uma relação entre o valor e a média multiplicados por 100. Este procedimento foi adotado para o cálculo do valor referente ao desempenho de cada alternativa frente ao critério analisado com o objetivo de eliminar as distorções provocadas quando uma área apresenta tamanho muito elevado, frente às outras com tamanhos médios. Assim, o desempenho das áreas é comparado com um valor médio, concentrando a criticidade em volta deste parâmetro e deixando as áreas com maiores possibilidades de comparação entre elas.

Nos critérios: perdas, redes e economias públicas, foi considerado o valor máximo ao invés da média, como um limite relevante para o cálculo. As tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 a seguir, apresentam o desenvolvimento dos passos descritos acima.

Os pesos adotados foram elicitados de um decisor, que definiu a prioridade com base nas suas preferências. O fato de não ter priorizado perdas, que é foco deste trabalho, justifica-se, pois o resultado aferido pela escolha do decisor apresenta-se compatível, conforme a tabela 5.2 na página 76, onde as perdas são consideradas em função do volume. As áreas que foram o foco do decisor, também apresentaram perdas elevadas em função do volume perdido.

Tabela 4.4 – Cálculo do desempenho das alternativas

$a_n$	Lig. (unid.)	Lig./ méd	Prod. ( $m^3/mês$ )	Med. ( $m^3/mês$ )	Med méd	Perdas (%)	Perda máx.	Redes ( $m/lig$ )	Redes máx	Consumo ( $l/hab/dia$ )	Econ. (unid.)	Popul. (hab.)	Popul./ méd
$a_1$	743	23	16.950	10.252	29	39,52	55	13,8	87	133,96	757	2.551	23
$a_2$	2.738	85	76.105	41.232	100	37,31	52	15,06	94	109,21	3.734	12.584	100
$a_3$	1.556	48	22.044	15.810	44	28,28	40	9,7	61	96,82	1.615	5.443	48
$a_4$	1.102	34	28.352	13.892	39	51,00	72	12,68	80	129,02	1.065	3.589	32
$a_5$	1.003	31	14.632	9.442	26	35,47	50	8,49	53	92,18	1.013	3.414	30
$a_6$	2.341	73	38.531	24.975	70	35,18	49	11,41	72	96,83	2.551	8.597	76
$a_7$	12.092	100	314.993	149.243	100	52,62	74	12,02	75	122,08	12.092	40.750	100
$a_8$	2.857	89	53.044	27.223	76	48,68	68	9,53	60	93,2	2.889	9.736	86
$a_9$	2.206	69	72.451	27.420	77	62,15	87	12,43	78	122,94	2.206	7.434	66
$a_{10}$	2.337	73	58.352	26.244	73	49,30	69	10,8	68	102,36	2.536	8.546	75
$a_{11}$	2.764	86	60.775	29.208	82	37,74	53	11,14	70	98,5	2.933	9.884	87
$a_{12}$	1.857	58	29.043	16.845	47	42,00	59	9,46	59	87,28	1.909	6.433	57
$a_{13}$	2.804	87	48.475	29.317	82	39,52	55	10,02	63	100,82	2.876	9.692	86
$a_{14}$	2.259	70	34.789	21.901	61	37,05	52	9,69	61	93,73	2.311	7.788	69
$a_{15}$	19.746	100	370.917	210.017	100	32,50	46	11,75	74	99,59	20.858	70.291	100
$a_{16}$	1.540	48	50.631	18.572	52	63,32	89	11,66	73	118,21	1.554	5.237	46
$a_{17}$	7.290	100	138.517	76.603	100	44,70	63	10,25	64	101,56	7.460	25.140	100
$a_{18}$	4.310	100	64.128	44.148	100	31,16	44	10,25	64	101,31	4.310	14.525	100
$a_{19}$	1.434	45	38.559	15.908	44	58,74	82	10,75	67	107,18	1.468	4.947	44
$a_{20}$	727	23	16.064	8.978	25	44,11	62	10,98	69	115,63	768	2.588	23
$a_{21}$	819	25	19.766	7.569	21	61,71	87	9,51	60	91,18	821	2.767	24
$a_{22}$	612	19	16.982	6.185	17	63,58	89	9,86	62	97,24	629	2.120	19
$a_{23}$	1.551	48	34.320	16.646	46	51,50	72	10,56	66	103,67	1.588	5.352	47
$a_{24}$	2.491	77	76.668	28.693	80	62,57	88	11,25	71	107,22	2.647	8.920	79
$a_{25}$	3.858	100	67.710	42.315	100	37,51	53	9,94	62	106,6	3.926	13.231	100
$a_{26}$	1.814	56	40.704	30.033	84	26,21	37	15,94	100	131,15	2.265	7.633	67
$a_{27}$	3.808	100	144.400	41.519	100	71,25	100	10,9	68	105,84	3.880	13.076	100
$a_{28}$	1.578	49	29.574	10.133	28	35,30	50	11,47	72	114,47	1.653	5.571	49
$a_{29}$	3.912	100	92.920	46.523	100	49,93	70	11,41	72	113,16	4.066	13.703	100
$a_{30}$	2.334	73	63.346	27.390	76	56,76	80	11,37	71	112,27	2.413	8.132	72
	3.216			35.808		71		16				11.322	
	Média			Média		Máx.		Max.				Média	

Tabela 4.5 – Desempenho das alternativas

Área	Ligações	Medido	Perdas	Redes	População	Econ. Pub.
	$g_1$	$g_2$	$g_3$	$g_4$	$g_5$	$g_6$
$a_1$ - 01FT06	23	29	55	87	23	50
$a_2$ - 01FT08	85	100	52	94	100	25
$a_3$ - 07FT01	48	44	40	61	48	25
$a_4$ - 08FT01	34	39	72	80	32	10
$a_5$ - 11FT01	31	26	50	53	30	10
$a_6$ - 15FT01	73	70	49	72	76	25
$a_7$ - 16FT01	100	100	74	75	100	100
$a_8$ - 18FT01	89	76	68	60	86	30
$a_9$ - 18FT02	69	77	87	78	66	25
$a_{10}$ - 19FT01	73	73	69	68	75	25
$a_{11}$ - 25FT01	86	82	53	70	87	35
$a_{12}$ - 25FT02	58	47	59	59	57	15
$a_{13}$ - 26FT01	87	82	55	63	86	100
$a_{14}$ - 27FT01	70	61	52	61	69	100
$a_{15}$ - 32FT01	100	100	46	74	100	50
$a_{16}$ - 33FT01	48	52	89	73	46	15
$a_{17}$ - 36FT01	100	100	63	64	100	50
$a_{18}$ - 36FT02	100	100	44	64	100	30
$a_{19}$ - 37FT01	45	44	82	67	44	25
$a_{20}$ - 39FT01	23	25	62	69	23	25
$a_{21}$ - 39FT02	25	21	87	60	24	25
$a_{22}$ - 40FT01	19	17	89	62	19	15
$a_{23}$ - 41FT01	48	46	72	66	47	25
$a_{24}$ - 43FT01	77	80	88	71	79	15
$a_{25}$ - 49FT01	100	100	53	62	100	20
$a_{26}$ - 64FT01	56	84	37	100	67	20
$a_{27}$ - 68FT01	100	100	100	68	100	25
$a_{28}$ - 73FT01	49	28	50	72	49	20
$a_{29}$ - 74FT01	100	100	70	72	100	45
$a_{30}$ - 74FT02	73	76	80	71	72	40

Tabela 4.6 – Limites de indiferença e preferência

Fronteiras	Indiferença ( $q$ )	Preferência ( $p$ )
$b_1$	4	8
$b_2$	4	8
$b_3$	4	8
$b_4$	4	8

Também parâmetros que definem as regiões limítrofes entre as classes são definidos nesta etapa, conforme tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Parâmetros para os limites entre as classes

Classes	Prioridade	Fronteira	$g_1$	$g_2$	$g_3$	$g_4$	$g_5$	$g_6$
$C_1$	Altíssima	$b_1$	90	80	90	90	10	90
$C_2$	Alta	$b_2$	65	55	65	60	30	70
$C_3$	Média	$b_3$	45	40	40	40	55	50
$C_4$	Baixa	$b_4$	25	20	20	10	70	20
$C_5$	Baixíssima	-	-	-	-	-	-	-

De forma sucinta, o limite de indiferença  $q_j$  especifica a maior diferença entre o valor de uma alternativa  $a_k$  (denotado por  $g_j(a_k)$ ) e o valor-padrão de uma fronteira  $b_h$  (denotado por  $g_j(b_h)$ ) que preserva a indiferença entre  $a_k$  e  $b_h$  ( $a_k I_j b_h$ ). Por outro lado, o limite de preferência  $p_j$  especifica a menor diferença entre o valor de uma alternativa  $a_k$  denotado por  $g_j(a_k)$  e o valor padrão de uma fronteira  $b_h$  (denotado por  $g_j(b_h)$ ) que estabelece a preferência forte entre  $a_k$  e  $b_h$  ( $a_k P_j b_h$ ). A relação  $a_k Q_j b_h$  representa uma situação intermediária de hesitação entre a indiferença e a preferência, denominada preferência fraca. O conjunto de expressões (4.1) descreve essas relações, mas somente uma delas pode ocorrer.

$$\left\{ \begin{array}{l} a_k I_j b_h \Leftrightarrow |g(a_k) - g(b_h)| \leq q_j \\ a_k Q_j b_h \Leftrightarrow g(b_h) + p_j \geq g(a_k) > g(b_h) + q_j \\ a_k P_j b_h \Leftrightarrow |g(a_k) - g(b_h)| > p_j \end{array} \right. \quad (4.1)$$

Ilustrativamente, para demonstrar uma das etapas do cálculo do método ELECTRE TRI, sejam considerados, à luz do critério  $g_4$ , o valor da alternativa  $a_8$ , o valor-padrão da fronteira  $b_2$ , o limite de indiferença e o limite de preferência, denotados respectivamente por:  $g_4(a_8) = 60$ ;  $g_4(b_2) = 60$ ;  $q_4 = 4$  e  $p_4 = 8$ . Considerando as relações supracitadas e os respectivos valores, conclui-se que a alternativa  $a_8$  é preferível à fronteira  $b_2$  ( $a_8 P_4 b_2$ ) à luz do critério  $g_4$ . Procedimento análogo pode ser realizado para os demais critérios, alternativas e fronteiras.

$$a_8 I_4 b_2 = |60 - 60| \leq 4, \text{ Verdadeiro}$$

$$a_8 Q_4 b_2 = 60 + 8 \geq 60 > 60 + 4, \text{ Falso}$$

$$a_8 P_4 b_2 = |60 - 60| > 8, \text{ Falso}$$

Assim, a alternativa  $a_8$  ao ser analisada pelo critério  $g_4$  é Indiferente aos limites da classe  $g_4(b_2)$  e conseqüentemente poderá ser incluída nesta classe se cálculo feito com os demais critérios confirmarem essa tendência. Para a atribuição das alternativas a uma das categorias de classificação, considerou-se, neste experimento, o nível de corte  $\lambda = 0,76$ , valor que confere nível de rigor intermediário à análise (pois  $\lambda \in [0.5; 1]$ ).

Com os dados tabulados e informações elicítadas, o próximo passo se resume na aplicação do método ELECTRE TRI para a aferição dos resultados referentes à classificação das áreas. A tabela 4.8 e o diagrama da figura 4.6, demonstram a que resultados este estudo chegou e a tabela 4.9 as comparações realizadas, apresentando finalmente a classificação conforme os critérios elencados e as alternativas possíveis. Para a aplicação do ELECTRE TRI foi utilizado o *software* ELECTRE TRI 2.0a, disponível na Lamsade (*Paris-Dauphine University, Paris, France*).

Tabela 4.8 – Resultado da Classificação

Classes	Criticidade	Atribuição PESSIMISTA	Atribuição OTIMISTA
C <sub>1</sub>	Altíssima	-	16FT01, 32FT01, 36FT01, 36FT02, 49FT01, 68FT01, 74FT01
C <sub>2</sub>	Alta	16FT01	01FT08, 08FT01, 15FT01, 18FT01, 18FT02, 19FT01, 25FT01, 26FT01, 27FT01, 33FT01, 37FT01, 40FT01, 43FT01, 64FT01, 74FT02
C <sub>3</sub>	Média	07FT01, 08FT01, 25FT02, 26FT01, 27FT01, 32FT01, 33FT01, 36FT01, 37FT01, 41FT01, 74FT01	01FT06, 07FT01, 11FT01, 25FT02, 39FT01, 39FT02, 41FT01, 73FT01
C <sub>4</sub>	Baixa	01FT06, 01FT08, 11FT01, 15FT01, 18FT01, 18FT02, 19FT01, 25FT01, 36FT02, 39FT01, 39FT02, 40FT01, 43FT01, 49FT01, 64FT01, 68FT01, 73FT01, 74FT02	-
C <sub>5</sub>	Baixíssima	-	-

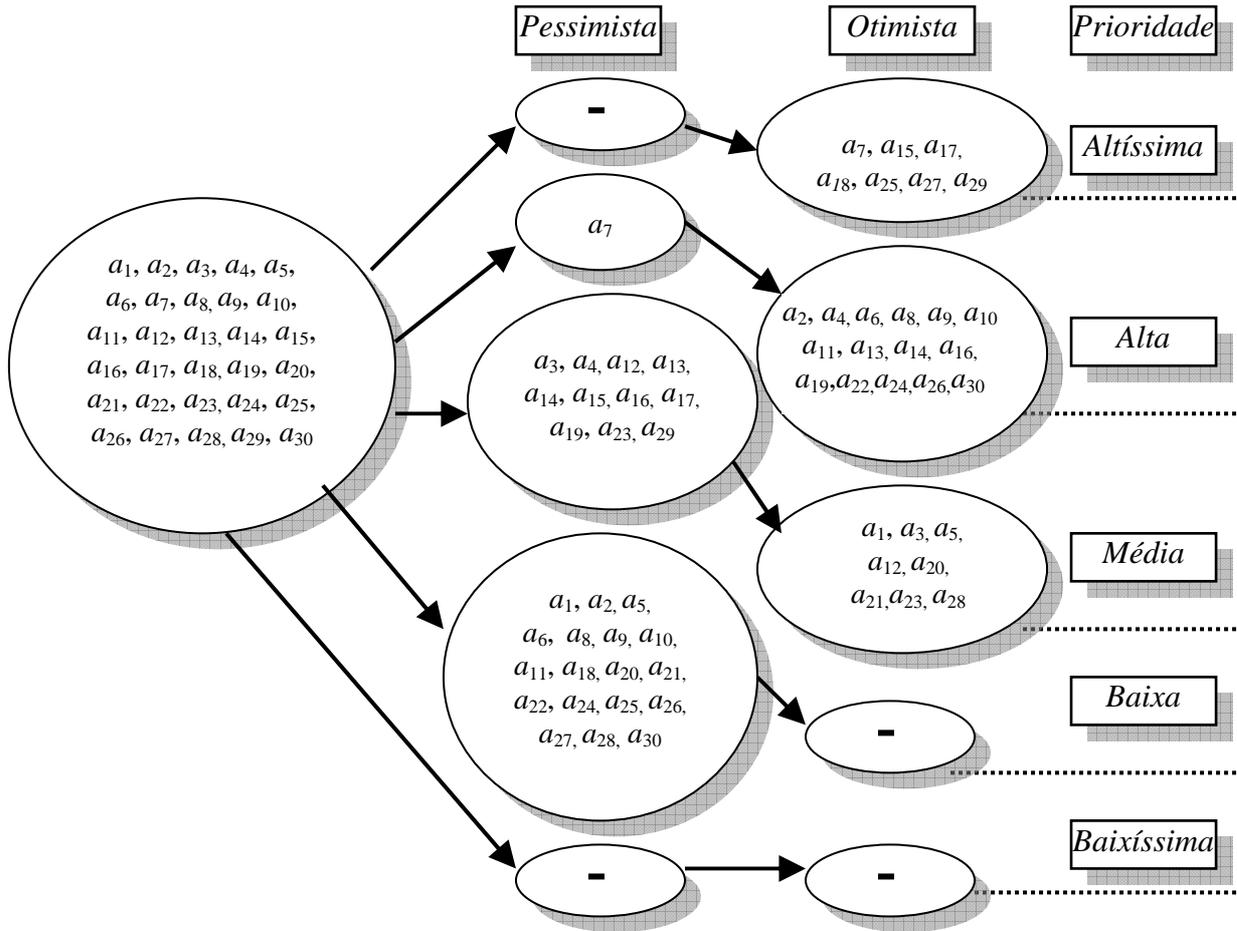


Figura 4.6 – Resultado da Classificação pelo ELECTRE TRI

A tabela 4.9 apresenta um resumo do estudo das comparações realizadas, identificando as situações de incomparabilidade e a tabela 4.8 demonstra o resultado tabulado com os nomes das áreas, que representam as alternativas, o que facilita a análise sobre os pontos de ação pelo reconhecimento das características das áreas através da sua designação.

Os nomes em questão representam áreas de medição de vazão pela nomenclatura (Número da área + FT (flow transmitter) + número do equipamento de medição).



Tabela 4.9 – Resumo das comparações

Comparison to Profile				
	Pr04	Pr03	Pr02	Pr01
A0001	>	R	<	<
A0002	>	R	R	<
A0003	>	I	<	<
A0004	>	>	R	<
A0005	>	R	<	<
A0006	>	R	R	<
A0007	>	>	>	R
A0008	>	R	R	<
A0009	>	R	R	<
A0010	>	R	R	<
A0011	>	R	R	<
A0012	>	>	<	<
A0013	>	>	R	<
A0014	>	>	R	<
A0015	>	>	R	R
A0016	>	>	R	<
A0017	>	>	R	R
A0018	>	R	R	R
A0019	>	>	R	<
A0020	>	R	<	<
A0021	>	R	<	<
A0022	>	R	R	<
A0023	>	>	<	<
A0024	>	R	R	<
A0025	>	R	R	R
A0026	>	R	R	<
A0027	>	R	R	R
A0028	>	R	<	<
A0029	>	>	R	R
A0030	>	R	R	<

Fonte: Software Electre TRI 2.0a, 2010 (Lamsade)

Sendo:

**R** = incomparabilidade;

> = preferência;

< = não-preferência;

**I** = indiferença;

Na tabela 4.10 é possível visualizar a estatística dos resultados do estudo, apresentada em percentagens de ocorrências em cada classe.

Tabela 4.10 – Estatística da Classificação

Classes	Criticidade	Atribuição PESSIMISTA	Atribuição OTIMISTA
C <sub>1</sub>	Altíssima	0% (0 de 30)	23% (7 de 30)
C <sub>2</sub>	Alta	3% (1 de 30)	50% (15 de 30)
C <sub>3</sub>	Média	37% (11 de 30)	27% (8 de 30)
C <sub>4</sub>	Baixa	60% (18 de 30)	0% (0 de 30)
C <sub>5</sub>	Baixíssima	0% (0 de 30)	0% (0 de 30)

### 4.3 Considerações sobre os resultados do Modelo-1

Os resultados apresentados no estudo, decorrentes da aplicação do primeiro modelo proposto para a problemática de classificação, mostram um cenário com algumas áreas posicionadas nas classes mais críticas e a maioria das alternativas alocadas nas classes intermediárias, o que denota certo equilíbrio no sistema de manutenção. Na classe Altíssima, por exemplo, onde foram classificadas as alternativas que necessitavam de intervenção imediata surgiu o posicionamento da alternativa  $a_7$ , que se analisada pela tabela 4.5, aponta características relevantes nos critérios  $g_1 = 100$ ;  $g_2 = 100$ ;  $g_5 = 100$  e  $g_6 = 100$ , os quais possuem os maiores pesos definidos para a classificação. Isso denota a preferência em atender as classes de maior prioridade.

O fato da maioria das alternativas ficarem concentradas nas classes com criticidade mais baixas ou medianas denota a necessidade de planejamento e ações mais estruturadas e de longo prazo para resolver os problemas eminentes nas redes de distribuição. Também, as classes inferiores apontam coerência, pois as áreas alocadas nessas classes apresentam um desempenho inferior nos critérios com pesos mais altos. Essa classificação demonstra que essas áreas podem ser irrelevantes do ponto de vista da priorização de intervenções, porém também necessitam de planejamento de longo prazo.

Ao analisar os resultados do Modelo-1 de classificação, pode-se perceber uma delimitação, com concentrações das áreas importantes em relação ao que o decisor definiu como preferencial. As demais áreas que apresentam indiferenças ou incomparabilidades em relação às classes a que pertencem são classificadas naturalmente, conforme o desempenho nos diferentes critérios.

Algumas incomparabilidades podem ser detectadas quando as alternativas não puderam ser analisadas, visto que os critérios que definem a comparação não apresentam nenhuma sobreclassificação em relação aos parâmetros ou preferências elencados pelo decisor. Por esse motivo o procedimento otimista foi adotado. O procedimento otimista (ou disjuntivo) atribui a  $C_h$  a categoria mais baixa para o qual a parte superior do perfil  $b_h$  é preferível a  $a$ . Quando se utiliza este procedimento, uma alternativa pode ser atribuída a categoria  $C_h$  quando  $g_j(b_h)$  excede  $g_j(a)$  (em algum limiar) pelo menos em um critério (regra disjuntiva) (TROJAN & MORAIS, 2012).

## 5 MODELO PARA ORDENAÇÃO EM GRUPO DAS ALTERNATIVAS DE MANUTENÇÃO (MODELO-2)

Com o intuito de apoiar as decisões sobre qual alternativa de manutenção implantar por zona de medição, classificadas pelo Modelo-1, apresentado anteriormente, foi desenvolvido o Modelo-2. Este modelo trata a problemática de ordenação em grupo, pois leva em consideração os pontos de vista de diferentes atores envolvidos no processo, a fim de priorizar as alternativas de manutenção. Esses modelos propostos de classificação das áreas de uma rede de distribuição de água e priorização em grupo das alternativas de manutenção para redução de perdas e custo são as contribuições deste trabalho. A figura 5.1 demonstra como os modelos se conectam em sua sequencialização:

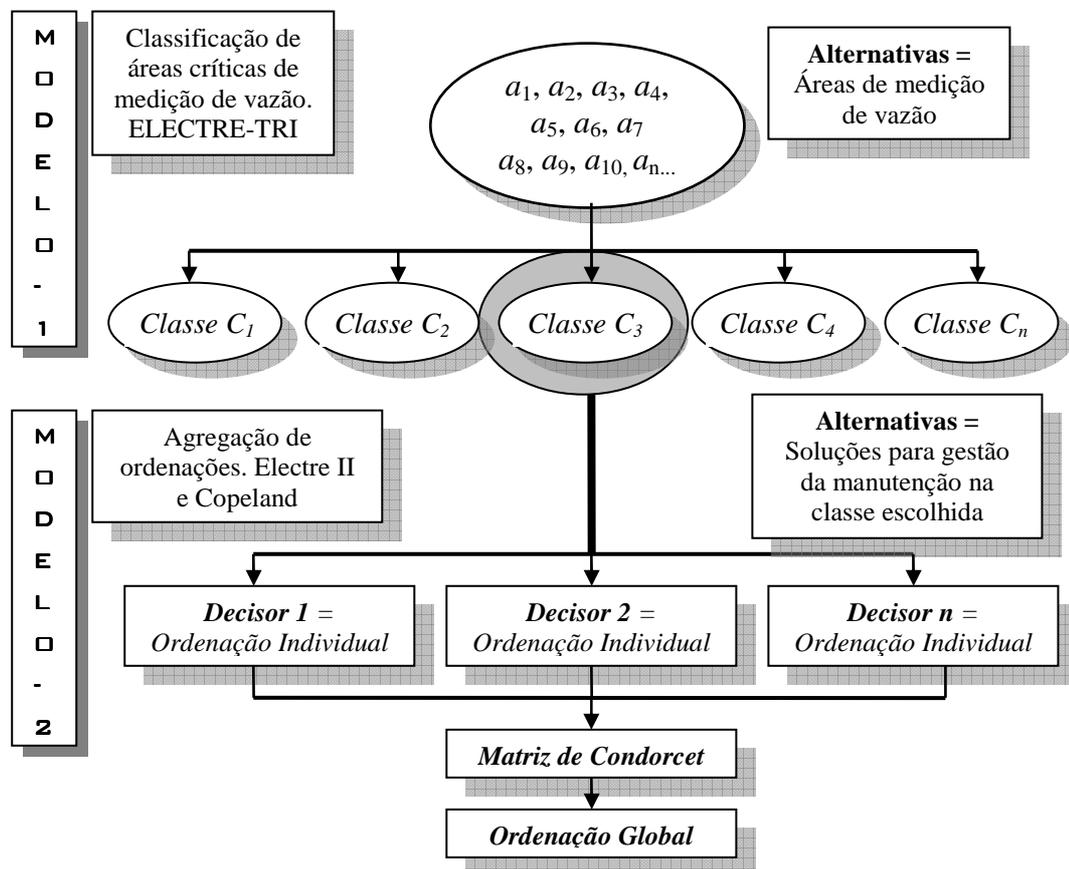


Figura 5.1 – Conexão entre os modelos

O Modelo-2 consiste de duas fases. A primeira fase trata-se da avaliação individual dos membros do grupo, os quais geram uma ordenação das alternativas conforme seus pontos de vista. A segunda fase trata-se da agregação dos resultados gerados na primeira fase. O problema tratado neste modelo é oriundo das características presentes nas organizações

gerenciadoras de redes de distribuição do abastecimento de água. Nelas existem vários setores correlatos e seus respectivos gerentes com preferências, experiências e visões que entram em conflito quando se pretende tomar decisões que promovam a operacionalização de ações para a redução de perdas e custos de manutenção.

Então, o proposto neste Modelo-2 passa a ser ordenar as alternativas para as classes do Modelo-1, através de uma agregação de preferências, baseando-se em métodos multicritérios consolidados para promover o direcionamento de decisões coerentes de um grupo especializado de gerentes de áreas diferenciadas, porém que devem estar interconectadas para a resolução dos problemas relacionados a perdas de água e custos de manutenção.

A escolha dos métodos que apóiam as fases deste segundo modelo se deu, principalmente pelas características encontradas no contexto da gestão de manutenção de redes de água. Dentre essas características pode-se citar:

- ✓ necessidade de avaliar individualmente alternativas viáveis por parte de decisores com visões e interesses diferenciados;
- ✓ alternativas que precisam ser comparadas par a par no processo de avaliação com a intenção de promover uma visão de sobreclassificação entre essas comparações;
- ✓ possibilidade dos decisores determinarem uma importância relativa para os critérios considerados vitais para cada área;
- ✓ necessidade de ordenar as alternativas de modo a proporcionar uma visão global para a execução das ações correspondentes e preferidas por um grupo de decisores.

Na primeira fase do Modelo-2 consideram-se:

- ✓ alternativas e critérios relevantes envolvidos numa ordenação,
- ✓ possíveis ações, definidas por decisores de diretoria das organizações,
- ✓ avaliação individual das alternativas à luz dos critérios, feita por decisores de áreas específicas,
- ✓ utilização do método ELECTRE II para a ordenação individual.

Na segunda fase do Modelo-2 consideram-se:

- ✓ agregação e ordenação do resultado anterior, que representam as preferências individuais dos membros do grupo,
- ✓ utilização do método COPELAND para essa agregação,

Assim, os métodos ELECTRE II, na primeira fase e o método COPELAND na segunda fase, apresentaram-se como ferramentas que podem auxiliar no objetivo proposto no modelo.

O fluxograma da figura 5.2 demonstra uma síntese do modelo com a percepção das etapas e fases estruturais, conjuntamente com o apoio dos métodos multicritérios de apoio.

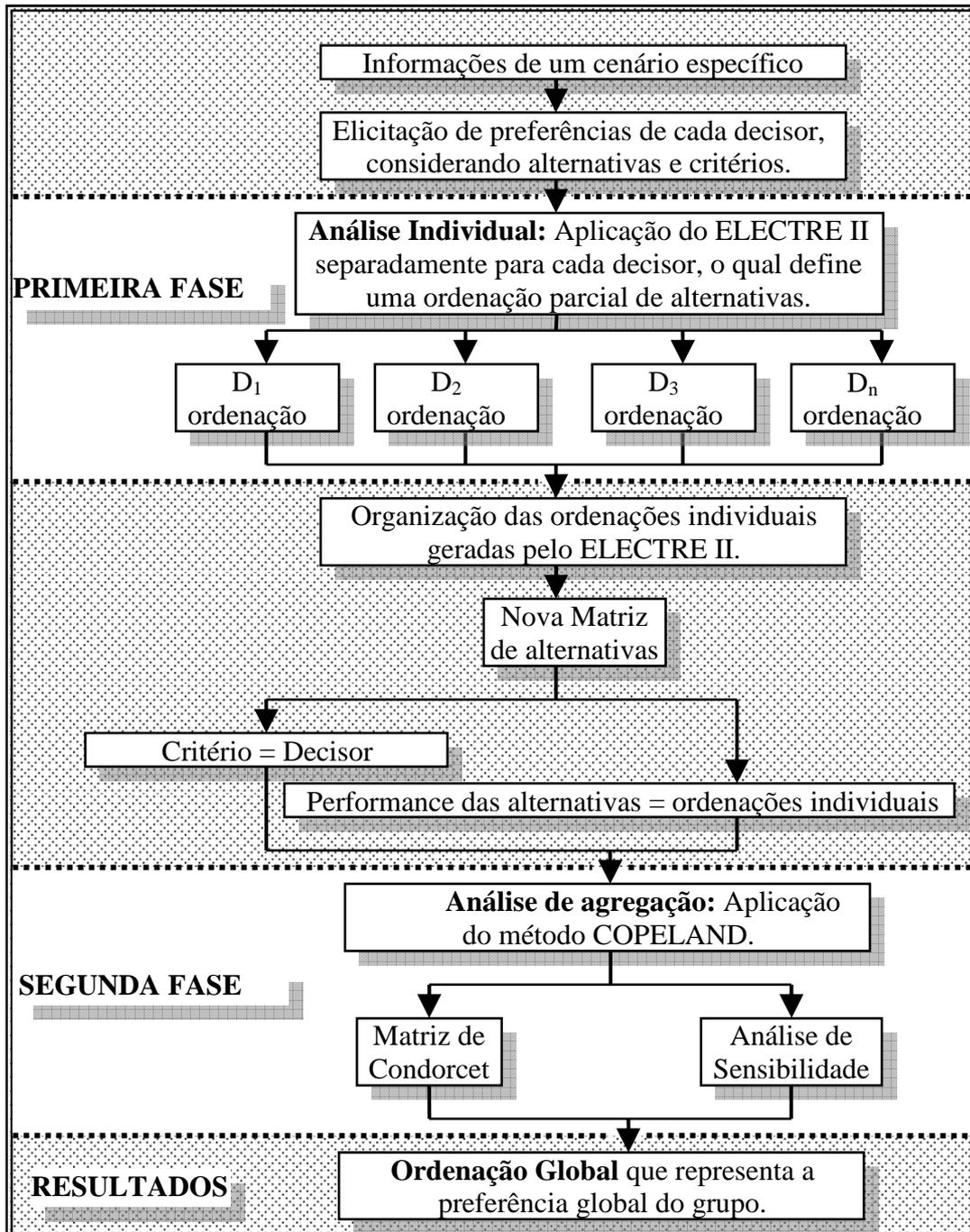


Figura 5.2 – Fluxograma do modelo proposto

## 5.1 Ordenações Individuais

### 5.1.1 Elicitação das preferências: cenário específico

Na manutenção de redes no abastecimento de água os cenários tendem a serem variados. Nesta primeira fase, para a definição das alternativas que serão implementadas após a classificação gerada pelo Modelo-1, considerou-se uma das situações mais presentes no contexto das organizações que trabalham com sistemas de abastecimento de água para cidades e a gestão da manutenção desses sistemas. Uma situação em que as alternativas e critérios são definidos por um único decisor (representado pelo governo ou diretores da organização), que é quem possui os recursos necessários para a materialização das ações. Assim, um grupo de decisores tem em mãos, alternativas e critérios pré-definidos e deverá revelar suas preferências individuais, conforme a necessidade da sua área de atuação, dentro do contexto apresentado a ele para a ordenação e priorização das alternativas. Contudo, será necessário conhecer não apenas as preferências de um ou outro decisor isoladamente, mas as preferências do grupo de decisores.

A manutenção no abastecimento de água atende, na maioria de seus casos, regiões características, que podem até conter pequenos conglomerados integrados por interesses econômicos, sociais e políticos. Portanto, as estratégias para esses casos são comuns e pertinentes ao desenvolvimento social e econômico da região envolvida. Por conseguinte, o cenário que envolve o problema de priorização é caracterizado por essas estratégias, que balizam as ações e norteiam as decisões, pois esses objetivos são almejados. Destarte, decisores aos quais serão sujeitas as avaliações, deverão contribuir com o ramo de atividade ao qual estão inseridos, explicitando suas preferências em atender a área de atuação, com os objetivos de melhorar a qualidade e reduzir perdas e custos desnecessários de manutenção, atendendo simultaneamente as definições estratégicas globais.

Algumas dessas estratégias podem ser citadas como exemplos:

- ✓ Redução dos índices de perdas de água;
- ✓ Redução de custos de manutenção;
- ✓ Utilização de técnicas avançadas de manutenção;
- ✓ Qualificação de colaboradores em operação e manutenção;
- ✓ Desenvolvimento tecnológico;

- ✓ Qualidade de produtos e serviços;
- ✓ Retorno de capitais investidos.

Assim, as alternativas que serão planejadas para a construção de medidas viáveis de manutenção, que ajudarão a solucionar os problemas inerentes da manutenção no abastecimento de água, bem como os critérios para a avaliação dessas alternativas, certamente deverão levar em consideração primeiramente as estratégias e objetivos definidos por uma diretoria ou pelos governantes.

Um leque de alternativas já consolidadas e critérios que atendem os interesses específicos àquele cenário são apresentados aos decisores, os quais demonstrarão suas preferências em relação à priorização construindo uma ordenação, começando pelas alternativas mais preferidas a serem implantadas até as alternativas de menor importância ou com menor potencial de resolução dos problemas, na visão desses decisores.

### 5.1.2 Primeira Fase: Análise Individual

Conforme as alternativas e os critérios são de uma elaboração de âmbito governamental ou da alta administração, conseqüentemente novas alternativas só poderão ser incluídas na avaliação através de projetos ou solicitações planejadas para investimentos no setor. Em decorrência disto, os decisores passam, na primeira fase do modelo, a realizar avaliações individuais das alternativas elencadas, interpretando cada alternativa viável ou a combinação dessas alternativas, como uma forma potencial de alcançar os objetivos que auxiliarão no cumprimento das definições estratégicas de manutenção.

Almejando deixar claro o processo de avaliação, procurou-se por um método multicritério que, ao comparar alternativas não apresentasse características substanciais de correlação ou compensatoriedade. O principal motivo para tal foi que os critérios presentes, que ponderam as avaliações, não apresentam características compensatórias, ou seja, um critério não influencia na redução de outro diretamente, decorrente da avaliação de uma alternativa viável. Portanto, a avaliação das alternativas é individualizada e também apresenta características subjetivas inerentes ao seu contexto.

Visto que as informações foram delimitadas, dentre todos os métodos estudados, que atendessem a problemática de ordenação e as particularidades do problema nesta fase, o método ELECTRE II mostrou-se adequado para apoiar e compor uma proposta de resolução eficiente.

### 5.1.3 Organização das ordenações

A organização das ordenações acontece conforme ilustrado na tabela 5.1. As alternativas agora apresentam uma avaliação que é resultante de um processo de ordenações individuais dos decisores, obtidas pelo método ELECTRE II. A nova organização transforma essas ordenações individuais em uma nova *performance* para as alternativas. Os decisores passam a ter uma conotação relativa a critérios, pois eles apresentam características em suas avaliações que ponderam a próxima análise a ser feita.

Tabela 5.1 – Organização das Ordenações Individuais

Critérios	Alternativas				
	$a_1$	$a_2$	$a_3$	...	$a_m$
$D_1$	$p_{11}$	$p_{12}$	$p_{13}$	...	$p_{1m}$
$D_2$	$p_{21}$	$p_{22}$	$p_{23}$	...	$p_{2m}$
$D_3$	$p_{31}$	$p_{32}$	$p_{33}$	...	$p_{3m}$
...	...	...	...	...	...
$D_n$	$p_{n1}$	$p_{n2}$	$p_{n3}$	...	$p_{nm}$

Fonte: Adaptado de JARDIM & LANNA, 2003

Sendo:

$a_1, a_2, \dots, a_m$  = alternativas;

$D_1, D_2, \dots, D_n$  = decisor = critério;

$p_{11}, p_{21}, \dots, p_{nm}$  = ordenação das alternativas pelos decisores

Importante garantir nesta etapa é a não ocorrência de empates nas ordenações de cada decisor. Para este modelo devem ser definidas na fase de ordenação individual, regras de desempate, para que cada decisor tenha uma ordenação completa, sem a repetição ou indiferença entre alternativas. Essas regras poderão ser definidas na fase de definição das alternativas e critérios pela gerência governamental, simplesmente definido as alternativas numa ordem de preferência ou pelos decisores através de uma regra de preferência quando houver algum empate. Por exemplo, quando duas alternativas forem indiferentes em todos os seus aspectos na ordenação individual, um dos critérios elencados poderia ser definido como a regra de desempate.

## 5.2 Análise de Agregação

### 5.2.1 Segunda fase: Agregação das ordenações individuais

Chamada de segunda fase neste modelo, esta etapa faz uma análise de agregação das ordenações individuais obtidas na primeira fase e preparada pela organização das ordenações, realizada no item anterior.

O objetivo desta fase é condensar as preferências apresentadas no resultado obtido pelo ELECTRE II. Esses resultados advêm de uma reflexão individual de cada decisor e de sua avaliação frente ao cenário que lhe foi apresentado, conforme suas preferências e experiências vividas no seu setor de atuação. Porém, construir uma avaliação que represente a visão do grupo, partindo de análises individuais é uma tarefa contraditória e muitas vezes insatisfatória nos resultados finais.

Nesta fase ocorre a utilização de um método que transforma as avaliações individuais em votos a favor ou contra para as alternativas disponíveis.

O método COPELAND traz algumas vantagens em sua utilização, já que decorre das características apresentadas pelos métodos Borda e Condorcet, sem apresentar os problemas que os dois últimos tendem a ter, como o da independência em relação às alternativas irrelevantes no método borda e os ciclos de intransitividade no “**paradoxo de Condorcet**”, pelo uso método Condorcet.

A segunda fase realiza uma ordenação que se baseia numa organização das ordenações individuais realizadas na primeira fase. Esta organização é realizada através da reorganização em novas matrizes de avaliação, as quais utilizam os resultados das ordenações individuais, onde os decisores serão os critérios, que orientam a avaliação das alternativas sob este foco. É gerada então uma ordenação global como resultado dessa matriz.

Para a realização desta ordenação global o método COPELAND é utilizado, que realiza a análise como um processo de votação. As ordenações individuais servirão de base para se analisar as avaliações das alternativas, comparando-se com um processo de voto. Como se os decisores ao avaliar as alternativas sob o ponto de vista dos critérios elencados e pela ordenação pelo método ELECTRE II, designassem seu voto para as alternativas em que apresentarão maior dominância. Assim, com o método COPELAND é possível agregar aquelas ordenações individuais em uma nova ordenação, que conseqüentemente, representa as preferências agregadas do grupo de decisores.

Essa etapa é realizada como apresentado no fluxograma, figura 5.2 e descrita nos itens 5.1.3 (Organização das ordenações) e 5.2.1 (Segunda fase – Agregação das ordenações individuais) da seção anterior.

### 5.3 Aplicação do Modelo-2: ordenação de alternativas de manutenção

Nesta aplicação o problema foi estruturado para aplicar a metodologia ELECTRE II e COPELAND para um grupo de decisores de uma companhia de abastecimento de água ordenando as alternativas viáveis da classe-1, a qual foi classificada no modelo anterior, incorporando áreas de medição de vazão com prioridade Altíssima para manutenção. Foi considerado relativo número de alternativas e vários critérios ponderados, para avaliação na problemática de ordenação de ações de manutenção nas redes de distribuição de sistemas de abastecimento de água. As duas fases do modelo foram aplicadas separadamente, conforme descrito nas etapas seguintes.

A tabela 5.2 apresenta as novas características englobadas pelas classes resultantes da aplicação do Modelo-1. Podem-se visualizar as informações agregadas sobre as áreas pertencentes às diferentes classes de prioridades. Essas informações servirão de base para os decisores captarem as características de cada classe, que contém agora um aglomerado de áreas de medição de vazão com similaridades que as tornam mais ou menos prioritárias, conforme a classificação resultante do Modelo-1. Essas similaridades apoiarão a avaliação que cada decisor deverá realizar na próxima etapa de avaliações individuais. As classes  $C_4$  e  $C_5$  não foram consideradas nesta tabela, por não apresentarem nenhuma área classificada.

Tabela 5.2 – Dados agregados das classes do Modelo-1 (abordagem otimista)

$C_n$	Classe (nome)	Ligações (unid.)	Produzido ( $m^3/mês$ )	Medido ( $m^3/mês$ )	Perdas (volume $m^3$ )	Redes (m/lig)	Consumo (l/hab/dia)	Economias (unid.)	População (hab.)
$C_1$	Altíssima	42.924	878.592	461.125	417.467	10,75	104,68	44.500	149.966
$C_2$	Alta	31.633	757.764	368.193	389.571	11,57	107,99	34.077	114.839
$C_3$	Média	9.834	182.393	95.675	86.718	10,50	104,40	10.124	34.119

#### 5.3.1 Primeira Fase: Ordenações Individuais

Primeiramente, faz-se a verificação de quais estratégias ou ações foram definidas pelos governantes para atingir metas ambientais e econômicas separadamente, chamadas alternativas individuais, que podem gerar os resultados esperados para essas metas e que serão implementadas na classe de maior prioridade definida no Modelo-1. Estas alternativas são elencadas com base em dados estatísticos do sistema, na experiência dos decisores ou até

mesmo com base na vontade política ou disponibilidade de financiamentos públicos destinados ao setor. Assim, as estratégias apresentadas ao grupo de decisores, que foram elicitadas dos governantes, para solucionar os problemas encontrados na manutenção de redes das áreas de medição de vazão prioritárias são, conforme a tabela 5.3 apresenta:

*Tabela 5.3 – Estratégias e ações de intervenção*

<b>Ações A</b>	<b>Meta de Redução do índice de Perdas (Operacionais)</b>
<b>A1</b>	Redução de pressão nas redes de distribuição;
<b>A2</b>	Realização de setorização de pressão e manobra;
<b>A3</b>	Automação (monitoramento de pressão e vazão nas redes).
<b>Ações B</b>	<b>Meta de Redução de Custos (Econômicas)</b>
<b>B1</b>	Manutenção preventiva, redução dos custos com manutenção;
<b>B2</b>	Investimentos em novos materiais;
<b>B3</b>	Treinamento em manutenção preventiva.

#### 5.3.1.1 Ações A – Meta de Redução do Índice de Perdas

- A1** Redução de pressão nas redes de distribuição: essa estratégia visa minimizar a ocorrência de vazamentos nas redes de distribuição e, conseqüentemente reduzir o índice de perdas. Ao se reduzir a pressão média nas tubulações, a vazão de fuga também será reduzida e o volume perdido de água, conseqüentemente será menor.
- A2** Realização de setorização de pressão e manobra: essa ação tem por objetivo subdividir grandes áreas de abastecimento em áreas menores para proporcionar controle sobre as ocorrências de manutenção. Em outras palavras, quando é necessário fazer manutenção em um local específico, procura-se evitar o desabastecimento de uma grande área, influenciando apenas a área restrita que contém o local de interesse para manutenção.
- A3** Automação: a automação de processos também tem sido alvo das empresas de saneamento, principalmente para monitorar e controlar perdas de água. Apesar de apresentar investimentos elevados, ela contribui para uma redução em médio prazo dos índices de perdas do sistema. O custo-benefício acaba sendo vantajoso para sistemas com índices elevados de perdas.

## 5.3.1.2 Ações B – Meta de Redução de Custos

**B1** Manutenção preventiva, redução dos custos com manutenção: na manutenção de redes de distribuição de água a manutenção preventiva tem um papel importante na antecipação de ocorrências que desencadeiam custos elevados de manutenção. Uma ação efetiva com manutenção preventiva pode auxiliar o gestor da manutenção a evitar problemas emergentes.

**B2** Investimentos em novos materiais: investir em novos materiais pode significar agregação de tecnologia e novas técnicas de apoio para melhor operação do sistema. Os custos podem inicialmente representar uma barreira, mas em longo prazo os resultados compensam o esforço em implementar este tipo de ação.

**B3** Treinamento em manutenção preventiva: a qualificação é essencial para o bom funcionamento de qualquer empresa. Principalmente na manutenção a qualificação dos empregados pode trazer um ganho econômico, quando as rotinas são realizadas de maneira mais eficiente do que outrora.

Com o conhecimento dessas ações, podem-se visualizar diversas combinações que podem atingir as metas descritas na fase anterior. Essas combinações trazem soluções viáveis para ambas as metas (ambientais e econômicas), porém não poderão atender uma ou outra em sua plenitude. Então a(s) alternativa(s) que será(ão) encontrada(s), representará(ão) o nível de confiança que o grupo tem na combinação de ações que poderá ajudar a atingir as metas, sem que sejam donimadas pelas demais alternativas. As principais combinações escolhidas são listadas na tabela 5.4, a seguir:

Tabela 5.4 – Alternativas de solução

Altern.	Ações								
a1	A1	a4	B1	a7	A1B1	a10	A2B1	a13	A3B1
a2	A2	a5	B2	a8	A1B2	a11	A2B2	a14	A3B2
a3	A3	a6	B3	a9	A1B3	a12	A2B3	a15	A3B3

Juntamente com as alternativas individuais também foram definidos os critérios, conforme apresentado na tabela 5.5, que devem ponderar a ordenação das alternativas na fase de avaliação. Os critérios foram previamente estabelecidos, porém os respectivos pesos devem ser atribuídos pelos decisores de acordo com a visão que eles têm do processo, conforme tabela 5.6.

Tabela 5.5 – Critérios de Avaliação

Critérios de Avaliação	Especificação
<b>Critérios Operacionais</b>	C1. Índice de Perdas Físicas; C2. Número instalado de setores de manobra; C3. Nível de automação do sistema.
<b>Critérios Econômicos</b>	C4. Custo com manutenção corretiva; C5. Custo com investimento em treinamento e programas de manutenção preventiva; C6. Custo do Investimento

### 5.3.1.3 Critérios de Avaliação

- C1** Índice de Perdas Físicas: as alternativas serão avaliadas pelos decisores conforme a eficiência que cada ação, individualmente ou com a combinação de ações, terá na redução do índice de perdas do sistema. Este índice é percentual e calculado como um volume perdido. Diferença entre (volume distribuído - volume medido), dividido pelo volume distribuído nas redes.
- C2** Número instalado de setores de manobra: nesse critério as alternativas serão avaliadas subjetivamente em relação ao que o decisor preferir. Uma dada alternativa poderá causar um aumento do número de setores de manobra, pode manter o número atual ou ainda promover um aumento significativo nesse número.
- C3** Nível de automação do sistema: o nível de automação estará relacionado com a capacidade da alternativa em promover um aumento no nível percentual de implantação para atingir o nível ideal de automação necessária para o sistema.
- C4** Custo com manutenção corretiva: nesse caso a alternativa será avaliada pela capacidade de promover uma diminuição, aumento ou aumento significativo nos custos relacionados à manutenção corretiva.
- C5** Custo com investimento em treinamento e programas de manutenção preventiva: este critério explora a capacidade da alternativa em promover qualificação dos empregados, assim como a efetiva realização de manutenção preventiva.
- C6** Custo do Investimento: a avaliação das alternativas será ponderada também pelo seu custo de implantação. O decisor poderá considerar o custo de investimento na alternativa avaliada como: baixo, médio ou alto.

Conseqüentemente, cada decisor escolherá o peso que lhe convém para cada critério ou aquele que terá maior influência na sua área de atuação. A tabela 5.6 ilustra os pesos dos critérios, atribuídos pelos decisores nesta aplicação.

Tabela 5.6 – Pesos dos critérios de avaliação

<b>Critérios</b>	<b>Decisor 1</b>	<b>Decisor 2</b>	<b>Decisor 3</b>	<b>Decisor 4</b>
C1	0,20	0,30	0,30	0,30
C2	0,10	0,10	0,10	0,20
C3	0,10	0,20	0,10	0,10
C4	0,10	0,10	0,10	0,10
C5	0,20	0,10	0,10	0,10
C6	0,30	0,20	0,30	0,20

Para a definição dos índices de discordância da aplicação do método ELECTRE II é necessário fazer uma especificação de valores máximos de escala dos critérios para a construção da Matriz de Avaliação das Alternativas, conforme apresentado na coluna “Escala Numérica”, da tabela 5.7:

Tabela 5.7 – Níveis dos critérios de avaliação

<b>Critérios</b>	<b>Níveis</b>	<b>Valores estimados</b>	<b>Escala Numérica</b>
<b>C<sub>1</sub></b> (%)	< 20	-	1,00
	de 21 a 35	-	0,75
	de 36 a 45	-	0,50
	de 46 a 55	-	0,25
	de 56 a 70	-	0,00
<b>C<sub>2</sub></b>	Manter	< 50 setor / área	0,00
	Aumentar	> 100 setor / área	0,50
	AumentarSignificativamente	> 200 setor / área	1,00
<b>C<sub>3</sub></b> (%)	< 60	-	0,00
	de 60 a 80	-	0,50
	>80	-	1,00
<b>C<sub>4</sub></b>	Diminuir	< R\$ 150 / metros rede	1,00
	Aumentar	> R\$ 300 / metros rede	0,50
	AumentarSignificativamente	> R\$ 600 / metros rede	0,00
<b>C<sub>5</sub></b>	Diminuir	< R\$1.500 / empregado	1,00
	Aumentar	> R\$3.000 / empregado	0,50
	AumentarSignificativamente	> R\$6.000 / empregado	0,00
<b>C<sub>6</sub></b>	Baixo	< R\$ 50 / ligação	1,00
	Médio	> R\$ 100 / ligação	0,50
	Alto	> R\$ 200 / ligação	0,00

Cada decisor faz a avaliação individual das alternativas frente aos critérios para a aplicação do método ELECTRE II. Através das matrizes de concordância e de discordância, ocorrerá a ordenação das preferências para cada indivíduo do grupo. As variáveis subjetivas

foram definidas com valores: Alto, Médio e Baixo para o critério C<sub>6</sub> e, Diminuir, Aumentar e Aumentar Significativamente para os critérios C<sub>2</sub>, C<sub>4</sub> e C<sub>5</sub> e representam uma escolha pessoal de cada elemento do grupo. Espera-se nesse momento que aconteçam algumas divergências de opiniões pelo fato dos decisores possuírem experiências próprias em áreas distintas, tais como manutenção de redes, administração, planejamento, produção e comercial. A tabela 5.8 apresenta as particularidades dos decisores envolvidos na presente aplicação.

As avaliações são tabuladas em uma matriz de avaliação e normalizadas de acordo com as escalas numéricas definidas na tabela 5.7. Os resultados das avaliações individuais de cada decisor são apresentados logo após a tabela 5.8.

*Tabela 5.8 – Características dos Decisores*

<b>Decisor</b>	<b>Área</b>	<b>Responsabilidades</b>
<b>1</b>	Gestão Administrativa / Planejamento	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Gestão de Pessoal;</li> <li>2. Elaboração de Planos de Gestão Administrativa;</li> <li>3. Gestão Financeira e Contábil;</li> <li>4. Gestão de Contratos Administrativos e Serviços Gerais;</li> <li>5. Gestão de questões Jurídicas.</li> </ol>
<b>2</b>	Gestão da Produção de Água / Tratamento de Esgoto	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Produção, Tratamento e Reservação de água;</li> <li>2. Tratamento e destino de esgoto;</li> <li>3. Controle de qualidade da água;</li> <li>4. Gestão Ambiental.</li> </ol>
<b>3</b>	Gestão Comercial	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Gestão de Clientes;</li> <li>2. Arrecadação;</li> <li>3. Faturamento e Leitura de hidrômetros;</li> <li>4. Cobrança e multas;</li> <li>5. Cadastro comercial;</li> <li>6. Gestão de grandes clientes e poder público;</li> <li>7. Gestão da micromedição.</li> </ol>
<b>4</b>	Gestão de Manutenção de Redes de água	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Controle de pressão nas redes;</li> <li>2. Manutenção Preventiva e Corretiva;</li> <li>3. Execução de cortes;</li> <li>4. Cadastro técnico de redes;</li> <li>5. Projetos de ampliação e melhorias.</li> </ol>

CRITÉRIOS ALTERNATIVAS	C1	C2	C3	C4	C5	C6
<i>a1</i>	0,00	0,00	1,00	1,00	0,50	0,00
<i>a2</i>	0,00	0,50	0,00	0,00	0,50	0,50
<i>a3</i>	1,00	0,50	1,00	0,00	0,50	0,50
<i>a4</i>	1,00	0,00	1,00	0,00	0,50	0,00
<i>a5</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	1,00
<i>a6</i>	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<i>a7</i>	0,50	0,50	1,00	1,00	0,50	0,50
<i>a8</i>	0,50	0,50	1,00	1,00	0,00	0,50
<i>a9</i>	0,25	0,00	0,50	0,50	0,00	0,50
<i>a10</i>	0,50	1,00	0,50	1,00	1,00	0,50
<i>a11</i>	0,75	1,00	0,50	1,00	0,50	0,50
<i>a12</i>	0,75	1,00	0,50	0,50	0,00	0,50
<i>a13</i>	0,75	1,00	1,00	0,50	0,50	1,00
<i>a14</i>	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	1,00
<i>a15</i>	0,75	1,00	1,00	0,50	0,00	1,00

Avaliação Decisor 1

CRITÉRIOS ALTERNATIVAS	C1	C2	C3	C4	C5	C6
<i>a1</i>	0,50	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00
<i>a2</i>	0,50	0,50	0,50	0,50	0,00	1,00
<i>a3</i>	1,00	0,50	1,00	0,50	0,00	1,00
<i>a4</i>	1,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
<i>a5</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50
<i>a6</i>	0,00	0,00	1,00	0,50	0,50	0,50
<i>a7</i>	0,25	0,00	0,50	0,00	0,50	0,50
<i>a8</i>	0,25	0,00	0,50	0,00	0,50	0,50
<i>a9</i>	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50
<i>a10</i>	0,50	1,00	0,50	0,00	0,00	1,00
<i>a11</i>	0,50	1,00	0,50	0,00	0,00	1,00
<i>a12</i>	0,50	1,00	0,50	0,00	0,00	0,50
<i>a13</i>	0,75	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00
<i>a14</i>	0,75	0,50	1,00	0,00	0,00	1,00
<i>a15</i>	0,75	0,50	1,00	0,00	0,00	1,00

Avaliação Decisor 3

CRITÉRIOS ALTERNATIVAS	C1	C2	C3	C4	C5	C6
<i>a1</i>	0,00	0,50	0,50	0,50	0,50	0,00
<i>a2</i>	0,00	1,00	0,00	0,00	0,50	0,50
<i>a3</i>	0,50	1,00	0,50	0,00	0,50	0,50
<i>a4</i>	0,50	0,50	0,50	0,00	0,50	0,00
<i>a5</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	1,00
<i>a6</i>	0,00	0,00	0,50	0,50	1,00	1,00
<i>a7</i>	0,50	0,00	0,00	1,00	0,50	0,50
<i>a8</i>	0,50	0,00	0,00	1,00	0,00	0,50
<i>a9</i>	0,75	0,00	0,00	1,00	0,00	0,50
<i>a10</i>	0,75	1,00	0,00	0,50	0,50	1,00
<i>a11</i>	0,50	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00
<i>a12</i>	0,50	1,00	0,00	0,50	1,00	0,50
<i>a13</i>	0,75	0,50	1,00	0,50	0,50	1,00
<i>a14</i>	0,75	0,50	1,00	1,00	0,50	1,00
<i>a15</i>	0,75	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Avaliação Decisor 2

CRITÉRIOS ALTERNATIVAS	C1	C2	C3	C4	C5	C6
<i>a1</i>	0,25	0,00	0,50	1,00	0,00	0,00
<i>a2</i>	0,25	0,50	0,00	0,50	0,00	0,50
<i>a3</i>	0,50	1,00	0,50	0,50	0,50	1,00
<i>a4</i>	0,50	0,00	0,50	0,00	0,00	0,00
<i>a5</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50
<i>a6</i>	0,00	0,00	0,50	0,50	1,00	0,50
<i>a7</i>	0,75	0,50	1,00	0,50	0,00	0,50
<i>a8</i>	0,50	0,50	0,00	0,50	0,00	0,50
<i>a9</i>	0,75	1,00	0,00	0,00	0,50	0,50
<i>a10</i>	0,50	0,50	1,00	1,00	0,50	1,00
<i>a11</i>	0,50	0,00	0,50	0,00	1,00	1,00
<i>a12</i>	0,50	0,50	0,00	0,00	1,00	0,50
<i>a13</i>	0,75	0,50	0,50	0,50	0,50	1,00
<i>a14</i>	0,50	0,00	0,00	0,50	0,50	1,00
<i>a15</i>	0,75	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Avaliação Decisor 4

Com base nos dados das avaliações feitas pelos decisores, os quais representam as áreas distintas da empresa, podem-se construir as matrizes de Concordância e Discordância do ELECTRE II e assim realizar as ordenações: forte com ( $p=0,5$  ;  $q=0,7$ ) e fraca com ( $p=0,7$  ;  $q=0,5$ ), e uma ordenação final, caracterizada pela média das ordenações fortes e fracas de cada decisor. O resultado dessas ordenações é apresentado na tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Resultado das ordenações individuais

<b>DECISOR 1</b>	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$	$a_{15}$
Ordem Fraca ( $p=0,7$ ; $q=0,5$ )	10 °	14 °	7 °	11 °	13 °	4 °	3 °	9 °	15 °	2 °	5 °	12 °	1 °	6 °	8 °
Ordem Forte ( $p=0,5$ ; $q=0,7$ )	12 °	15 °	10 °	11 °	13 °	7 °	6 °	9 °	14 °	2 °	4 °	8 °	1 °	5 °	3 °
Ordenações corrigidas (média)	11 °	14 °	8 °	12 °	13 °	5 °	3 °	9 °	15 °	2 °	4 °	10 °	1 °	7 °	6 °
<b>DECISOR 2</b>	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$	$a_{15}$
Ordem Fraca ( $p=0,7$ ; $q=0,5$ )	10 °	11 °	6 °	12 °	15 °	9 °	8 °	13 °	14 °	4 °	3 °	7 °	5 °	1 °	2 °
Ordem Forte ( $p=0,5$ ; $q=0,7$ )	15 °	9 °	7 °	13 °	14 °	11 °	10 °	12 °	8 °	3 °	5 °	6 °	2 °	1 °	4 °
Ordenações corrigidas (média)	14 °	9 °	6 °	12 °	15 °	10 °	8 °	13 °	11 °	4 °	5 °	7 °	3 °	1 °	2 °
<b>DECISOR 3</b>	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$	$a_{15}$
Ordem Fraca ( $p=0,7$ ; $q=0,5$ )	12 °	8 °	1 °	13 °	15 °	2 °	9 °	7 °	14 °	4 °	5 °	10 °	11 °	3 °	6 °
Ordem Forte ( $p=0,5$ ; $q=0,7$ )	9 °	5 °	1 °	10 °	15 °	11 °	12 °	13 °	14 °	6 °	2 °	8 °	7 °	4 °	3 °
Ordenações corrigidas (média)	12 °	7 °	1 °	13 °	15 °	6 °	11 °	10 °	14 °	5 °	2 °	9 °	8 °	3 °	4 °
<b>DECISOR 4</b>	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$	$a_{15}$
Ordem Fraca ( $p=0,7$ ; $q=0,5$ )	10 °	11 °	2 °	14 °	15 °	8 °	5 °	13 °	9 °	1 °	6 °	7 °	4 °	12 °	3 °
Ordem Forte ( $p=0,5$ ; $q=0,7$ )	11 °	13 °	3 °	14 °	15 °	7 °	5 °	12 °	6 °	2 °	9 °	8 °	4 °	10 °	1 °
Ordenações corrigidas (média)	10 °	12 °	3 °	14 °	15 °	6 °	5 °	13 °	9 °	1 °	8 °	7 °	4 °	11 °	2 °

### 5.3.2 Segunda Fase: Agregação das ordenações individuais

Com a aplicação do método ELECTRE II foi possível ordenar alternativas sob as preferências individuais de cada elemento de um grupo de decisores. O objetivo a seguir será agregar essas informações em uma ordenação única, que representará as preferências do grupo. A tabela 5.10 apresenta uma nova matriz elaborada a partir dos resultados da aplicação do ELECTRE II que será base para uma análise visando à agregação. Para esta análise foram considerados os métodos Borda, Condorcet e COPELAND.

Conforme explicitado no item 2.7.2 da base conceitual, esses métodos representam a contabilização das vitórias que as alternativas têm em uma comparação par a par. Pelo fato de que os métodos Borda e Condorcet podem apresentar problemas particulares quando aplicados, neste trabalho optou-se pelo método COPELAND, que reúne as virtudes dos outros dois, além de utilizar a estrutura de ambos para o cálculo da ordenação final.

Tabela 5.10 – Matriz de avaliação para a agregação com Copeland

Alternativas Critérios	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$	$a_{15}$
C1 - DECISOR 1	11°	14°	8°	12°	13°	5°	3°	9°	15°	2°	4°	10°	1°	7°	6°
C2 - DECISOR 2	14°	9°	6°	12°	15°	10°	8°	13°	11°	4°	5°	7°	3°	1°	2°
C3 - DECISOR 3	12°	7°	1°	13°	15°	6°	11°	10°	14°	5°	2°	9°	8°	3°	4°
C4 - DECISOR 4	10°	12°	3°	14°	15°	6°	5°	13°	9°	1°	8°	7°	4°	11°	2°

A tabela 5.11, apresenta a configuração da matriz de Condorcet como base para o cálculo e aplicação do método COPELAND e também as interações entre as linhas e colunas da matriz que geram a ordenação COPELAND. Foi necessária a determinação de regras em relação ao empate entre as alternativas, pois a definição inicial foi de não possuir alternativas que apresentem empates entre si. Assim se definiu como regra de desempate o número de derrotas das alternativas, ou ainda se o número de derrotas for igual, a ordem crescente da designação inicial das alternativas pelos governantes. Assim das alternativas empatadas, aquela que contabilizar o menor número de derrotas ou que foi definida anteriormente na escolha das alternativas, assumirá uma posição privilegiada em relação às demais. Também o peso relativo aos decisores foi considerado igualitário, ou seja, todos os quatro decisores considerados nesta aplicação possuem a mesma importância dentro do processo decisório, tendo peso unitário.

Tabela 5.11 – Matriz de Condorcet e ordenação Copeland

	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$	$a_{15}$	$\Sigma_L$
$a_1$	-	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
$a_2$	0	-	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	4
$a_3$	1	1	-	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	9
$a_4$	0	0	0	-	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
$a_5$	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$a_6$	1	1	0	1	1	-	0	1	1	0	0	1	0	0	0	7
$a_7$	1	1	0	1	1	1	-	1	1	0	0	0	0	0	0	7
$a_8$	1	0	0	1	1	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	3
$a_9$	0	0	0	0	1	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0	1
$a_{10}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	1	1	0	0	0	11
$a_{11}$	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	-	1	0	1	0	9
$a_{12}$	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	-	0	0	0	6
$a_{13}$	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	-	0	0	10
$a_{14}$	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	-	0	7
$a_{15}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	-	11
$\Sigma_C$	10	9	2	12	14	6	4	10	10	0	2	7	1	1	0	
L-C	-8	-5	7	-11	-14	1	3	-7	-9	11	7	-1	9	6	11	
Copeland	12°	10°	4°	14°	15°	8°	7°	11°	13°	2°	5°	9°	3°	6°	1°	

Os métodos Borda e Condorcet não foram aplicados individualmente neste contexto com objetivo de evitar os problemas encontrados nos dois métodos, o desrespeito ao axioma de Arrow (da independência em relação às alternativas irrelevantes), para o método Borda e do “**paradoxo de Condorcet**”, ou situação de intransitividade para o método Condorcet.

Assim o método de COPELAND, utilizado para a ordenação final, considerado um compromisso entre as filosofias opostas de Borda e Condorcet, reuniu as vantagens dos dois outros métodos proporcionando atingir o objetivo do trabalho. Como os métodos aplicados nesta etapa representam um cenário similar a um processo de votação, os resultados da aplicação do método ELECTRE II embasam as preferências dos decisores como se eles estivessem votando na alternativa preferida ao avaliar as alternativas na fase anterior.

### 5.3.3 Análise de sensibilidade

Para uma análise de sensibilidade foi utilizado um peso diferenciado para cada decisor e repetida a aplicação do método COPELAND, procurando perceber se esta mudança na importância relativa de um decisor, modificaria substancialmente o resultado final. Pode-se assim concluir que algumas mudanças ocorreram, porém as diferenças entre as trocas individuais de posições foram mais acentuadas nas ordens mais elevadas, conforme aponta a tabela 5.12. O novo peso relativo considerado foi: peso = 2, ou seja, o decisor com esta importância possui as preferências valorizadas em dobro se comparado aos demais. Claramente essa situação pode levar as preferências do grupo a tenderem para as preferências do decisor majoritário, porém ainda sim as primeiras colocações se mantiveram relativamente dentro das expectativas do grupo, como se os pesos ainda fossem iguais.

*Tabela 5.12 – Análise de sensibilidade atribuindo pesos aos decisores*

	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$	$a_{15}$
Ordenação pesos iguais	12°	10°	4°	14°	15°	8°	7°	11°	13°	2°	5°	9°	3°	6°	1°
D1 (peso = dobro)	12°	11°	6°	13°	15°	7°	5°	10°	14°	1°	4°	9°	2°	8°	3°
D2 (peso = dobro)	13°	10°	6°	14°	15°	8°	9°	12°	11°	4°	5°	7°	3°	2°	1°
D3 (peso = dobro)	12°	10°	4°	13°	15°	8°	7°	11°	14°	3°	5°	9°	6°	2°	1°
D4 (peso = dobro)	13°	11°	3°	14°	15°	7°	5°	12°	10°	1°	6°	9°	4°	8°	2°

## 5.4 Software desenvolvido

Com o objetivo de tornar o Modelo-2 informatizado, foi desenvolvido um aplicativo que proporciona realizar o processo de elicitação, avaliação de alternativas e ainda visualizar o processo de cálculo, através da apresentação das matrizes de concordância e discordância no ELECTRE II e da matriz de Condorcet no cálculo da ordenação COPELAND.

A figura 5.3 traz a apresentação de algumas informações sobre a procedência do *software* e ano de desenvolvimento.

Seqüencial e propositadamente, as figuras 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7 iniciam o aplicativo para a ordenação das alternativas apresentadas neste trabalho, bem como permitem algumas variações no número de decisores, número de alternativas e também dos critérios, além dos pesos e escalas respectivos a cada etapa do processo:

- ✓ **Figura 5.4 - Tela de definições:** Nesta tela é possível definir o número de decisores, as alternativas desejadas, os critérios que irão compor o processo de avaliação, os pesos respectivos para esses critérios e as escalas a que eles estarão sujeitos;
- ✓ **Figura 5.5 - Tela de matrizes:** Apresenta as matrizes de concordância e discordância utilizadas pelo método ELECTRE II, bem como os resultados das ordenações individuais para cada decisor. Este resultado é utilizado na aplicação do método seguinte, o método COPELAND, que utilizará essa ordenação como uma matriz em que os resultados serão as novas alternativas e os critérios os decisores;
- ✓ **Figura 5.6 - Tela do Resultado Final:** Nesta tela é possível visualizar o resultado após a aplicação do método COPELAND, assim como a matriz de Condorcet, utilizada pelo método para o cálculo. Esse resultado final representa a ordenação agregada das preferências individuais dos decisores;
- ✓ **Figura 5.7 - Tela de Sensibilidade:** Nesta tela são permitidas algumas variações em relação à importância de cada um dos decisores, atribuindo-lhes o dobro da importância. A cada atribuição do peso para maior importância do decisor é gerada uma nova linha de ordenação que representa uma ordenação em que o decisor escolhido certamente terá as suas preferências majoradas na

avaliação e conseqüentemente, algumas das posições anteriores mudarão conforme a preferência deste decisor em relação aos outros.



Figura 5.3 – Tela de Abertura

**Evaluation of Alternatives in the maintenance of water distribution - ELECTRE II Method**

Generic-Project Sample-Project Remake Last-Project Exit

a_n	Combin.
a1	A1
a2	A2
a3	A3
a4	B1
a5	A1.B1
a6	A2.B1
a7	A3.B1
a8	B2
a9	A1.B2
a10	A2.B2
a11	A3.B2
a12	B3
a13	A1.B3
a14	A2.B3
a15	A3.B3

**Decision Makers**  
Number of Decision Makers: 4

**STEP.1**

**ACTIONS: A. Reducing rate of water loss**

- A1: Pressure Reduction in networks
- A2: Sectorization and Pressure Maneuvers
- A3: Automation, Flow Monitoring

**STEP.2**

**ACTIONS: B. Reducing costs**

- B1: Reduced maintenance costs
- B2: New materials Investment
- B3: Training on preventive maintenance

**STEP.2**

**CRITERIA**

- C1: Physical Loss indicator (Weight: 0.2, Scale: 1b)
- C2: Number of Sectors Maneuver (Weight: 0.1, Scale: 3)
- C3: Level of Automation (Weight: 0.1, Scale: 2a)
- C4: Corrective Maintenance Cost (Weight: 0.1, Scale: 4)
- C5: Cost Training / Prev. Maintenance (Weight: 0.2, Scale: 4)
- C6: Cost of Investment (Weight: 0.3, Scale: 4a)

TOTAL --- 1

**STEP.3**

**SCALES**

- 1. Percentage Inverse
- 2. Percentage Normal
  - a) 3 Levels
  - b) 5 Levels
- 3. Level Normal
- 4. Level Inverse
  - a) Low, Medium, High

**STEP.3**

**EVALUATION MATRIX OF DECISION MAKERS** 1

Save/Results of Evaluation: Save Results

Open a sample: Decisor: 1 SampleResult Recover

D-1	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13	a14	a15
C1	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.50	0.50	0.25	0.50	0.75	0.75	0.75	0.50	0.75
C2	0.00	0.50	0.50	0.00	0.00	0.00	0.50	0.50	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.50	1.00
C3	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.50	0.50	0.50	0.50	1.00	0.50	1.00
C4	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.50	1.00	1.00	0.50	0.50	0.50	0.50
C5	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	1.00	0.50	0.00	0.00	1.00	0.50	0.00	0.50	0.50	0.00
C6	0.00	0.50	0.50	0.00	1.00	1.00	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	1.00	1.00	1.00

**STEP.4** **STEP.5** **STEP.6**

Figura 5.4 – Tela de Definições

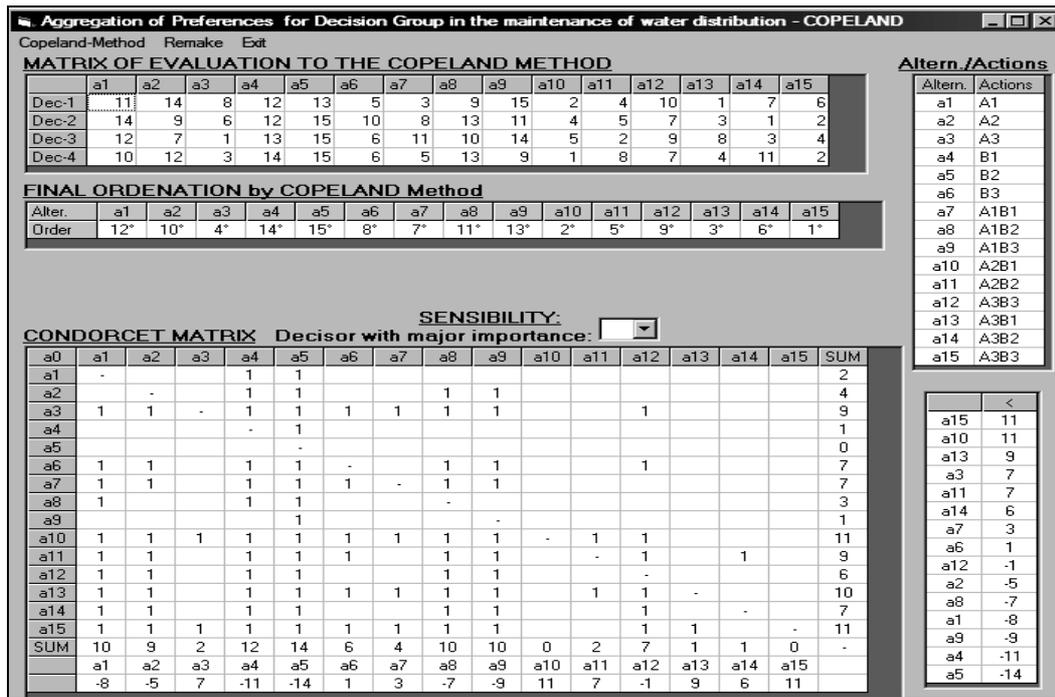


Figura 5.5 – Tela do Resultado Final

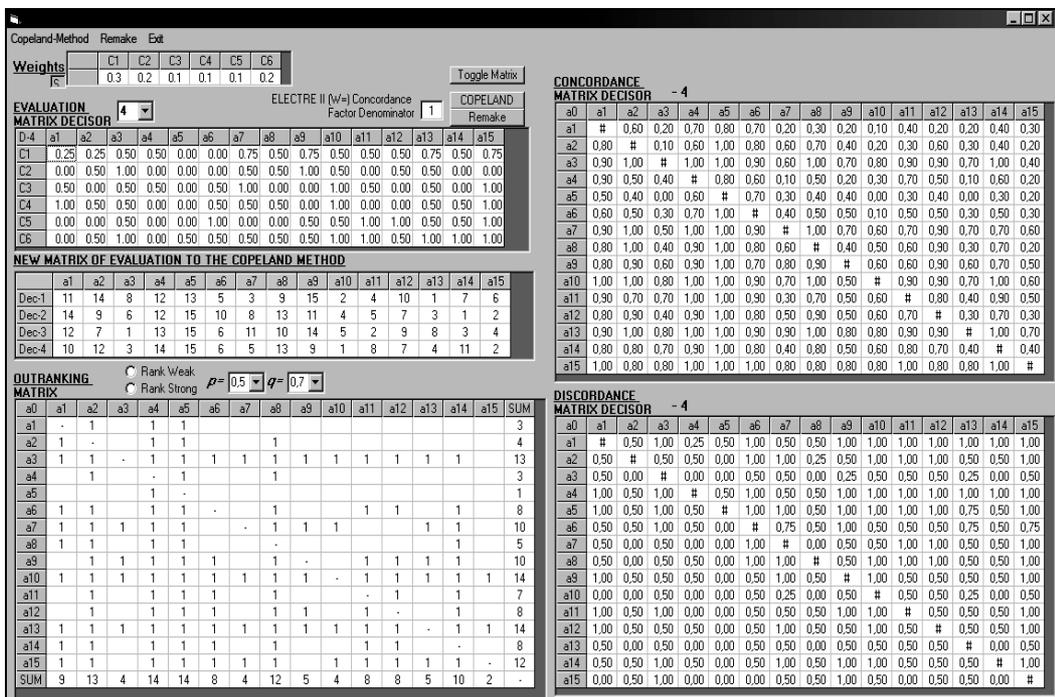


Figura 5.6 – Tela das Matrizes

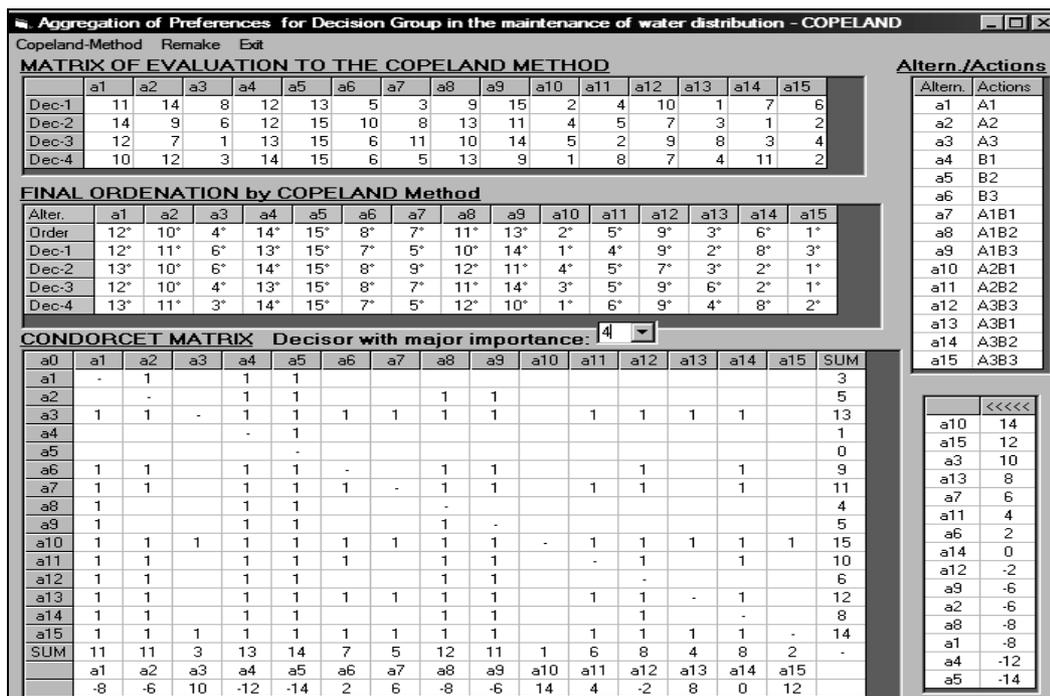


Figura 5.7 – Tela de Sensibilidade

### 5.5 Considerações sobre os resultados do Modelo-2

Vale ressaltar, que para quaisquer mudanças nas características dos critérios ou das alternativas, sejam elas de caráter técnico, político ou administrativo, os resultados se apresentarão de forma diferente, levando à necessidade de reavaliar o cenário e repetir a aplicação dos modelos.

Os resultados da aplicação do segundo modelo de ordenação podem ser aferidos em dois momentos:

- ✓ após a construção das Matrizes de Concordância e Discordância individuais para os decisores e da ordenação individual pelo método ELECTRE II;
- ✓ após a apresentação da Matriz de Condorcet, pela representação usada no método COPELAND, após a aplicação deste segundo método.

Esses valores estão relacionados às preferências globais, que são as alternativas dominantes, ou seja, aquelas que apresentam maiores preferências de possíveis resultados gerados, se levados em consideração os critérios elencados nas duas fases do modelo.

Ao analisar o resultado das ordenações individuais promovidas pela aplicação do ELECTRE II, podem-se perceber algumas diferenças pontuais entre as preferências dos decisores do grupo. Porém, também é possível visualizar pontos de convergência para as opiniões individuais e em grupo. Essa avaliação só foi possível após fazer a agregação dos resultados da primeira fase (ELECTRE II) aplicando o segundo método (COPELAND). Este segundo modelo proposto procura resolver esses tipos de conflitos e divergências, utilizando uma escala numérica que representa a verdadeira preferência por uma alternativa se for levado em conta um determinado critério.

Os resultados dessa combinação da utilização dos métodos ELECTRE II e COPELAND, concomitantemente, permitem dar aos decisores uma visão mais clara sobre qual alternativa poderá auxiliar mais consistentemente para atingir os múltiplos objetivos com que eles se deparam e ainda promover um consenso entre as opiniões do grupo. Além disso, pode ainda possibilitar variações e novas análises após mudanças de cenários ou até de objetivos com o *software* desenvolvido. A representação matricial proporcionada pelo método COPELAND, como apresentado na segunda fase deste segundo modelo, ajuda a percepção sobre como as alternativas, ou a preferência pelas alternativas está se comportando em relação ao conceito de votação, presentes no método.

A matriz de ordenação final demonstrou que o grupo apresentou pontos de convergência em algumas avaliações e preferências. As opiniões foram unânimes quanto ao resultado final. Certamente, cada decisor já havia pensado em suas preferências individualmente, quando foi entrevistado para gerar a matriz de avaliação do ELECTRE II. Por esse motivo é que as opiniões acabaram convergindo de maneira natural e depois da aplicação do método COPELAND que fez a agregação na segunda fase do modelo.

Para medir a eficiência do *software* desenvolvido para aplicação deste segundo modelo, que tratou da problemática de ordenação individual e em grupo, foram ainda realizados os procedimentos desenvolvidos no método com uma turma de alunos de pós-graduação. Essa turma foi dividida em cinco grupos que realizaram as mesmas avaliações individuais e reuniram-se para determinar uma avaliação em grupo. Logo após os dados foram inseridos no *software* e os resultados aferidos pelo aplicativo foram comparados aos resultados gerados pelos alunos. Esses resultados são apresentados do apêndice 1 ao apêndice 6 e demonstram a capacidade do *software* de realizar os cálculos coerentemente com o modelo desenvolvido.

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

### 6.1 Conclusões

Com os resultados apresentados com a classificação no Modelo-1, pode-se verificar que as áreas classificadas atenderam as expectativas com algumas pequenas variações. O modelo de classificação realmente possibilita a visualização imediata das classes críticas e o setor de manutenção das redes de distribuição de um sistema de abastecimento pode se utilizar dessa informação para agir rapidamente em situações que necessitam atender as prioridades de manutenção.

O fato de fazer uma classificação prévia das áreas, otimiza a atuação do setor de manutenção, que logo após a ocorrência de vazamentos ou situações que necessitam de manutenção imediata nas áreas mais importantes do ponto de vista das preferências do decisor podem programar a aplicação das alternativas ordenadas pelo Modelo-2.

Sendo a abordagem multicritério de apoio à decisão caracterizada como um conjunto de métodos que buscam tornar claro um problema no qual as alternativas são avaliadas por múltiplos e conflitantes critérios, auxiliando as pessoas e organizações nas decisões, o presente estudo traz uma ampliação nos horizontes de atuação da gestão da manutenção em sistemas públicos de abastecimento de água.

Aplicando-se o segundo modelo proposto (Modelo-2) e baseado nos métodos ELECTRE II e COPELAND, pode-se chegar a resultados relevantes sob o ponto de vista do atendimento a objetivos e a um cenário mais complexo na manutenção de sistemas de distribuição de água tratada, onde são envolvidos múltiplos objetivos e metas e ainda um grupo seletivo de decisores. Essa técnica de apoio a decisão pode certamente auxiliar os gestores a visualizar um núcleo de alternativas viáveis para a solução de problemas inerentes a manutenção no abastecimento público de água, tais como: perdas, execução de alternativas de manutenção, implantação de automação, monitoramento nas áreas prioritárias. Com essa visualização fica mais confortável tomar decisões, já que existe uma tendência para maximizar o atendimento às preferências dos decisores do grupo para que os objetivos sejam atendidos, com a probabilidade de melhores resultados.

Neste caso específico, o Modelo-2 proporciona um importante contexto de suporte à decisão para um grupo de decisores que, inicialmente se deparava com conflitos de opiniões e

preferências em relação às alternativas possíveis para a solução dos problemas elencados no estudo e tratados primeiramente pelo Modelo-1, classificando áreas conforme a criticidade. Com o Modelo-2 os decisores decidem individualmente, analisando as alternativas, procurando evitar o “calor da discussão” podendo chegar a decisões coerentes com o seu ponto de vista preservado.

A abordagem multicritério não apresenta uma solução ideal para os problemas, mas entre todas as alternativas possíveis de decisão a mais coerente, com a otimização do processo de decisão. Os métodos de apoio multicritério à decisão têm um lado científico, mas ao mesmo tempo, subjetivo, apresentando consigo a capacidade de agregar todas as características consideradas importantes, inclusive as não quantitativas, com o objetivo de permitir a transparência e a sistematização do processo referente aos problemas de tomada de decisões.

Assim o presente trabalho cumpre o objetivo de construir modelos de classificação de alternativas prioritárias e, posteriormente, de agregação de preferências em grupo, com a consideração de aspectos subjetivos e objetivos ao mesmo tempo para auxiliar na tomada de decisão em manutenção de redes de distribuição num sistema de público de abastecimento de água. O caráter citado por Gomes *et al.* (2004), de não apresentar soluções ideais ou milagrosas está implícito neste trabalho, que buscou apoiar o processo decisório, através da proposição de modelos considerados mais adequados para os cenários encontrados.

Então, este trabalho apresenta um novo desenvolvimento no que diz respeito à gestão e roteamento automático das ações de manutenção eficazes, que conseqüentemente irão gerar melhorias de qualidade, operação e satisfação do cliente. Esses recursos fornecem para o gerente de manutenção decisões de maior qualidade, alocadas para resolver os problemas críticos de manutenção, que normalmente afetam a população diretamente.

Neste estudo, os problemas correlacionados com a gestão da manutenção foram tratados como um problema de decisão. A classificação e ordenação de prioridades para soluções são realizadas através de modelos que incorporam a estrutura de preferências de decisores e a educação do conhecimento *a priori* de especialistas para a modelagem de alternativas de manutenção.

O estudo visa também estabelecer um adequado nível de manutenibilidade global para o gerenciamento da manutenção de redes de abastecimento de água, composto por diversos equipamentos e materiais, mediante a alocação de alternativas de manutenção, com vistas à redução de manutenções desnecessárias, atendendo a critérios previamente estabelecidos.

Os processos de ordenação individual e ordenação agregada apresentados no Modelo-2 enfatizam aspectos relevantes que dizem respeito à natureza dos conflitos de decisão em grupo e agrega critérios associados a esses aspectos aferidos segundo a estrutura de preferência do decisor.

A análise de sensibilidade demonstra que o Modelo-2 é bastante robusto, uma vez que variações nos pesos dos decisores, no modelo de agregação não afetaram o resultado final.

Os resultados obtidos da aplicação dos modelos se mostraram coerentes com as expectativas iniciais para as principais problemáticas de redes encontradas na gestão da manutenção de redes do abastecimento de água. Além disso, os resultados também foram consistentes quando da análise de sensibilidade realizada sobre decisores, cujos valores foram obtidos por elicitación. Ou seja, os modelos foram robustos para as variações produzidas sobre aqueles elementos de natureza subjetiva.

No primeiro modelo de classificação (Modelo-1), as expectativas foram comprovadas em função de que as classes geradas após a aplicação do método ELECTRE-TRI, atenderam ao que se esperava, enquadrando as alternativas consideradas importantes na visão do decisor, nas classes de mais alta criticidade.

Esses fatos corroboram com a idéia de que os modelos apresentados podem ser aplicados para quaisquer outros conjuntos de instalações e se constituem como ferramentas bastante úteis no apoio à decisão, uma vez que incorporam a estrutura de preferência do decisor, mediante uma abordagem multicritério adequada à natureza do problema sob estudo.

As questões relativas às técnicas de manutenção para reabilitação de redes no abastecimento de água não foram devidamente aprofundadas, pois o objetivo final deste estudo é fornecer alternativas preferidas por um grupo de decisores a serem aplicadas em áreas de medição de vazão prioritárias, conforme critérios pré-estabelecidos. Depois deste resultado um novo estudo poderia ser desenvolvido com a aplicação das técnicas mais detalhadas de manutenção, as quais envolveriam um tratamento estatístico mais avançado. Essas técnicas estão implícitas nas alternativas elencadas para a implementação dentro das classes resultantes.

Este estudo é também perfeitamente associado às filosofias TPM e de excelência em qualidade, pois procura aprimorar as decisões dos gestores dentro dos pilares que regem os programas eficientes de manutenção, especificamente aplicados à manutenção de redes nos sistemas de abastecimento de água.

## 6.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

A seguir são apresentadas algumas sugestões para a elaboração de futuros trabalhos:

- ✓ De forma geral, o modelo de classificação pode ser estendido para estruturar problemas onde haja fluxo e medição das ocorrências nas áreas onde ocorre esse fluxo, por exemplo: transporte (fluxo de pessoas e automóveis), etc;
- ✓ Pode-se também desenvolver no modelo o uso da informática, fazendo com que parte do processo se desenvolva via internet, sendo especialmente útil para os decisores que estejam separados por grandes distâncias geográficas;
- ✓ Pode-se desenvolver no *software* criado no Modelo-2 um módulo que se conecte com a aplicação do ELECTER-TRI do Modelo-1 e também uma versão que atenda um número ilimitado de alternativas, decisores e critérios, proporcionando a aplicação para qualquer situação genérica.

Também vale ressaltar que, apesar dos modelos multicritérios de classificação e ordenação em grupo apresentados neste trabalho terem sido direcionados para problemas de gestão da manutenção de redes em sistemas de abastecimento de água, suas utilizações não estão restritas apenas a este contexto.

De forma geral, pode-se ampliar o panorama da utilização dos modelos propostos para uma análise de gerenciamento em outros setores do abastecimento de água e de outros segmentos correlatos, de forma que possam ser utilizados para estruturar problemas nas mais diversas áreas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABU-TALED, M.; MARESCHAL, B. Water resources planning in the middle east: application of the PROMETHEE V multicriteria method. *European Journal of Operational Research*, v. 81, p. 500-511, 1995.
- ACKOFF, R. The future of operational research is past. *Journal of the Operational Research Society* 30, 93–104, 1979.
- ACKOFF, R. *Creating the Corporate Future*. Wiley, New York, 1981.
- ALENCAR, L.H. & ALMEIDA, A.T. Multicriteria Decision Group Model for Suppliers Selection. *Pesquisa Operacional*, v. 28, n.2, p.321-337, 2008.
- ALENCAR, L.H.; ALMEIDA, A.T. & MORAIS, D.C. A multicriteria group decision model aggregating the preferences of decision-makers based on ELECTRE methods. *Pesquisa Operacional*, v.30, n.3, p.687-702, 2010.
- ALMEIDA, A.T. & CAMPELLO DE SOUZA, F.M. *Gestão da manutenção na direção da competitividade*, Editora Universitária da UFPE, Recife, 2001.
- ARROW K.J., RAYNAUD H. *Social choice and multicriterion decision making*, M.I.T. Press, Cambridge, 1986.
- AWWA. American Water Works Association. 3rd Edition M36 Manual Water Audits and Loss Control Programs, BMP 1.2 Water Loss Control, 2009.
- BELTON, V. & STEWART, T. J. *Multiple Criteria Decision Analysis*. Kluwer Academic Publishers, 2002.
- BOAVENTURA NETTO, P. O. *Grafos: teoria, modelos, algoritmos*. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2003.
- BOUYSSOU, D. Building Criteria: A Prerequisite for MCDA. In: BANA E COSTA, C. A. *Readings in Multiple Criteria Decision Aid*. Alemanha: Springer-Verlag, p. 58–80, 1990.
- CABRAL, J.P.S. *Organização e gestão da manutenção: dos conceitos à prática*. Lisboa: Lidel edições técnicas Lda 6ª edição, 2006
- CHECKLAND, P. From optimizing to learning: A development of systems thinking for the 1990s. *Journal of the Operational Research Society* 36 (9), 757–768, 1985.
- CHOI, D.J.; PARK, H. Analysis of water privatization scenarios in Korea with multi-criteria decision making techniques. *Aqua*, v. 50, n .6, p. 335-352, 2001.
- COHON, J.L. *Multiobjective Programming Models and Planning*. New York: Academic Press, 1978.

- CONROY, P. Achieving a cost effective rehabilitation solution. Chartered Institution of Water and Environmental Management Training day seminar on "The true cost of pipelines", Swindon, UK, 1996
- COPELAND, A.H. A 'reasonable' social welfare function, Notes from a seminar on applications of mathematics to the social sciences; University of Michigan, 1951.
- COSTA, H. G.; FREITAS, A. L. P. Aplicação do método Electre Tri à classificação e satisfação de clientes: um estudo de caso em um curso de extensão universitária. Revista Portuguesa e Brasileira de Gestão, INDEG/ISCTE, Lisboa, Portugal, v.4, n.4, p.66-76, out./dez. 2005.
- CUIGNET, R. Management de la Maintenance. Paris: Dunod, 2<sup>ème</sup> edition, 2002.
- DAMASO, V.C. & GARCIA, P.A.A. Testing and preventive maintenance scheduling optimization for aging systems modeled by generalized renewal process. Pesquisa Operacional, v. 29, n. 3, p.563-576, 2009.
- DI FEDERICO, V., MAZZACANE, S., & SCHIATTI, M. Active Control of Water Distribution Systems: The Emilia Romagna Experience. 5th Conference on Pipeline Construction, Hamburg, 1998.
- DIAS, L. C. & CLÍMACO, J. N. Dealing with imprecise information in group multicriteria decisions: a methodology and GDSS architecture. European Journal of Operational Research, v.160, p. 291-301, 2005.
- DYSON, R., O'BRIEN, F. (Eds.) Strategic Development: Methods and Models. Wiley, Chichester, 1998.
- ELECTRE TRI 2.0a software. Methodological guide and user's manual. LAMSADE Laboratory, Available:<[www.lamsade.dauphine.fr/mcda/biblio/PDF/mous3doc199.pdf](http://www.lamsade.dauphine.fr/mcda/biblio/PDF/mous3doc199.pdf)>
- FLOOD, R., JACKSON, M. Creative Problem Solving. Wiley, London, 1991.
- FRANCO, L., CUSHMAN, M., ROSENHEAD, J. Project review and learning in the construction industry: Embedding a problem structuring method within a partnership context. European Journal of Operational Research 152 (3), 586–601, 2004.
- GOMES JÚNIOR, S. F., SOARES DE MELLO, J. C. C. B. Emprego de Métodos Ordinais Multicritério na Análise do Campeonato Mundial de Fórmula 1. Anais do X SPOLM, Rio de Janeiro, 2007.
- GOMES, L. F. A.; GOMES, C. F. S. ALMEIDA, A. T. de. Tomada de Decisão Gerencial: O Enfoque Multicritério. Rio de Janeiro. Ed. Atlas, vol.1, 2002.
- GOMES L. F. A. M.; ARAYA, M. C. G.; CARIGNANO, C. Tomada de decisões em cenários complexos: introdução aos métodos discretos do apoio multicritério à decisão. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004.
- GOMES L. F. A. M.; GOMES, C. F. S.; ALMEIDA, A. T. Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério. São Paulo: Atlas, 2<sup>a</sup> ed., 2006.

- GOMES, L. F. A. M. Teoria da Decisão. São Paulo: Thomson Learning, Coleção debates em administração, 2007
- HAIKOWICZ, S. & COLLINS, K. A review of multiple criteria analysis for water resources planning and management. *Water Resour Manag* 21:1553–1566, 2007.
- HAIKOWICZ, S. Supporting multi-stakeholder environmental decisions. *J Environ Manag* 88: 607–614, 2008.
- HARALAMBOPOULOS, D. A. & POLATIDIS, H. Renewable energy projects: structuring a multicriteria group decision-making framework. *Renewable Energy*, v.28, p. 961-973, 2003.
- HARNDEN, R. The languaging of models: The understanding and communication of models with particular reference to Stafford Beer's cybernetic model of organization structure. *Systems Practice* 3 (3), 289–302, 1990.
- HERZ, R. Ageing processes and rehabilitation needs of drinking water distribution networks. *J. Water SRT-Aqua* 45 (pp. 221-231), 1996
- HERZ, R. Exploring rehabilitation needs and strategies for water distribution networks. *J. Water SRT-Aqua* 47 (pp. 275-283), 1998
- HYDE, K.M.; MAIER, H.R.; COLBY, C.B. Reliability-based approach to multicriteria decision analysis for water resources. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 130, n. 6, p. 429-438, 2004.
- JARDIM, S.B. & LANNA, A.E.L.. Aplicabilidade de algumas técnicas multiobjetivo ao Processo Decisório no âmbito dos comitês de gerenciamento de Bacia hidrográfica. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, V 8, N.4, 2003.
- KANGAS, A.; KANGAS, J.; PYKÄLÄINEN, J. Outranking methods as tools in strategic natural resources planning. *Silva Fennica*, v. 35, n. 2, p. 215-227, 2001.
- KHEIRELDIN, K.; FAHMY, H. Multi-criteria Approach for Evaluating Long Term Water Strategies. *Water International*, v. 26, n. 4, p.527-535, 2001.
- LAMBERT, A.; HIRNER, W. International Water Data Comparisons Ltd. Llandudno, LL30 1SL, UK. Losses from Water Supply Systems: Standard Terminology and Recommended Performance Measures. (IWA) International Water Association). *The blue pages - The IWA information source on drinking water issues*, 2000.
- LANE, D. Should system dynamics be described as a "hard" or "deterministic" systems approach? *Systems Research and Behavioural Science* 17, 3–22, 2000.
- LE GAUFFRE, P. Diagnosis of urban water and wastewater infrastructures: development and use of presumption models. *European Commission COST programme C3: Diagnosis of urban infrastructures* (p. 12), 1997.
- LEI, J., & SAEGROV, S. Statistical approach for describing lifetimes of water mains– Case Trondheim municipality, Norway. *Proceedings of International Association on Water Quality 19<sup>th</sup> Biennial International Conference on Water Quality*, 1998.

- LEYVA-LÓPEZ, J. C.; FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, E. A new method for group decision support based on ELECTRE III methodology. *European Journal of Operational Research*, v.148, n. 1, p.14-27, 2003.
- MALANDAIN, J., LE GAUFFRE, P., & MIRAMOND, M. Organizing a decision support system for infrastructure maintenance: application to water supply systems. *Proceedings of First International Conference on New Information Technologies* (pp. 1013-1024), 1998.
- MINGERS, J., BROCKLESBY, J. Multimethodology: Towards a framework for mixing methodologies. *Omega* 25 (5), 489–509, 1997.
- MINGERS, J., GILL, A. (Eds.) *Multimethodology: Theory and Practice of Combining Management Science Methodologies*. Wiley, Chichester, 1997.
- MINGERS, J., ROSENHEAD, J. Diverse unity: Looking inward and outward. In: Rosenhead, J., Mingers, J. (Eds.), *Rational Analysis for a Problematic World Revisited: Problem Structuring Methods for Complexity, Uncertainty and Conflict*. Wiley, Chichester, pp. 337–355, 2001.
- MORAIS, D.C. Métodos multicritério de apoio a decisão no planejamento de sistemas de abastecimento de água. In: ALMEIDA, A. T.; COSTA, A. P. C. S. (Org.). *Aplicações com Métodos Multicritério de Apoio a Decisão*, p. 21-40. Recife: Editora Universitária, 2003.
- MORAIS, D. C.; ALMEIDA, A. T. Water supply system decision making using multicriteria analysis. *Water SA*, v. 32, n. 2, p. 229-235, 2006a.
- MORAIS, D. C.; ALMEIDA, A. T. Modelo de decisão em grupo para gerenciar perdas de água. *Pesquisa Operacional*, v. 26, n. 3, 2006b.
- MORAIS, D.C. & ALMEIDA, A.T. Water network rehabilitation: A group decision-making approach. *Water SA*, v.36, n.4, p.487-493, 2010.
- MOUSSEAU, V. & SLOWINSKI, R. Inferring an ELECTRE TRI Model from Assignment Examples. *Journal of Global Optimization*, n 12, p. 157-174, 1998.
- MOUSSEAU V.; FIGUEIRA J. & NAUX J. P. Using assignment examples to infer weights for ELECTRE TRI method: Some experimental results. *European Journal of Operational Research*. v. 130, n. 2, pp. 263-275, 2001.
- MOUSSEAU V.; FIGUEIRA J. & ROY B. *ELECTRE METHODS*. Université Paris-Dauphine., pp. 1-35, 2002.
- OLSON, D. L. - *Decision Aids for Election Problems*. Springer. 1996.
- OPRICOVIC, S. A compromise solution in water resources planning. *Water Resour Manag* 23:1549–1561, 2009.
- PHILLIPS, L. People-centered group decision support. In: Doukidis, G., Land, F., Miller, G. (Eds.), *Knowledge-Based Management Support Systems*. Ellis-Horwood, Chichester, pp. 208–224, 1989.

- PORTO, R. L. & AZEVEDO, L.G.T. Sistemas de Suporte a Decisões Aplicados a Problemas de Recursos Hídricos. In: PORTO, R. (org.) Técnicas quantitativas para gerenciamento de Recursos Hídricos. Porto Alegre: Editora da Universidade, 1998.
- PROST, Th., MIRAMOND, M., & LE GAUFFRE P. Conditions for the emergence and functioning of urban engineering decision support systems: contribution of the notion of risk. Proceedings of First International Conference on New Information Technologies (pp. 957-966), 1998.
- RAJU, K.S.; DUCKSTEIN, L. & ARONDEL, C. Multicriterion analysis for sustainable water resources planning: a case study in Spain. *Water Resour Manag* 14:435–456, 2000.
- RAJU, K.S. & KUMAR, D.N. Ranking irrigation planning alternatives using data envelopment analysis. *Water Resour Manag* 20:553–566, 2006.
- RITTEL, H., WEBBER, M. Dilemmas in a general theory of planning. *Policy Sciences* 4, 155–169, 1973.
- RODRIGUES, M., HATAKEYAMA, K. Analysis of the fall of TPM in companies. *Journal of Materials. Processing Technology*, Vol. 179, pp. 276–279, 2006.
- ROSENHEAD, J. (Ed.) *Rational Analysis for a Problematic World*. Wiley, Chichester, 1989.
- ROSTUM, J., DÖREN, L., & SCHILLING, W. Deterioration of the Built Environment: Buildings, roads and water systems. Proceedings of 10th European Junior Scientist Workshop. Norwegian University of Science and Technology, IVB-report B2-1997-2, 1997.
- ROSTUM, J., BAUR, R., SAEGROV, S., HÖROLD, S., & SCHILLING, W. Predictive service-life model for urban water infrastructure management. Proceedings of 8th International Conference on Urban Storm Drainage (to appear), 1999.
- ROY, B. Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode ELECTRE). *RIRO*, 8, 57-75, 1968.
- ROY, B., BERTIER, P. La méthode ELECTRE II. SEMA (Metra internacional), Note de travail 142, 1971.
- ROY, B.; HUGONNARD, J.C. Ranking of suburban line extension projects on the Paris metro system by multicriteria method. *Transpn. Res.* v.16, n.4, p.301-312, 1982.
- ROY, B e SKALKA, J. M. . ELECTRE IS: Aspécts methodologiques et guide d’utilization. Cahier du LAMSADE. Université de Paris–Dauphine. Paris: Fev. 1985.
- ROY, B. *Methodologie Multicrièrre d’aide à la Décision*. Paris, Editora Econômica, 1985.
- ROY, B. *Multicriteria Methodology for Decision Aiding*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- SAEGROV, S. Management of sewer system data in Norway. Proceedings of 11th European Sewage and Reuse Synposium, 1997

- SCHON, D. *Educating the Reflective Practitioner: Toward a New Design for Teaching and Learning in the Professions*. Jossey-Bass, San Francisco, 1987.
- SILVA, V.B.S.; MORAIS, D.C. & ALMEIDA, A.T. A Multicriteria Group Decision Model to Support Watershed Committees in Brazil. *Water Resources Management*, v.24, n.14, p.4075-4091, 2010.
- SNIS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Brasil, 1999. Disponível em: < <http://www.snis.gov.br/> >
- SNIS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Brasil, 2009. Disponível em: < <http://www.snis.gov.br/> >
- SORENSEN, L., VIDAL, R. *Strategi Som Laererproces-Seks Blode Metoder*. Handelshojskole Forlag, Copenhagen, 1999.
- SRDJEVIC, B. Linking analytical hierarchy process and social choice methods to support group decision-making in water management. *Decision Support System*, v.42, p. 2261-2273, 2007.
- SUNDAHL, A.C. *Diagnosis of water pipeline condition*. University of Lund, Sweden (Thesis for Lic. Techn.), 1996.
- SZAJUBOK, N.K.; MOTA, C.M.M.; ALMEIDA, A.T. Use of the multi criteria method ELECTRE TRI for classification of inventory in the construction. *Pesquisa Operacional*, v.26, n.3, p.625-648, 2005.
- TROJAN, F. MORAIS, D. C. Using Electre Tri to support maintenance of water distribution networks. *Artigo aceito para publicação, Pesquisa Operacional* , 2012.
- TROJAN, F. MARÇAL, R. F. M. *Desenvolvimento de um sistema de monitoramento especializado integrando-o aos processos de gestão de uma empresa de abastecimento público de água visando a redução de perdas do produto*. Dissertação de Mestrado. UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná), PPGEP, 2006.
- ULRICH, W. Reflective practice in the civil society: The contribution of critically systemic thinking. *Reflective Practice* 1 (2), 247–268, 2000.
- UNDP. *United Nations Development Program – Human Development Report*, 2006. Disponível em: < <http://www.data360.org/> >
- VENNIX, J. *Group Model Building: Facilitating Team Learning Using Systems Dynamics*. Wiley, London, 1996.
- VINCKE, P. *Multicriteria Decision-Aid*. John Wiley & Sons Ltd. ISBN: 0-471- 93184-5, 1992.
- WATER PAGES. Available at <http://www.corrosion-club.com/waterfigures.htm>, 2001
- WATSON, S., BUEDE, D. *Decision Synthesis: The Principles and Practice of Decision Analysis*. Cambridge University Press, Cambridge, 1987.

- WHO. World Health Organization Operation and Maintenance of Urban Water Supply and Sanitation Systems. A Guide for Managers. O&M Working Group of the Water Supply and Sanitation Collaborative Council, 1994.
- WORLD BANK, Managing Urban Water Supply and Sanitation: Operation and Maintenance. Department of Operations Evaluation, 2001.
- YU, W. ELECTRE TRI. Aspects Méthodologiques et Guide d'Utilisation. Document du LAMSADE, 74, Université de Paris - Dauphine, avril 1992.
- ZELNY, M. Multiple Criteria Decision Making. New York: MacGraw-Hill, 1982.
- ZUFFO, A.C. Seleção e aplicação de métodos multicriteriais ao planejamento ambiental de recursos hídricos. Tese (Doutorado), São Carlos, Universidade de São Paulo, 301p., 1998.

## APÊNDICE 1

Avaliação pelo modelo-2 com 5 grupos diferenciados de pós-graduação

	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$	$a_{15}$
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	A1B1	A1B2	A1B3	A2B1	A2B2	A2B3	A3B1	A3B2	A3B3
Decisor1	10°	15°	4°	3°	9°	2°	1°	14°	11°	13°	12°	6°	5°	7°	8°
Decisor2	5°	6°	14°	9°	7°	8°	3°	11°	12°	15°	4°	13°	1°	2°	10°
Decisor3	6°	2°	12°	4°	9°	15°	8°	10°	13°	3°	1°	5°	7°	14°	11°
Decisor4	12°	10°	14°	15°	13°	5°	1°	11°	7°	9°	8°	6°	4°	3°	2°
<b>Grupo1</b>	13°	12°	14°	11°	15°	10°	2°	9°	5°	1°	7°	4°	3°	8°	6°

	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$	$a_{15}$
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	A1B1	A1B2	A1B3	A2B1	A2B2	A2B3	A3B1	A3B2	A3B3
Decisor1	9°	3°	11°	15°	4°	13°	8°	5°	10°	1°	2°	6°	12°	14°	7°
Decisor2	10°	11°	15°	4°	9°	12°	14°	8°	6°	7°	13°	1°	2°	5°	3°
Decisor3	9°	11°	12°	8°	7°	13°	4°	3°	15°	6°	5°	2°	14°	10°	1°
Decisor4	2°	3°	4°	6°	10°	14°	9°	15°	12°	1°	11°	7°	13°	8°	5°
<b>Grupo2</b>	5°	4°	14°	9°	6°	15°	10°	8°	11°	2°	7°	3°	12°	13°	1°

	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$	$a_{15}$
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	A1B1	A1B2	A1B3	A2B1	A2B2	A2B3	A3B1	A3B2	A3B3
Decisor1	1°	2°	4°	6°	14°	5°	13°	9°	15°	12°	3°	11°	10°	7°	8°
Decisor2	15°	5°	8°	2°	13°	6°	1°	11°	7°	9°	12°	3°	14°	10°	4°
Decisor3	12°	7°	3°	10°	14°	8°	5°	2°	9°	4°	11°	6°	1°	15°	13°
Decisor4	1°	2°	6°	7°	15°	14°	3°	5°	13°	8°	12°	4°	9°	10°	11°
<b>Grupo3</b>	13°	1°	4°	7°	12°	3°	6°	2°	8°	5°	11°	9°	10°	14°	15°

	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$	$a_{15}$
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	A1B1	A1B2	A1B3	A2B1	A2B2	A2B3	A3B1	A3B2	A3B3
Decisor1	14°	15°	7°	5°	8°	6°	1°	11°	9°	3°	13°	2°	10°	12°	4°
Decisor2	8°	7°	11°	13°	15°	6°	14°	12°	3°	9°	10°	4°	1°	2°	5°
Decisor3	3°	4°	12°	8°	13°	10°	9°	15°	14°	7°	2°	1°	5°	6°	11°
Decisor4	14°	15°	5°	11°	4°	9°	13°	3°	7°	12°	10°	8°	6°	1°	2°
<b>Grupo4</b>	12°	13°	8°	11°	15°	7°	9°	14°	10°	4°	5°	1°	3°	2°	6°

	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{14}$	$a_{15}$
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	A1B1	A1B2	A1B3	A2B1	A2B2	A2B3	A3B1	A3B2	A3B3
Decisor1	10°	6°	5°	11°	1°	15°	12°	2°	7°	4°	9°	8°	3°	13°	14°
Decisor2	8°	11°	2°	15°	10°	14°	6°	1°	7°	3°	9°	12°	3°	4°	5°
Decisor3	6°	2°	3°	10°	15°	7°	11°	12°	13°	1°	4°	8°	5°	14°	9°
Decisor4	10°	8°	7°	12°	15°	11°	2°	13°	1°	4°	6°	5°	9°	14°	3°
<b>Grupo5</b>	7°	11°	10°	15°	8°	14°	3°	1°	4°	13°	9°	12°	2°	5°	6°

## APÊNDICE 2

Avaliação pelo modelo-2 com 5 grupos diferenciados de pós-graduação (resultado pelo software - Grupo 1)

**Aggregation of Preferences for Decision Group in the maintenance of water distribution - COPELAND**

Copeland-Method Remake Return Exit

**MATRIX OF EVALUATION TO THE COPELAND METHOD**

	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13	a14	a15
Dec-1	12	14	4	3	8	2	1	15	10	13	11	9	7	6	5
Dec-2	5	3	9	13	1	14	2	11	10	15	6	8	4	7	12
Dec-3	1	4	12	3	6	15	10	7	13	5	2	9	8	14	11
Dec-4	9	8	14	15	13	5	1	12	7	11	10	6	4	3	2

**Alter./Actions**

Altern.	Actions
a1	A1
a2	A2
a3	A3
a4	B1
a5	B2
a6	B3
a7	A1B1
a8	A1B2
a9	A1B3
a10	A2B1
a11	A2B2
a12	A3B3
a13	A3B1
a14	A3B2
a15	A3B3

**FINAL ORDENATION by COPELAND Method**

Alter.	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13	a14	a15
Order	5*	7*	13*	10*	3*	11*	1*	15*	12*	14*	8*	9*	2*	4*	6*
Dec-1	9*	13*	10*	4*	7*	3*	1*	15*	12*	14*	11*	8*	5*	6*	2*
Dec-2	5*	3*	9*	13*	1*	14*	2*	12*	11*	15*	6*	7*	4*	8*	10*
Dec-3	2*	6*	12*	3*	7*	15*	1*	13*	14*	11*	4*	8*	5*	10*	9*
Dec-4	9*	7*	14*	15*	11*	5*	1*	13*	8*	12*	10*	6*	4*	3*	2*

**CONDORCET MATRIX** Decisor with major importance: 4

a0	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13	a14	a15	SUM
a1	-		1	1	1			1		1	1					6
a2	1	-	1	1	1			1		1	1					8
a3			-	1					1							3
a4				-						1						2
a5			1	1	-			1	1			1				6
a6	1	1	1	1	1	-		1	1	1	1	1				11
a7	1	1	1	1	1	1	-	1	1	1	1	1	1	1	1	15
a8			1	1				-								3
a9	1	1		1				1	-	1	1					7
a10			1		1			1		-						4
a11			1	1	1			1		1	-					6
a12	1	1	1	1				1	1	1	1	-				9
a13	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	-			12
a14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-		13
a15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	14
SUM	8	8	13	14	10	5	1	13	9	12	10	7	4	3	2	-
	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13	a14	a15	
	-2	0	-10	-12	-4	6	14	-10	-2	-8	-4	2	8	10	12	

Alter./Actions

Alter.	Actions
a7	14
a15	12
a14	10
a13	8
a6	6
a12	2
a2	0
a9	-2
a1	-2
a11	-4
a5	-4
a10	-8
a8	-10
a3	-10
a4	-12

### APÊNDICE 3

Avaliação pelo modelo-2 com 5 grupos diferenciados de pós-graduação (resultado pelo software - Grupo 2)

**Aggregation of Preferences for Decision Group in the maintenance of water distribution - COPELAND**

Copeland-Method Remake Return Exit

**MATRIX OF EVALUATION TO THE COPELAND METHOD**

	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13	a14	a15
Dec-1	10	6	11	14	3	12	8	1	7	2	5	9	13	15	4
Dec-2	8	11	15	4	10	12	14	9	6	5	13	1	2	7	3
Dec-3	11	13	15	6	5	12	2	4	14	8	7	3	9	10	1
Dec-4	2	4	6	5	10	12	9	15	13	1	14	7	11	8	3

**Altern./Actions**

Altern.	Actions
a1	A1
a2	A2
a3	A3
a4	B1
a5	B2
a6	B3
a7	A1B1
a8	A1B2
a9	A1B3
a10	A2B1
a11	A2B2
a12	A3B3
a13	A3B1
a14	A3B2
a15	A3B3

**FINAL ORDENATION by COPELAND Method**

Alter.	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13	a14	a15
Order	7*	9*	15*	5*	6*	14*	8*	4*	13*	2*	12*	3*	10*	11*	1*
Dec-1	9*	6*	13*	11*	5*	15*	8*	3*	10*	2*	7*	4*	12*	14*	1*
Dec-2	8*	11*	15*	4*	9*	13*	12*	10*	7*	3*	14*	2*	5*	6*	1*
Dec-3	11*	12*	15*	6*	7*	13*	3*	4*	14*	5*	8*	2*	9*	10*	1*
Dec-4	4*	6*	13*	5*	9*	14*	7*	11*	12*	1*	15*	3*	10*	8*	2*

**CONDORCET MATRIX** Decisor with major importance: 4

a0	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13	a14	a15	SUM
a1	-	1	1	1	1	1	1	1	1		1		1	1		11
a2		-	1	1		1	1		1		1	1	1	1		10
a3			-			1							1	1		3
a4				-	1	1	1	1	1		1		1	1		10
a5		1	1		-	1			1	1	1	1				7
a6						-			1	1	1					2
a7			1		1	1	-	1	1		1		1			8
a8		1	1		1	1		-			1					6
a9			1					1	-		1					4
a10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	1	1	1	1	1	15
a11											-					2
a12	1			1	1	1	1	1	1		1	-	1	1		12
a13						1	1	1	1		1		-	1		5
a14					1	1	1	1	1		1			-		6
a15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	14
SUM	3	6	11	6	9	12	8	10	12	1	14	4	9	8	2	-
a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13	a14	a15		
8	4	-8	4	-2	-10	0	-4	-8	14	-12	8	-4	-2	12		

Left side of Condorcet Matrix: a10 14, a15 12, a12 8, a1 8, a4 4, a2 4, a7 0, a14 -2, a5 -2, a13 -4, a8 -4, a9 -8, a3 -8, a6 -10, a11 -12

## APÊNDICE 4

Avaliação pelo modelo-2 com 5 grupos diferenciados de pós-graduação (resultado pelo software - Grupo 3)

**Aggregation of Preferences for Decision Group in the maintenance of water distribution - COPELAND**

Copeland-Method Remake Return Exit

**MATRIX OF EVALUATION TO THE COPELAND METHOD**

	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13	a14	a15
Dec-1	7	2	4	11	8	14	5	1	10	3	12	9	6	13	15
Dec-2	11	1	3	10	13	6	4	2	8	5	12	9	7	14	15
Dec-3	13	6	7	12	14	10	4	2	9	1	8	5	3	15	11
Dec-4	11	1	3	10	13	6	4	2	8	5	12	9	7	14	15

**Altern./Actions**

Altern.	Actions
a1	A1
a2	A2
a3	A3
a4	B1
a5	B2
a6	B3
a7	A1B1
a8	A1B2
a9	A1B3
a10	A2B1
a11	A2B2
a12	A3B3
a13	A3B1
a14	A3B2
a15	A3B3

**FINAL ORDENATION by COPELAND Method**

Alter.	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13	a14	a15
Order	11*	2*	3*	10*	13*	9*	5*	1*	8*	4*	12*	7*	6*	14*	15*
Dec-1	11*	2*	4*	10*	13*	9*	5*	1*	8*	3*	12*	7*	6*	14*	15*
Dec-2	11*	1*	3*	10*	13*	6*	4*	2*	8*	5*	12*	9*	7*	14*	15*
Dec-3	11*	2*	4*	10*	13*	9*	5*	1*	8*	3*	12*	7*	6*	14*	15*
Dec-4	11*	1*	3*	10*	13*	6*	4*	2*	8*	5*	12*	9*	7*	14*	15*

**CONDORCET MATRIX** Decisor with major importance: 4

a0	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13	a14	a15	SUM
a1	-				1						1			1	1	4
a2	1	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	15
a3	1		-	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	12
a4	1			-	1						1			1	1	5
a5					-									1	1	3
a6	1			1	1	-			1		1	1	1	1	1	10
a7	1			1	1	1	-		1	1	1	1	1	1	1	12
a8	1		1	1	1	1	1	-	1	1	1	1	1	1	1	14
a9	1			1	1				-		1	1		1	1	7
a10	1			1	1	1			1	-	1	1	1	1	1	11
a11					1						-			1	1	3
a12	1			1	1						1	-		1	1	7
a13	1			1	1				1		1	1	-	1	1	9
a14														-	1	1
a15															-	1
SUM	10	1	2	9	13	6	4	2	7	5	11	9	7	13	15	-
	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13	a14	a15	
	-6	14	10	-4	-10	4	8	12	0	6	-8	-2	2	-12	-14	

Sum of Altern./Actions:

Altern.	Sum
a2	14
a8	12
a3	10
a7	8
a10	6
a6	4
a13	2
a9	0
a12	-2
a4	-4
a1	-6
a11	-8
a5	-10
a14	-12
a15	-14

## APÊNDICE 5

Avaliação pelo modelo-2 com 5 grupos diferenciados de pós-graduação (resultado pelo software - Grupo 4)

**Aggregation of Preferences for Decision Group in the maintenance of water distribution - COPELAND**

Copeland-Method Remake Return Exit

**MATRIX OF EVALUATION TO THE COPELAND METHOD**

	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13	a14	a15
Dec-1	9	15	7	5	8	6	1	10	11	4	12	3	14	13	2
Dec-2	12	9	8	13	15	6	14	11	4	10	7	2	3	1	5
Dec-3	8	3	12	10	13	11	7	14	15	5	2	1	4	6	9
Dec-4	9	13	8	11	7	5	15	1	3	14	10	4	12	2	6

**Altern./Actions**

Altern.	Actions
a1	A1
a2	A2
a3	A3
a4	B1
a5	B2
a6	B3
a7	A1B1
a8	A1B2
a9	A1B3
a10	A2B1
a11	A2B2
a12	A3B3
a13	A3B1
a14	A3B2
a15	A3B3

**FINAL ORDENATION by COPELAND Method**

Alter.	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13	a14	a15
Order	11*	14*	8*	12*	15*	4*	13*	10*	9*	7*	5*	1*	6*	2*	3*
Dec-1	10*	15*	7*	8*	11*	6*	5*	12*	13*	4*	9*	1*	14*	3*	2*
Dec-2	12*	9*	8*	13*	15*	7*	14*	10*	5*	11*	6*	2*	3*	1*	4*
Dec-3	12*	9*	11*	10*	13*	8*	7*	15*	14*	6*	5*	1*	2*	3*	4*
Dec-4	10*	14*	7*	12*	11*	5*	15*	6*	4*	8*	9*	1*	13*	2*	3*

**CONDORCET MATRIX** Decisor with major importance:

a0	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13	a14	a15	SUM
a1	-	1		1			1				1		1			5
a2		-					1			1						3
a3	1	1	-	1	1		1	1		1	1		1			10
a4		1		-	1		1						1			5
a5	1	1			-						1		1			4
a6	1	1	1	1	1	-	1	1		1	1		1			11
a7					1		-									2
a8	1	1		1	1		1	-	1		1		1	1		10
a9	1	1	1	1	1	1	1		-	1	1		1		1	12
a10	1			1	1		1	1		-						6
a11		1		1			1			1	-		1			6
a12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	1		1	14
a13		1					1			1			-			3
a14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	1	14
a15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	12
SUM	9	13	6	11	10	5	14	6	4	10	10	2	11	2	4	-
	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13	a14	a15	
	-4	-10	4	-6	-6	6	-12	4	8	-4	-4	12	-8	12	8	

	<<<<<
a12	12
a14	12
a15	8
a9	8
a6	6
a8	4
a3	4
a10	-4
a11	-4
a1	-4
a5	-6
a4	-6
a13	-8
a2	-10
a7	-12

## APÊNDICE 6

Avaliação pelo modelo-2 com 5 grupos diferenciados de pós-graduação (resultado pelo software - Grupo 5)

**Aggregation of Preferences for Decision Group in the maintenance of water distribution - COPELAND**

Copeland-Method Remake Return Exit

**MATRIX OF EVALUATION TO THE COPELAND METHOD**

	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13	a14	a15
Dec-1	14	9	6	10	2	15	13	1	3	5	4	7	8	12	11
Dec-2	11	6	12	14	10	15	2	1	4	7	8	13	3	5	9
Dec-3	9	1	2	11	15	4	13	12	14	6	7	8	3	10	5
Dec-4	10	8	7	12	15	11	2	13	1	4	6	5	9	14	3

**FINAL ORDENATION by COPELAND Method**

Alter.	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13	a14	a15
Order	11*	5*	8*	14*	13*	15*	9*	6*	1*	2*	3*	10*	4*	12*	7*
Dec-1	14*	9*	5*	13*	10*	15*	12*	1*	2*	3*	4*	7*	6*	11*	8*
Dec-2	13*	5*	9*	14*	10*	15*	2*	1*	4*	6*	7*	11*	3*	12*	8*
Dec-3	9*	1*	5*	14*	15*	12*	10*	11*	3*	4*	7*	8*	2*	13*	6*
Dec-4	10*	7*	6*	13*	15*	11*	2*	12*	1*	3*	4*	8*	9*	14*	5*

**CONDORCET MATRIX** Decisor with major importance: 4

a0	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13	a14	a15	SUM
a1	-			1	1	1		1						1		5
a2	1	-		1	1	1		1					1	1	1	9
a3	1	1	-	1	1	1		1				1	1	1		10
a4				-	1			1						1		3
a5					-											1
a6				1	1	-		1						1		5
a7	1	1	1	1	1	1	-			1	1	1	1	1	1	13
a8					1		1	-	1					1		5
a9	1	1	1	1	1	1	1		-	1	1	1	1	1	1	13
a10	1	1	1	1	1	1		1		-	1	1	1	1		12
a11	1	1	1	1	1	1		1			-	1	1	1		11
a12	1	1		1	1	1		1				-	1	1		8
a13	1			1	1	1		1					-	1	1	8
a14					1									-		1
a15	1		1	1	1	1		1		1	1	1		1	-	11
SUM	9	7	6	11	15	11	3	11	1	4	5	6	8	13	5	-
	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12	a13	a14	a15	
	-4	2	4	-8	-14	-6	10	-6	12	8	6	2	0	-12	6	

**Altern./Actions**

Altern.	Actions
a1	A1
a2	A2
a3	A3
a4	B1
a5	B2
a6	B3
a7	A1B1
a8	A1B2
a9	A1B3
a10	A2B1
a11	A2B2
a12	A3B3
a13	A3B1
a14	A3B2
a15	A3B3

	<<<<<
a9	12
a7	10
a10	8
a11	6
a15	6
a3	4
a2	2
a12	2
a13	0
a1	-4
a6	-6
a8	-6
a4	-8
a14	-12
a5	-14

## APÊNDICE 7

### Formulários do Modelo-2 apresentado aos decisores

Área: \_\_\_\_\_

Responsabilidades:

---



---



---



---



---



---



---

### OBJETIVOS

- Objetivos Ambientais:
  1. Redução do desperdício de água tratada;
  2. Promover correto uso da água;
- Objetivos Econômicos:
  3. Redução dos custos relativos à manutenção;
  4. Redução dos custos relativos às perdas físicas;
  5. Investimentos em manutenção preventiva.

### ESTRATÉGIAS E AÇÕES DE INTERVENÇÃO

<b>Estratégia A</b>	<b>Redução do índice de Perdas</b>
<b>A1</b>	Redução de pressão nas redes de distribuição;
<b>A2</b>	Realização de Setorização de Pressão e Manobra;
<b>A3</b>	Monitoramento de pressão e vazão nas redes (Automação).
<b>Estratégia B</b>	<b>Crescimento Econômico</b>
<b>B1</b>	Ações de manutenção preventiva, redução dos custos com manutenção;
<b>B2</b>	Investimentos em novos materiais, redução de vazamentos;
<b>B3</b>	Treinamento em manutenção preventiva.

*Quadro – Estratégias e ações de intervenção*

**ALTERNATIVAS DE SOLUÇÃO**

Altern.	Ações								
a1	A1	a4	B1	a7	A1B1	a10	A2B1	a13	A3B1
a2	A2	a5	B2	a8	A1B2	a11	A2B2	a14	A3B2
a3	A3	a6	B3	a9	A1B3	a12	A2B3	a15	A3B3

*Quadro – Alternativas de solução*

Alternativas	Ações	Ações
<b>1</b>	A1	- Redução de pressão nas redes de distribuição;
<b>2</b>	A2	- Realização de setorização de pressão e manobra;
<b>3</b>	A3	- Automação;
<b>4</b>	B1	- Manutenção preventiva, redução dos custos com manutenção;
<b>5</b>	B2	- Investimentos em novos materiais;
<b>6</b>	B3	- Treinamento em manutenção preventiva;
<b>7</b>	A1 B1	- Redução de pressão nas redes de distribuição; - Manutenção preventiva, redução dos custos com manutenção.
<b>8</b>	A1 B2	- Redução de pressão nas redes de distribuição; - Investimentos em novos materiais;
<b>9</b>	A1 B3	- Redução de pressão nas redes de distribuição; - Treinamento em manutenção preventiva;
<b>10</b>	A2 B1	- Realização de setorização de pressão e manobra; - Treinamento em manutenção preventiva.
<b>11</b>	A2 B2	- Realização de setorização de pressão e manobra - Investimentos em novos materiais;
<b>12</b>	A2 B3	- Realização de setorização de pressão e manobra - Treinamento em manutenção preventiva;
<b>13</b>	A3 B1	- Automação - Treinamento em manutenção preventiva.
<b>14</b>	A3 B2	- Automação - Investimentos em novos materiais.
<b>15</b>	A3 B3	- Automação - Treinamento em manutenção preventiva.

**CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO****CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO**

<b>Critérios de Avaliação</b>	<b>Especificação</b>
<b>Critérios Operacionais</b>	C1. Índice de Perdas Físicas; C2. Número instalado de setores de manobra; C3. Nível de automação do sistema.
<b>Critérios Econômicos</b>	C4. Custo com manutenção corretiva; C5. Custo com investimento em treinamento e programas de manutenção preventiva; C6. Custo do Investimento

*Quadro – Critérios de avaliação***TABELA DE VALORES E ESCALAS DOS CRITÉRIOS**

<b>Critérios</b>	<b>Níveis</b>	<b>Escala Numérica</b>
<b>C1 (%)</b>	< 20	1,00
	de 21 a 35	0,75
	de 36 a 45	0,50
	de 46 a 55	0,25
	de 56 a 70	0,00
<b>C2</b>	Manter	0,00
	Aumentar	0,50
	Aumentar Significativamente	1,00
<b>C3 (%)</b>	< 60	0,00
	de 60 a 80	0,50
	>80	1,00
<b>C4</b>	Diminuir	1,00
	Aumentar	0,50
	Aumentar Significativamente	0,00
<b>C5</b>	Diminuir	1,00
	Aumentar	0,50
	Aumentar Significativamente	0,00
<b>C6</b>	Baixo	1,00
	Médio	0,50
	Alto	0,00

*Tabela – Tabela de valores e escalas dos critérios**B → Baixo; M → Médio; A → Alto***PESOS DOS CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO**

<b>Critérios</b>	<b>Decisor</b>	<b>Decisor</b>	<b>Decisor</b>	<b>Decisor</b>
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
C1	0,20	0,40	0,30	0,30
C2	0,10	0,10	0,10	0,20
C3	0,10	0,20	0,10	0,10
C4	0,10	0,05	0,10	0,10
C5	0,20	0,05	0,10	0,10
C6	0,30	0,20	0,30	0,20

*Tabela – Pesos dos critérios de avaliação*

**MATRIZ DE AVALIAÇÃO INDIVIDUAL DAS ALTERNATIVAS X CRITÉRIOS**

	- Redução de pressão nas redes de distribuição;	- Realização de setorização de pressão e manobra;	- Automação;	- Manutenção preventiva, redução dos custos com manutenção;	- Investimentos em novos materiais;	- Treinamento em manutenção preventiva;	- Redução de pressão nas redes de distribuição; - Manutenção preventiva, redução dos custos com manutenção.	- Redução de pressão nas redes de distribuição; - Investimentos em novos materiais;	- Redução de pressão nas redes de distribuição; - Treinamento em manutenção preventiva;	- Realização de setorização de pressão e manobra; - Manutenção preventiva, redução dos custos com manutenção;	- Realização de setorização de pressão e manobra - Investimentos em novos materiais;	- Realização de setorização de pressão e manobra - Treinamento em manutenção preventiva.	- Automação - Manutenção preventiva, redução dos custos com manutenção.	- Automação - Investimentos em novos materiais.	- Automação - Treinamento em manutenção preventiva.
<b>Alternativas</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>A3</b>	<b>B1</b>	<b>B2</b>	<b>B3</b>	<b>A1B1</b>	<b>A1B2</b>	<b>A1B3</b>	<b>A2B1</b>	<b>A2B2</b>	<b>A2B3</b>	<b>A3B1</b>	<b>A3B2</b>	<b>A3B3</b>
<b>Crítérios</b>															
<b>C1- Perdas</b>															
<b>C2- Setores Manobra</b>															
<b>C3- Automação</b>															
<b>C4 – Custo Manut. Cor.</b>															
<b>C5 – Custo treinamento</b>															
<b>C6 – Custo Investimento</b>															

## APÊNDICE 8

## Software ELECTRE TRI – Desempenho no Modelo-1

Performances of Alternatives						
	Cr01	Cr02	Cr03	Cr04	Cr05	Cr06
A0001	23	29	55	87	23	50
A0002	85	100	52	94	100	25
A0003	48	44	40	61	48	25
A0004	43	39	72	80	32	10
A0005	31	26	50	53	30	10
A0006	73	70	49	72	76	25
A0007	100	100	74	75	100	100
A0008	89	76	68	60	86	30
A0009	69	77	87	78	66	25
A0010	73	73	69	68	75	25
A0011	86	82	53	70	87	35
A0012	58	47	59	59	57	15
A0013	87	82	55	63	86	100
A0014	70	61	52	61	69	100
A0015	100	100	46	74	100	50
A0016	48	52	89	73	46	15
A0017	100	100	63	64	100	50
A0018	100	100	44	64	100	30
A0019	45	44	82	67	44	25
A0020	23	25	62	69	23	25
A0021	25	21	87	60	24	25
A0022	19	17	89	62	19	15
A0023	48	46	72	66	47	25
A0024	77	80	88	71	79	15
A0025	100	100	53	62	100	20
A0026	56	84	37	100	67	20
A0027	100	100	100	68	100	25
A0028	49	28	50	72	49	20
A0029	100	100	70	72	100	45
A0030	73	76	80	71	72	40

## APÊNDICE 9

### Software ELECTRE TRI – Comparações

	Pr04	Pr03	Pr02	Pr01
A0001	>	R	<	<
A0002	>	R	R	<
A0003	>	I	<	<
A0004	>	>	R	<
A0005	>	R	<	<
A0006	>	R	R	<
A0007	>	>	>	R
A0008	>	R	R	<
A0009	>	R	R	<
A0010	>	R	R	<
A0011	>	R	R	<
A0012	>	>	<	<
A0013	>	>	R	<
A0014	>	>	R	<
A0015	>	>	R	R
A0016	>	>	R	<
A0017	>	>	R	R
A0018	>	R	R	R
A0019	>	>	R	<
A0020	>	R	<	<
A0021	>	R	<	<
A0022	>	R	R	<
A0023	>	>	<	<
A0024	>	R	R	<
A0025	>	R	R	R
A0026	>	R	R	<
A0027	>	R	R	R
A0028	>	R	<	<
A0029	>	>	R	R
A0030	>	R	R	<

## APÊNDICE 10

## Software ELECTRE TRI – Resultados da classificação

Alternative Name	Pessimistic Assignment	Optimistic Assignment
A0001	C04	C03
A0002	C04	C02
A0003	C03	C03
A0004	C03	C02
A0005	C04	C03
A0006	C04	C02
A0007	C02	C01
A0008	C04	C02
A0009	C04	C02
A0010	C04	C02
A0011	C04	C02
A0012	C03	C03
A0013	C03	C02
A0014	C03	C02
A0015	C03	C01
A0016	C03	C02
A0017	C03	C01
A0018	C04	C01
A0019	C03	C02
A0020	C04	C03
A0021	C04	C03
A0022	C04	C02
A0023	C03	C03
A0024	C04	C02
A0025	C04	C01
A0026	C04	C02
A0027	C04	C01
A0028	C04	C03
A0029	C03	C01
A0030	C04	C02

## APÊNDICE 11

### Software ELECTRE TRI – Classe1 e Classe2

Category Name	Pessimistic Assignment	Optimistic Assignment
<b>C01</b>		<b>A0007</b>
C02		A0015
C03		A0017
C04		A0018
C05		A0025
		A0027
		A0029

Category Name	Pessimistic Assignment	Optimistic Assignment
C01	<b>A0007</b>	<b>A0002</b>
<b>C02</b>		A0004
C03		A0006
C04		A0008
C05		A0009
		A0010
		A0011
		A0013
		A0014
		A0016
		A0019
		A0022
		A0024
		A0026
		A0030

## APÊNDICE 12

### Software ELECTRE TRI – Classe3 e Classe4

Category Name	Pessimistic Assignment	Optimistic Assignment
C01	A0003	A0001
C02	A0004	A0003
<b>C03</b>	A0012	A0005
C04	A0013	A0012
C05	A0014	A0020
	A0015	A0021
	A0016	A0023
	A0017	A0028
	A0019	
	A0023	
	A0029	

Cutting Level: 0.76

Category Name	Pessimistic Assignment	Optimistic Assignment
C01	A0001	
C02	A0002	
C03	A0005	
<b>C04</b>	A0006	
C05	A0008	
	A0009	
	A0010	
	A0011	
	A0018	
	A0020	
	A0021	
	A0022	
	A0024	
	A0025	
	A0026	
	A0027	
	A0028	
	A0030	

Cutting Level: 0.76

## APÊNDICE 13

### Software ELECTRE TRI – Classe5 e Estatística

**Assignment by Category**

Category Name	Pessimistic Assignment	Optimistic Assignment
C01		
C02		
C03		
C04		
<b>C05</b>		

Cutting Level: 0.76

**Statistics of Assignment**

Category Name	Pessimistic Assignment	Optimistic Assignment
<b>C01</b>	<b>0 % (0 of 30)</b>	<b>23 % (7 of 30)</b>
C02	3 % (1 of 30)	50 % (15 of 30)
C03	37 % (11 of 30)	27 % (8 of 30)
C04	60 % (18 of 30)	0 % (0 of 30)
C05	0 % (0 of 30)	0 % (0 of 30)

Cutting Level: 0.76