

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA

**OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA DA OPERAÇÃO DE UM  
SISTEMA ADUTOR DE ÁGUA TRATADA UTILIZANDO  
ALGORITMOS EVOLUCIONÁRIOS MULTIOBJETIVO**

**KATHERYNE LIZBETH NUÑEZ BARDALES**

*Dissertação apresentada para obtenção do grau  
de Mestre no Programa de Pós-Graduação em  
Tecnologias Ambientais da Universidade Federal  
de Mato Grosso do Sul, na área de concentração  
em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos.*

ORIENTADOR: Prof. Dr. Amâncio Rodrigues da Silva Jr.  
CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Peter Batista Cheung

Campo Grande, MS  
**2007**

*A mis abuelitas, Antonia e Nieves, por  
serem mulheres admiráveis, corajosas,  
fortes e cheias de amor.*

*A minha mãe e meu pai, Deissy e  
Willy, por cada lição na vida*

# Agradecimentos Especiais

Primeiramente e sempre a *Deus* pelo dom de vida, por estar do meu lado e ter me sustentado em todo momento.

Ao Prof. Dr. Amâncio Rodrigues da Silva Jr. pela orientação, disposição, conselhos e apoio desde minha chegada em Campo Grande.

Ao Prof. Dr. Peter Batista Cheung pela amizade, paciência, orientação e ajuda constante na realização do programa computacional desenvolvido nesta dissertação.

Ao Prof. Dr. Robert Schiaveto de Souza pelo recebimento, incentivo e apoio desde o início do meu mestrado e pelas contribuições nesta dissertação.

Ao Prof. Carlos Nobuyoshi Ide pela confiança ao me incluir no LENHS/CO, projeto que me fez conhecer novas áreas da energia.

Ao Prof. Kennedy Francis Roche pela amizade e as conversas de estrangeiros compartilhadas.

A todos os professores das disciplinas cursadas na pós-graduação, que foram de grande valia e agregaram muito valor neste trabalho e na minha vida.

A Meire, secretária do PGTA, sempre prestes para me ajudar em todo o que for possível, obrigada pela dedicação e amizade.

A Isabel, secretária do DEL, pela amizade, disposição, gentileza e ajuda brindada.

A todos meus colegas do Mestrado, especialmente para Ernesto, Lilian, Mauricio, Tatiana e Lenice, pela amizade e apoio constante.

Ao amigo Narumi pela ajuda na revisão deste trabalho e por me socorrer com minhas dúvidas com o programa computacional desenvolvido.

A ELETROBRÁS mediante o programa PROCEL SANEAR pela infra-estrutura e equipamentos concedidos ao Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento — LENHS/CO.

A COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR, CAPES, pela concessão da bolsa de estudos, sem a qual esta pesquisa não seria possível.

# Agradecimentos

Primeiramente e sempre a ***Deus*** pelo dom de vida, por estar do meu lado a cada dia, por ter me sustentado nos momentos mais difíceis e pela força para poder continuar.

A minha mãe *Deissy Bardales Flores de Nuñez* e meu pai *Willy Nuñez Rivera*, pelo amor, apoio e amizade, por estar sempre presentes em cada momento da minha vida, por me ensinarem a viver e lutar por meus sonhos.

A minha irmã, *Evelyn Lizie*, grande amiga e companheira, obrigada pelo amor incondicional e pela ajuda com o *abstract* desta dissertação.

Aos meus *abuelitos Camilo, Nieves e Antonia e a toda minha familia*, que ainda longe fisicamente, sempre presentes com seu amor, carinho, alegria e torcendo pelo meu sucesso.

A minhas amigas do alma e de toda a vida, *Sandra, Heidy, July, Mónica, Fanny e Sally*, pela amizade sincera e o amor sempre demonstrado.

A todos meus amigos e amigas da *Universidad Nacional de Ingenieria* em Lima, especialmente para meus amigos da *FIM: Donayre, Félix e Norvick*, pelos momentos vividos e pela amizade incondicional.

A meus amigos de Campo Grande, *Lucia, Vino, Stone e Laurinha*, que me receberam de braços abertos e me brindaram muito apoio, carinho e amizade desde minha chegada ao Brasil.

A *Thais Gisele Torres*, amiga do coração, obrigada por ter me recebido na sua casa, pelo amor, alegria, amizade, gentileza e sinceridade. Por sempre continuar com nosso lema: "vamos nessa, amiga!!!".

A *Lenir Lopes dos Santos*, amiga do alma, porque depois de conhecê-la aprendi uma nova forma de ver a vida, obrigada pelos conselhos, amizade, dedicação e carinho.

Aos *amigos peruanos* que conheci no Brasil, especialmente para *Melitón, Herbert e Graciela*, que fizeram minha vida mais alegre e com quem compartilhe as saudades pátrias.

A *TODOS* por todos e cada um dos momentos vividos e que fazem a diferença no dia a dia. A *TODOS* que estiveram comigo em mais uma etapa da minha vida, de coração, muito obrigada!!!

# RESUMO

NUÑEZ, K. (2007). *Otimização Energética da operação de um sistema adutor de água tratada utilizando Algoritmos Evolucionários Multiobjetivo*. Campo Grande, 2007. 132 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil.

A otimização energética de um sistema adutor de água tem como objetivo principal o atendimento das demandas de consumo a um menor custo energético e operacional mediante a operação estável das bombas. Sob a ótica de otimização multiobjetivo, este trabalho visa desenvolver uma técnica para a elaboração de planos ótimos de operação das bombas com o fim de minimizar custos energéticos e maximizar a confiabilidade hidráulica em um horizonte de operação determinado de 24 horas, mas atendendo as restrições operacionais próprias do sistema. O modelo computacional para análise proposto neste trabalho, é desenvolvido sob três fases. A primeira fase, envolve a busca de informações do sistema, possibilitando a elaboração de um modelo adequado para as simulações hidráulicas. A segunda fase, identifica um conjunto de soluções ótimas através dos algoritmos evolucionários multiobjetivo e que deverá interagir com o simulador hidráulico na busca pelas melhores soluções possíveis. Finalmente, a terceira fase do modelo que tem como objetivo apresentar as soluções ótimas, identificadas na etapa de avaliação e transformá-las em planos alternativos de operação das bombas. A metodologia foi aplicada em um sistema adutor de Campo Grande (MS) para fornecer estratégias operacionais satisfatórias na programação do funcionamento das bombas e também foram avaliadas estratégias para a implementação de programas de efficientização de água e energia. Os resultados obtidos para o sistema original apresentam planos ótimos de programação para o funcionamento das bombas com menores custos energéticos e operacionalmente melhores quando comparadas com a operação atual do sistema. Os resultados obtidos para a implementação de programas de efficientização mostram que a mudança para uma Tarifa Horo-sazonal Azul não seria conveniente, pois os custos se incrementam, enquanto, que corrigir o fator de potência resultaria em diminuição de custos e melhora do sistema energético.

Palavras-chave: operação ótima, eficiência energética, algoritmos evolucionários.

# ABSTRACT

NUÑEZ, K. (2007). Energy optimization of the operation of a water treated adductor system using Multiobjective Evolutionary Algorithm., 2007. 132 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brazil.

The energy optimization of a water adductor system resides in the attendance of consumer demands at a lower energy cost and operational by the stable operation of the pumps. Under the optical of the optimization of several objectives, this work aims to develop a technique for developing optimal flats of operation of the pumps in order to minimize the energy costs and maximize hydraulics trustworthiness in a horizon of operation determined on 24 hours, but assisting operational constraints inherent in the system. The computational model for analysis presented in this work, is developed in three phases. The first phase involves seeking information from the system, enabling the development of a suitable model for the hydraulic simulations. The second phase identifies a set of optimal solutions through evolutionary algorithms that must interact with the simulator in the search for the best possible solutions. Finally, the third phase of the model that aims to present the best solutions, identified in the evaluation stage and transform them into alternative flats of operation of the pumps. The methodology was applied in a adduction system of Campo Grande (MS) to provide successful operational strategies in the programming of the operation of the pumps and also were evaluated strategies to implement efficiency programs of water and energy. The results obtained for the original system presents flats optimal of programming for the operation of pumps with lower energy costs and better operationally than the current operation of the system. The results obtained for the implementation of efficiency programs show that the change for a Blue Price would not be desirable, because the costs are increasing, while, to correct the factor power will result the decreasing costs and improved energy system.

Keywords: optimum operation, efficiency energy, evolutionary algorithms .

# SUMÁRIO

|                                                                                                        |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| LISTA DE FIGURAS . . . . .                                                                             | iv        |
| LISTA DE TABELAS . . . . .                                                                             | vii       |
| LISTA DE SIGLAS . . . . .                                                                              | viii      |
| <b>1 Introdução</b>                                                                                    | <b>1</b>  |
| 1.1 Objetivos . . . . .                                                                                | 3         |
| 1.1.1 Objetivo Geral . . . . .                                                                         | 3         |
| 1.1.2 Objetivo Específico . . . . .                                                                    | 4         |
| <b>2 Eficiência Energética em Sistemas de Abastecimento de Água</b>                                    | <b>5</b>  |
| 2.1 Introdução . . . . .                                                                               | 5         |
| 2.2 Sistemas de Abastecimento de Água . . . . .                                                        | 7         |
| 2.3 Consumo Energético em Sistemas de Abastecimento de água . . . . .                                  | 13        |
| 2.3.1 Consumo energético nas estações elevatórias de água . . . . .                                    | 15        |
| 2.3.2 Avaliação dos custos de sistemas de bombeamento . . . . .                                        | 17        |
| 2.3.3 Estratégias para redução do custo de energia em sistemas de abas-<br>tecimento de água . . . . . | 20        |
| 2.4 Sistema Tarifário de Energia Elétrica Brasileiro . . . . .                                         | 24        |
| 2.4.1 Classificação dos Consumidores . . . . .                                                         | 25        |
| 2.4.2 Estrutura Tarifária . . . . .                                                                    | 27        |
| 2.4.3 Faturamento de Energia e Demanda Reativa . . . . .                                               | 33        |
| 2.4.4 Fator de Potência . . . . .                                                                      | 35        |
| 2.5 Legislação e Programas de Eficiência Energética Brasileiros . . . . .                              | 37        |
| <b>3 Modelagem de Sistemas de Abastecimento de Água</b>                                                | <b>40</b> |

|          |                                                                       |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1      | Considerações gerais . . . . .                                        | 40        |
| 3.2      | Modelos de Simulação Hidráulica . . . . .                             | 41        |
| 3.3      | Calibração de Sistemas de Abastecimento de Água . . . . .             | 45        |
| 3.4      | Operação de Sistemas de Abastecimento de Água . . . . .               | 47        |
| 3.5      | Modelos de Otimização de Sistemas de Abastecimento de Água . . . . .  | 51        |
| 3.5.1    | Otimização de Estações de Bombeamento . . . . .                       | 53        |
| <b>4</b> | <b>Algoritmos Evolucionários Multiobjetivo</b>                        | <b>60</b> |
| 4.1      | Considerações gerais . . . . .                                        | 60        |
| 4.2      | Algoritmos Evolucionários . . . . .                                   | 61        |
| 4.2.1    | Algoritmos Genéticos . . . . .                                        | 64        |
| 4.3      | Otimização Multiobjetivo . . . . .                                    | 67        |
| 4.4      | Algoritmos Evolucionários Multiobjetivo . . . . .                     | 74        |
| 4.4.1    | Técnicas de funções agregadas . . . . .                               | 76        |
| 4.4.2    | Técnicas populacionais que não consideram o conceito Pareto . . . . . | 78        |
| 4.4.3    | Técnicas populacionais que consideram o conceito Pareto . . . . .     | 80        |
| <b>5</b> | <b>Metodologia</b>                                                    | <b>85</b> |
| 5.1      | Considerações gerais . . . . .                                        | 85        |
| 5.2      | Definição do Problema . . . . .                                       | 87        |
| 5.2.1    | Hipóteses do Problema . . . . .                                       | 89        |
| 5.3      | Funções Objetivo . . . . .                                            | 90        |
| 5.3.1    | Eficiência Energética ( $FO_1$ ) . . . . .                            | 90        |
| 5.3.2    | Confiabilidade Hidráulica ( $FO_2$ ) . . . . .                        | 93        |
| 5.3.3    | Problema de otimização multiobjetivo . . . . .                        | 95        |
| 5.3.4    | Codificação . . . . .                                                 | 96        |
| 5.4      | Modelo Computacional Proposto . . . . .                               | 96        |
| 5.4.1    | Simulação Hidráulica . . . . .                                        | 97        |
| 5.4.2    | Otimização Multiobjetivo . . . . .                                    | 98        |
| 5.4.3    | Ferramentas e Linguagens de Programação . . . . .                     | 102       |

|          |                                                                                                   |            |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>6</b> | <b>Estudo do caso</b>                                                                             | <b>103</b> |
| 6.1      | Sistema de Abastecimento de água de Campo Grande . . . . .                                        | 103        |
| 6.1.1    | Sistema ETA Guariroba . . . . .                                                                   | 104        |
| 6.1.2    | Demanda de Consumo . . . . .                                                                      | 106        |
| 6.2      | Implementação do Modelo Computacional proposto . . . . .                                          | 107        |
| 6.2.1    | Simulação Hidráulica . . . . .                                                                    | 107        |
| 6.2.2    | Otimização multiobjetivo . . . . .                                                                | 109        |
| 6.2.3    | Modelo Computacional . . . . .                                                                    | 112        |
| 6.3      | Resultados experimentais e Análises . . . . .                                                     | 113        |
| 6.3.1    | Análise Energético e Hidráulico do sistema adutor original . . . . .                              | 113        |
| 6.3.2    | Análise Energético e Hidráulico do sistema adutor mudando de tarifa                               | 116        |
| 6.3.3    | Análise Energético e Hidráulico do sistema adutor original mediante<br>a correção do fp . . . . . | 119        |
| <b>7</b> | <b>Conclussões e Recomendações</b>                                                                | <b>123</b> |
| 7.1      | Conclussões . . . . .                                                                             | 123        |
| 7.2      | Recomendações . . . . .                                                                           | 125        |
|          | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .                                                              | 126        |

# LISTA DE FIGURAS

|      |                                                                                                                          |    |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1  | Sistema de Abastecimento de Água (BAHIA, 1998) . . . . .                                                                 | 7  |
| 2.2  | Localização das adutoras em sistema de abastecimento de água (TSUTIYA, 2005) . . . . .                                   | 9  |
| 2.3  | Booster para recalque da água proveniente de um reservatório (TSUTIYA, 2005) . . . . .                                   | 10 |
| 2.4  | Booster para reforço no bombeamento de água (TSUTIYA, 2005) . . . . .                                                    | 11 |
| 2.5  | Abastecimento de água de redes localizadas em setores distintos (TSUTIYA, 2005) . . . . .                                | 12 |
| 2.6  | Esquema de abastecimento de água para atender as diversas zonas de pressão (TSUTIYA, 2005) . . . . .                     | 13 |
| 2.7  | Componentes e subcomponentes do sistema de abastecimento de água (TSUTIYA, 2005) . . . . .                               | 15 |
| 2.8  | Comparação entre métodos de partida de motores elétricos (WEG, 2004) . .                                                 | 17 |
| 2.9  | Distribuição típica de custos (MARQUES, 2001) . . . . .                                                                  | 20 |
| 2.10 | Ações iniciais para a redução de custo de energia elétrica em uma instalação (TSUTIYA, 2001) . . . . .                   | 21 |
| 2.11 | Controle do sistema de abastecimento de água por módulos (TSUTIYA, 2001)                                                 | 22 |
| 2.12 | Controle integrado do sistema de abastecimento de água (TSUTIYA, 2001) .                                                 | 22 |
| 2.13 | Programa de racionalização do consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água (TSUTIYA, 2001) . . . . . | 25 |
| 2.14 | Sistema Brasileiro de Tarifação de Energia Elétrica (Portaria DNAEE N°33/88 e N°466/97) . . . . .                        | 26 |
| 2.15 | Preço Final do Fornecimento Elétrico . . . . .                                                                           | 32 |
| 2.16 | Triângulo de Potências . . . . .                                                                                         | 35 |
| 3.1  | Componentes físicos de um sistema de distribuição de água (ROSSMAN, 2001)                                                | 44 |

|      |                                                                                                      |     |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.2  | Conexão Otimizador - Simulador (BRION; MAYS, 1991) . . . . .                                         | 59  |
| 4.1  | Esquema geral dos algoritmos genéticos convencionais (CHEUNG, 2003) . . .                            | 66  |
| 4.2  | Espaço variável de decisão (ZITZLER, 1999) . . . . .                                                 | 70  |
| 4.3  | Espaço função objetivo (ZITZLER, 1999) . . . . .                                                     | 71  |
| 4.4  | Ilustração dos conjuntos Pareto ótimo global e local no espaço objetivo<br>(ZITZLER, 1999) . . . . . | 73  |
| 4.5  | Esquema geral de um procedimento multiobjetivo (DEB, 2001) . . . . .                                 | 74  |
| 4.6  | Estrutura geral dos algoritmos genéticos multiobjetivo (CHEUNG, 2003) . . .                          | 76  |
| 5.1  | Sistema de Adução Simples . . . . .                                                                  | 87  |
| 5.2  | Codificação do problema de otimização da programação das bombas . . . . .                            | 96  |
| 5.3  | Interface do modelo proposto . . . . .                                                               | 97  |
| 5.4  | Procedimento geral do SPEA (CHEUNG, 2003) . . . . .                                                  | 100 |
| 6.1  | Concepção geral do sistema ETA Guariroba (MARTINS et al., 2006) . . . .                              | 105 |
| 6.2  | Curvas das Demandas horárias . . . . .                                                               | 106 |
| 6.3  | Curvas das Demandas horárias por reservatório . . . . .                                              | 107 |
| 6.4  | Modelo Hidráulico em <i>EPANET2</i> . . . . .                                                        | 108 |
| 6.5  | Sistema de trabalho do booster em <i>EPANET2</i> . . . . .                                           | 108 |
| 6.6  | Frentes Pareto para diferentes dimensões de populações . . . . .                                     | 110 |
| 6.7  | Frentes Pareto não dominadas para diferentes dimensões de populações . .                             | 110 |
| 6.8  | Frentes Pareto para diferentes números de gerações . . . . .                                         | 111 |
| 6.9  | Frentes Pareto não dominadas para diferentes números de gerações . . . .                             | 112 |
| 6.10 | Frentes Pareto para o sistema original em THS Verde . . . . .                                        | 115 |
| 6.11 | Frentes Pareto não dominadas para o sistema original . . . . .                                       | 115 |
| 6.12 | Frente Pareto não dominadas e melhores soluções . . . . .                                            | 116 |
| 6.13 | Melhores soluções para o sistema original . . . . .                                                  | 116 |
| 6.14 | Planos ótimos de programação do booster . . . . .                                                    | 117 |
| 6.15 | Frentes Pareto para o sistema adutor em THS Azul . . . . .                                           | 118 |
| 6.16 | Frentes Pareto não dominadas para THS Azul . . . . .                                                 | 118 |
| 6.17 | Frentes Pareto não dominadas para THS Azul Vs. THS Verde . . . . .                                   | 119 |

|      |                                                                                                                                    |     |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.18 | Frentes Pareto para o sistema adutor com correção do fp . . . . .                                                                  | 121 |
| 6.19 | Frentes Pareto não dominadas para o sistema com correção do fp . . . . .                                                           | 121 |
| 6.20 | Frentes Pareto não dominadas com correção do fp Vs. THS Verde . . . . .                                                            | 122 |
| 6.21 | Comparação das Frentes Pareto não dominadas das situações estudadas:<br>THS Verde, THS Azul e THS verde com fp corrigido . . . . . | 122 |

# LISTA DE TABELAS

|     |                                                                    |     |
|-----|--------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.1 | Consumidores Grupo A . . . . .                                     | 27  |
| 2.2 | Consumidores Grupo B . . . . .                                     | 27  |
| 4.1 | Relações de dominância de Pareto entre vetores objetivos . . . . . | 72  |
| 6.1 | Dados dos reservatórios . . . . .                                  | 105 |
| 6.2 | Dados das bombas . . . . .                                         | 105 |
| 6.3 | Parâmetros para obter a população inicial . . . . .                | 109 |
| 6.4 | Parâmetros para obter o número de gerações . . . . .               | 111 |
| 6.5 | Parâmetros para otimização . . . . .                               | 112 |
| 6.6 | Parâmetros para avaliação energética do sistema original . . . . . | 114 |
| 6.7 | Parâmetros para avaliação energética com THS Azul . . . . .        | 117 |
| 6.8 | Parâmetros para avaliação energética de correção de fp . . . . .   | 120 |

# LISTA DE SIGLAS

|               |                                                                   |
|---------------|-------------------------------------------------------------------|
| <b>AE</b>     | Algoritmo Evolucionário                                           |
| <b>AEMO</b>   | Algoritmos Evolucionários Multiobjetivo                           |
| <b>AG</b>     | Algoritmo Genético                                                |
| <b>ANEEL</b>  | Agência Nacional de Energia Elétrica                              |
| <b>ANP</b>    | Agência Nacional de Petróleo                                      |
| <b>CGIEE</b>  | Comitê Gestor de Indicadores e de Níveis de Eficiência Energética |
| <b>CONAMA</b> | Conselho Nacional do Meio Ambiente                                |
| <b>CCV</b>    | Custo do Ciclo de Vida                                            |
| <b>CPF</b>    | Conselho de Política Fazendária                                   |
| <b>DNAEE</b>  | Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica                 |
| <b>EE</b>     | Estratégias de Evolução                                           |
| <b>ETA</b>    | Estação de Tratamento de Água                                     |
| <b>fp</b>     | Fator de Potência                                                 |
| <b>fr</b>     | Fator de potência de referencia                                   |
| <b>IA</b>     | Inteligência Artificial                                           |
| <b>ICMS</b>   | Imposto sobre circulação de mercadorias e serviços                |
| <b>INEE</b>   | Instituto Nacional de Eficiência Energética                       |
| <b>MCT</b>    | Ministério da Ciência e Tecnologia                                |
| <b>MDIC</b>   | Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior      |
| <b>MME</b>    | Ministério das Minas e Energia                                    |
| <b>MOEA</b>   | Multiobjective Evolutionary Algorithm                             |
| <b>MOGA</b>   | Multiple Objective Genetic Algorithm                              |
| <b>MOMGA</b>  | Multiobjective Messy Genetic Algorithm                            |
| <b>MOP</b>    | Multiobjective Optimization Problem                               |
| <b>NPGA</b>   | Niched Pareto Genetic Algorithm                                   |
| <b>NSGA</b>   | Non dominated Sorting Genetic Algorithm                           |
| <b>OP</b>     | Ordem de preferência                                              |
| <b>PAES</b>   | Pareto Archived Evolution Strategy                                |
| <b>PE</b>     | Programação Evolucionária                                         |
| <b>PEE</b>    | Programa de Eficiência Energética                                 |
| <b>PESA</b>   | Pareto Envelope based Selection Algorithm                         |

|                      |                                                           |
|----------------------|-----------------------------------------------------------|
| <b>PG</b>            | Programação Genética                                      |
| <b>PIS</b>           | Programa da Integração Social                             |
| <b>PLC</b>           | Controladores Lógicos Programados                         |
| <b>PROCEL</b>        | Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica      |
| <b>PROCEL SANEAR</b> | Programa de Eficiência Energética em Saneamento Ambiental |
| <b>RNF</b>           | Reservatórios de nível fixo                               |
| <b>RNV</b>           | Reservatórios de nível variável                           |
| <b>RGR</b>           | Reserva Global de Reversão                                |
| <b>SAA</b>           | Sistema de Abastecimento de água                          |
| <b>SABESP</b>        | Companhia de Saneamento de São Paulo                      |
| <b>SC</b>            | Sistema Classificatório                                   |
| <b>SCADA</b>         | Supervisory Control and Data Acquisition                  |
| <b>SNIS</b>          | Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento          |
| <b>SPEA</b>          | Strength Pareto Evolutionary Algorithm                    |
| <b>THS</b>           | Tarifa Horo-sazonal                                       |
| <b>VEGA</b>          | Vector Evaluated Genetic Algorithm                        |

# 1 Introdução

Água e energia são dois insumos básicos da sociedade moderna, que dependem de forma direta um do outro. Porém, nem sempre há claro reconhecimento, por parte das autoridades, que o consumo de água e energia tem forte interdependência, pois, por cada litro de água que escoa por um sistema de abastecimento há um custo de energia associado.

Na escala mundial, o setor de saneamento caracteriza-se como uma atividade altamente consumidora de energia elétrica, havendo estimativas de que esse setor seja responsável por cerca de 7% do total do consumo da energia global. Deste consumo de energia, entre 2 e 3%, são usados no bombeamento e tratamento de água para residências urbanas e industriais (JAMES et al., 2002). Na maioria dos países, o custo de energia para o abastecimento de água representa parcelas orçamentárias significativas para as empresas concessionárias de serviços de saneamento, chegando a alcançar o segundo maior insumo após as despesas com os recursos humanos (TSUTIYA, 2001).

Devido às recentes crises energéticas, à necessidade de contenção das despesas de operação e à pressão por reduzir os impactos ambientais, surgiu uma preocupação internacional que visa a melhora da eficiência energética no setor saneamento, sobretudo pela grande parcela do consumo de energia que apresenta. Segundo JAMES et al. (2002), o consumo de energia na maioria dos sistemas de água em todo o mundo poderia ser reduzido em pelo menos 25% mediante a implementação de ações de efficientização energética com melhor desempenho.

Os sistemas de abastecimento e distribuição de água tratada são peças fundamentais da infraestrutura urbana e indispensáveis para o desenvolvimento econômico sustentável. Muitos destes sistemas têm se caracterizado pelo aumento acentuado da demanda, a níveis que extrapolam as previsões e a capacidade de oferta de água. Essa deficiência da oferta, em relação às necessidades de consumo, encontra-se em um cenário de escassez de

recursos financeiros para construção de novas obras e, também de mananciais naturais de boa qualidade, junto aos centros de consumo (BORGES, 2004). Em decorrência, o custo da água potável ofertada eleva-se e o sistema como um todo passa a trabalhar em condições adversas, bastante distintas daquelas previstas no projeto inicial.

Muitos obstáculos, como a recepção de despejos urbanos e a escassez de água nos mananciais, traz como reflexos, alterações nas concentrações dos organismos aquáticos, gerando crises tanto por questões de quantidade como por qualidade da água, requerendo, cada vez mais, diversas alternativas para o tratamento de água e o contínuo abastecimento à população.

O principal objetivo de um sistema de abastecimento é suprir os usuários de água em quantidade suficiente às suas necessidades e com os padrões de qualidade apropriados. A operação desses sistemas torna-se uma tarefa complexa, pois envolve vários aspectos distintos tais como a necessidade de garantia da confiabilidade no atendimento dos serviços, economia no uso de equipamentos (energia e manutenção) e o planejamento de investimento para expansões futuras (CARRILHO, 2004).

Assim, com o objetivo de maximizar a eficiência energética e por conseguinte reduzir os custos com as despesas de energia elétrica e manutenção dos equipamentos na operação dos sistemas de abastecimento de água, é necessário fazer análises com base em seus componentes principais. As estações de bombeamento de água são componentes fundamentais desses sistemas, em especial, ao tratar-se da eficiência energética. Tipicamente, uma estação de bombeamento consiste de uma quantidade de bombas de diferentes capacidades, as quais são utilizadas para bombear água para um ou mais reservatórios, essas bombas trabalham em combinação com outras para atender a demanda (MONACHESI, 2005). A programação ótima da operação das bombas tem provado ser um método prático e efetivo para reduzir os custos operativos sem modificar a infraestrutura existente, assegurando o abastecimento de água em todas as situações de demanda (BARÁN et al., 2005).

No entanto, a confiabilidade hidráulica é tão importante quanto a diminuição de custos totais de produção de água tratada, pois essa diminuição de custos deve ser alcançada, mas sem causar prejuízo na qualidade do serviço prestado, além de garantir atendimento quando houver expansão de novas ligações no sistema.

Muitos dos sistemas de abastecimento de água existentes foram projetados utilizando o método de tentativa e erro, baseados nas experiências anteriores bem sucedidas. Nas

décadas passadas, os métodos matemáticos de otimização serviram como ferramentas facilitadoras para a busca de soluções que fornecessem menores custos para os projetos de redes hidráulicas. Programação linear, não-linear e dinâmica são alguns desses métodos que obtiveram vantagens comparados aos procedimentos anteriores de tentativa e erro (CHEUNG, 2003).

A existência de objetivos múltiplos e conflitantes na investigação desses sistemas faz com que analistas busquem métodos mais confiáveis e eficientes para a identificação das soluções. Assim, com o desenvolvimento das ferramentas computacionais e o aparecimento de técnicas de otimização não convencionais tais como os algoritmos evolucionários, os problemas de otimização multiobjetivo vêm sendo revistos com sucesso, obtendo-se resultados a serem efetivamente implantadas para otimizar a operação desses sistemas.

Sob a ótica de otimização multiobjetivo, este trabalho visa desenvolver uma técnica para a otimização energética em sistemas de abastecimento de água através da programação operacional das bombas em um horizonte de operação determinado, de modo a atender as restrições operacionais do sistema.

O modelo para análise proposto neste trabalho, é desenvolvido sob três fases. A primeira fase, envolve a busca de informações do sistema, possibilitando a elaboração de um modelo adequado e que as simulações hidráulicas reproduzam uma melhor aproximação do comportamento real do sistema estudado. A segunda fase, identifica soluções ótimas através dos algoritmos evolucionários multiobjetivo. O programa de otimização multiobjetivo será auxiliado pelo simulador hidráulico (*EPANET 2.0*). Finalmente, a terceira fase, que apresenta os resultados da modelação, ou seja, os planos ótimos de operação das bombas.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem como objetivo principal aplicar técnicas de otimização multiobjetivo para elaborar planos ótimos de programação operacional das bombas em sistemas de abastecimento de água, visando maximizar a eficiência energética e a confiabilidade hidráulica, simultaneamente.

### 1.1.2 Objetivo Específico

Esta pesquisa tem como objetivos específicos:

- Análise detalhada das técnicas de otimização operacional de sistemas de abastecimento de água apresentadas na literatura.
- Avaliar diferentes estratégias para redução do custo de energia em sistemas de abastecimento de água (SAA), tais como reenquadramento tarifário e correção do fator de potência.
- Desenvolvimento da interface entre o modelo de simulação hidráulica *EPANET 2.0* e o modelo otimização multiobjetivo mediante um programa computacional.
- Avaliar os resultados da aplicação em um estudo de caso real.
- Produzir uma ferramenta útil e prática que minimize as intervenções subjetivas por parte dos operadores.

## 2 Eficiência Energética em Sistemas de Abastecimento de Água

### 2.1 Introdução

O abastecimento público de água, que até poucos anos atrás, era feito por meio de fontes limpas captadas nas encostas e trazidas às comunidades pela ação da gravidade, atualmente depende, quase que em sua totalidade, de bombeamento (MONACHESI, 2005). Desta maneira, tornou-se indispensável o uso de bombas e, por conseguinte, houve um aumento no consumo de energia elétrica devido ao acionamento dos motores e demais dispositivos utilizados para o funcionamento eficaz das bombas.

Nos processos de abastecimento de água, esgotamento sanitário e pluvial, e limpeza urbana, existe consumo significativo de energia elétrica que pode ser reduzido, somando benefícios tanto para o usuário quanto para o agente gestor. BAHIA (1998) ressalta que normalmente as perdas de energia elétrica nas diversas etapas do sistema de abastecimento de água (captação, transporte, tratamento, armazenamento e distribuição) são encontrados nos procedimentos operacionais existentes, no dimensionamento dos sistemas, na idade dos equipamentos, nas tecnologias não eficientes utilizadas, na manutenção, nas formas contratuais e no desperdício de água.

A energia elétrica utilizada nos sistemas de abastecimento de água é um insumo necessário para o transporte de água, desde a fonte de captação até as estações de tratamento, onde torna-se água potável e depois para sua distribuição aos consumidores (JAMES et al., 2002). Assim, cada litro de água que se move pelo sistema representa um significativo custo de energia, e em consequência, o desperdício de água regularmente leva ao desperdício de energia, aumentando as despesas; portanto, quanto menor for a parcela de água transportada ou quanto mais água se transporte de forma eficiente, os custos

operacionais serão reduzidos em decorrência do menor consumo de energia.

Os serviços públicos de água e saneamento consomem aproximadamente o mesmo volume de energia que a iluminação pública. Apresentando, assim, possibilidades de grandes ganhos econômicos e energéticos mediante a implementação de um programa de eficiência energética, o qual é fundamental para o bem-estar da população (INEE, 2001).

De acordo com GELLER (1994), a eficiência energética é maximizada quando se consegue realizar um serviço e/ou produzir um bem com uma quantidade de energia inferior à que era usualmente consumida, sem que isso prejudique sua qualidade, conforto e eficiência. Neste sentido, ser eficiente do ponto de vista energético equivale a consumir menos energia para obter-se o mesmo resultado final, reduzindo custos com a eletricidade consumida, custos com a manutenção dos equipamentos e outros.

Colocar em prática o conceito de “eficiência energética” significa utilizar processos e equipamentos energeticamente mais eficientes, a fim de reduzir o desperdício na oferta e no uso de energia elétrica (GELLER, 1994). O uso racional e eficiente de energia elétrica tem como paradigma a implementação de ações que otimizem o uso de energia elétrica através da redução do consumo ou do deslocamento de cargas para fora do horário de ponta do sistema elétrico, sem comprometer o desempenho dos sistemas de cada uso final ou o nível de conforto proporcionado aos usuários. Para os sistemas de abastecimento de água, as atividades implementadas para economizar água e energia podem ter um maior impacto se planejadas de forma conjunta (JAMES et al., 2002).

Segundo o INEE (2001), a conservação e o uso eficiente da energia elétrica dependem dos produtores e consumidores de eletricidade. Ao sistema elétrico cabe reduzir as perdas nas etapas de geração, transmissão e distribuição, assim como desenvolver projetos que tenham a conservação como premissa. Nos diferentes segmentos de consumo, é necessário eliminar o desperdício, aplicar novas tecnologias e mudar os hábitos de uso da energia. A tendência nos países desenvolvidos é de realização de esforços cada vez maiores no sentido de aumentar a eficiência energética a partir do uso intensivo de novas tecnologias.

A principal vantagem da eficiência energética é que ela é sempre mais barata que a produção de energia, ainda que o investimento em tecnologia eficiente requeira também maiores gastos de capital e que sistemas e equipamentos eficientes são, geralmente, mais caros que as tecnologias que substituem (JAMES et al., 2002). De modo geral, o custo de conservar 1kWh é, mais barato que produzi-lo.

De acordo com GELLER (1994), do ponto de vista do setor elétrico, o uso mais racional e eficiente de energia elétrica diminui a necessidade de expansão do parque elétrico instalado, postergando os grandes investimentos necessários para o atendimento do mercado consumidor de energia elétrica, uma vez que o custo médio da energia conservada é estimado no Brasil em 0,024 US\$/kWh, inferior ao custo marginal de expansão do setor elétrico, situado entre 0,047 e 0,100 US\$/kWh.

Não somente a forma, mas também a dimensão das áreas urbanas exerce influência na relação saneamento ambiental e eficiência energética. O crescimento acentuado das cidades, associado ao aumento populacional e ao processo de urbanização deficiente frente às demandas de água estabelecidas, resulta em conseqüências visíveis no meio ambiente e no consumo de energia elétrica.

## 2.2 Sistemas de Abastecimento de Água

Segundo BAHIA (1998), os sistemas de abastecimento de água são constituídos, de maneira geral, por unidades de captação, adução, tratamento, reservação e distribuição, tal como é ilustrado na Figura 2.1.

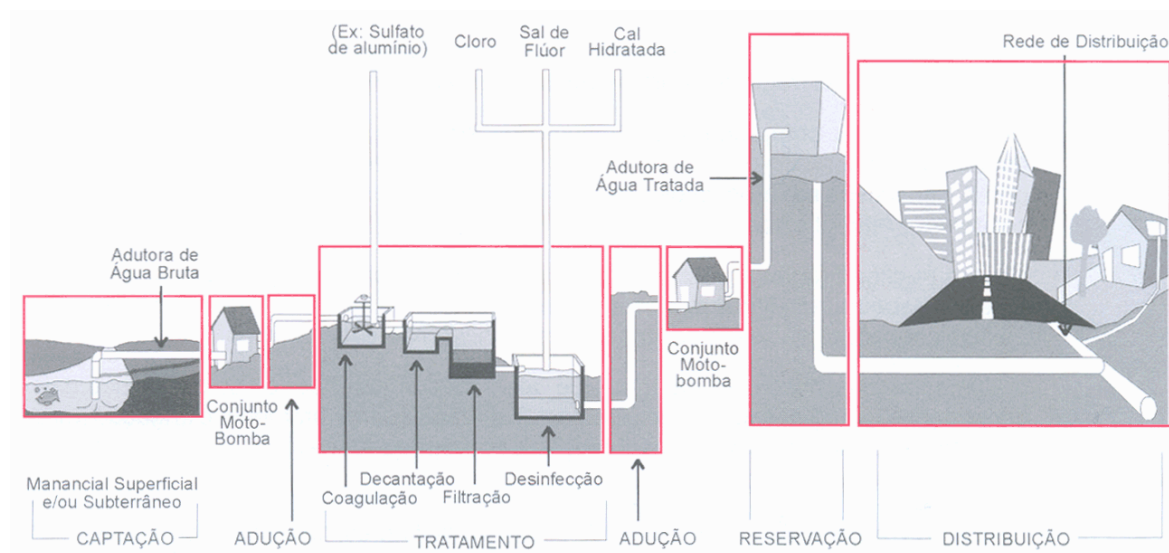


Figura 2.1 - Sistema de Abastecimento de Água (BAHIA, 1998)

A **captação** é a unidade destinada a obter água do manancial (superficial ou subterrâneo) em quantidade capaz de atender o consumo. No planejamento dessa etapa, além da quantidade e qualidade da água disponível, é muito importante o manancial ter

fácil acesso, disponibilidade de energia elétrica para o funcionamento dos equipamentos necessários, desnível e distância adequados ao ponto de tratamento e de consumo. Do ponto de vista energético, a disponibilidade de um manancial favorável é desejável, pois implica menor consumo energético por metro cúbico de água fornecida. O consumo energético na etapa de captação não só é função das opções existentes dos mananciais, mas também do tipo de tecnologia e equipamentos utilizados, das condições operacionais e dos níveis de controles dos sistemas. Dessa forma, os maiores consumidores de energia elétrica (conjunto motor-bomba) são alvos potenciais para o planejamento com vistas ao consumo racional de energia. A existência de grandes motores e bombas na captação, geralmente projetados para atender o pico de consumo de água é, normalmente, subutilizada quando a demanda de água é menor. Esse fato, por exemplo, possibilita planejar a operação do sistema objetivando a redução do consumo de energia (BAHIA, 1998).

A **adução** é a etapa de condução de água desde o ponto de sua captação até a rede de distribuição, passando pela estação de tratamento e pelo(s) reservatório(s). As adutoras são canalizações dos sistemas de abastecimento que conduzem a água para as unidades que precedem a rede de distribuição, elas interligam captação, estação de tratamento e reservatórios, porém não distribuem água aos consumidores. Dependendo do sistema há casos em que partem ramificações da adutora principal (subadutoras), para levar água a outros pontos do sistema (TSUTIYA, 2005). A Figura 2.2 apresenta a localização de adutoras em um sistema de abastecimento de água.

De acordo com BAHIA (1998), levando-se em conta a energia utilizada, as unidades de adução podem ser classificadas em:

- *Adução por gravidade*: dispensa o bombeamento de água, tornando-se energeticamente mais econômica, porém, depende das características topográficas locais. Esses tipos de adutoras são favoráveis energeticamente, pois não necessitam de energia elétrica para sua operação.
- *Adução por recalque ou através de bombeamento*: exige um conjunto elevatório ou estação de bombeamento. A água é conduzida sob pressão de um ponto a outro mais elevado através de um conjunto motor-bomba e, conseqüentemente, com um consumo de energia associado.
- *A adução mista*: é a associação das duas anteriores (gravidade e recalque), combina trechos de escoamento por gravidade com trechos de escoamento por recalque,

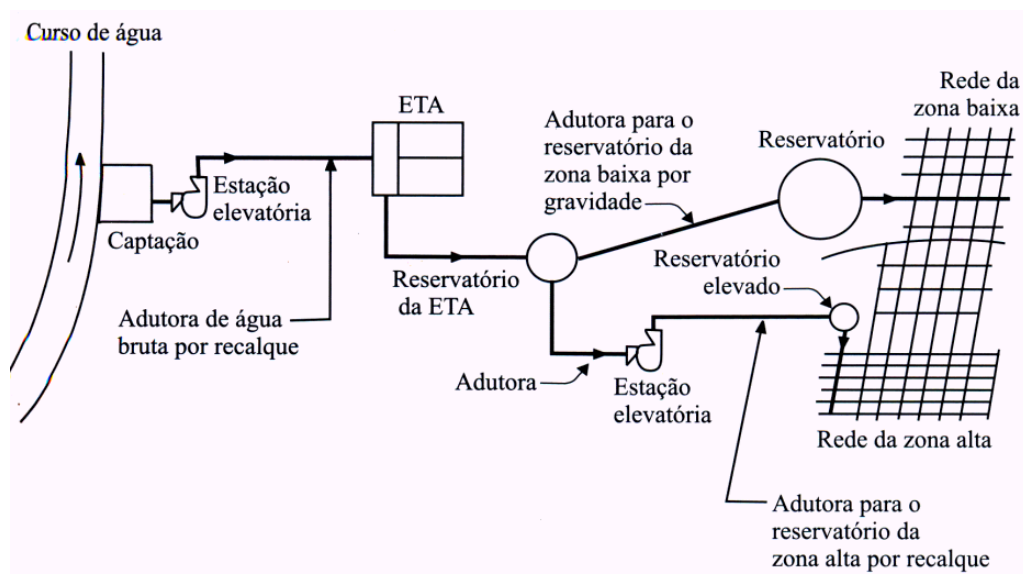


Figura 2.2 - Localização das adutoras em sistema de abastecimento de água (TSUTIYA, 2005)

aproveitando, assim, os desníveis favoráveis do percurso e reduzindo o consumo de energia necessária para o bombeamento da água.

**Estações elevatórias e/ou *boosters*** são instalações que servem para bombear a água a pontos mais elevados a fim de garantir a vazão nas linhas adutoras. São consumidores representativos de energia elétrica, basicamente pelo uso de bombas e motores de acionamento (BAHIA, 1998).

O booster utilizado na adução de água é conhecido como booster em linha, pois o conjunto de motor-bomba fica intercalada na tubulação de modo que recebe água do lado de montante com uma determinada pressão e injeta-a no lado de jusante com uma pressão mais elevada, conforme pode ser observado nas Figuras 2.3 e 2.4.

De um modo em geral, os boosters com bombas de rotação constante ou estação pressurizadora apresentam um rendimento energético relativamente baixo; pressões elevadas à jusante da bomba, principalmente no período noturno, causando aumento no número de vazamentos na rede; e freqüentes variações bruscas no escoamento devido às paradas das bombas. Devido a esses problemas, esse tipo de boosters tem sido substituídos por boosters com bombas de rotação variável, tendo sido os mais utilizados: o variador de rotação hidrocínético (acoplamento hidráulico) e o inversor de freqüência (equipamento elétrico) (TSUTIYA, 2005).

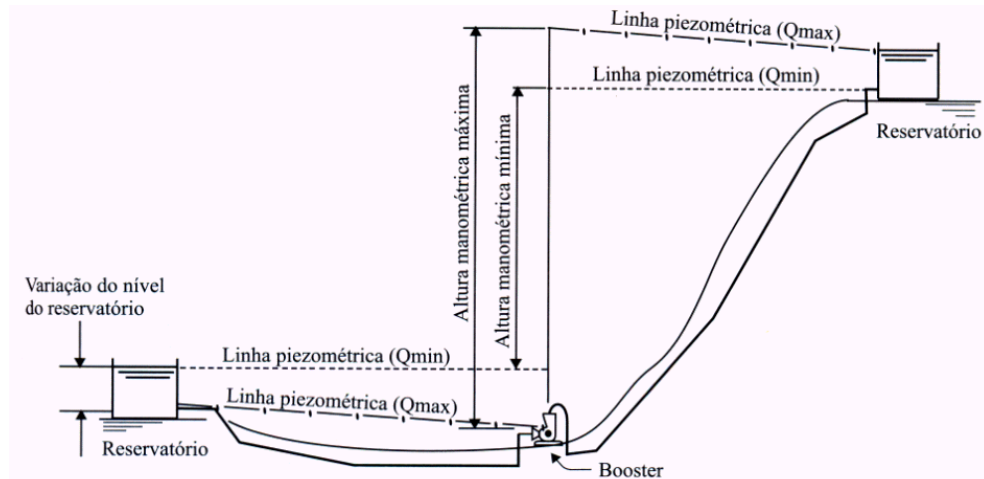


Figura 2.3 - Booster para recalque da água proveniente de um reservatório (TSUTIYA, 2005)

O **tratamento** da água feito na Estação de Tratamento de Água (ETA), deverá fornecer e garantir à população água de boa qualidade do ponto de vista físico, químico, biológico e bacteriológico, e sem impurezas prejudiciais à saúde. O consumo energético na ETA está associado aos conjuntos de motores de acionamento de bombas para limpeza de filtros, preparação e dosagens de soluções e reagentes, movimentação dos volumes de água, acionamento de equipamentos mecânicos de agitação para preparo de soluções e reagentes, misturas e para facilitar os processos físico-químicos envolvidos (BAHIA, 1998).

Após o tratamento, a água segue para a distribuição para a população ou para a reserva estratégica em reservatórios de água tratada. A **reservação** de água é muito importante no processo de eficiência energética, pois os reservatórios podem exercer o papel estratégico de reserva de água tratada, que permitirá a continuidade da operação de abastecimento sem consumo de energia elétrica por um determinado tempo, ação muito recomendável para o horário de ponta onde a tarifa é mais cara. Geralmente, os reservatórios demandam controle de nível a fim de mantê-los plenos de forma a não extravasarem. Os sistemas mais comuns são os de bóia ligados a sinaleiros ou os de controle elétrico-eletrônico de comando das bombas que os abastecem. Sistemas de telemetria tipo *SCADA* (*Supervisory Control and Data Acquisition*), vêm sendo utilizados para essa finalidade (BAHIA, 1998).

Segundo TSUTIYA (2005), as principais finalidades dos reservatórios de distribuição de água são: regularizar a vazão nas horas de maior demanda; segurança ao abastecimento

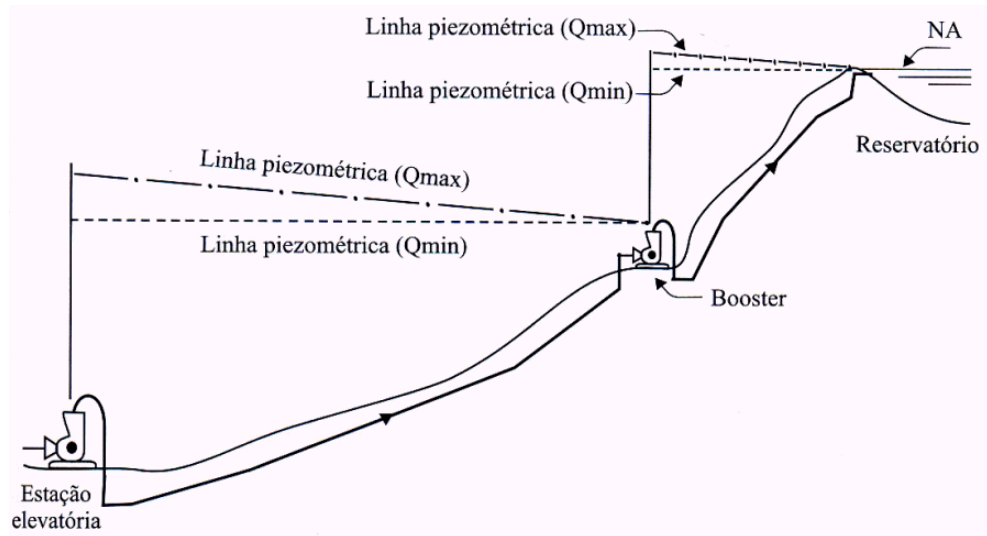


Figura 2.4 - Booster para reforço no bombeamento de água (TSUTIYA, 2005)

de água apesar de interrupções imprevistas (ruptura da adutora, falta de energia elétrica etc.); reserva de água para incêndio; regularizar pressões (reduzindo as variações de pressões); bombeamento de água fora do horário de pico elétrico, diminuindo sensivelmente os custos de energia elétrica; aumento no rendimento dos conjuntos elevatórios, com os valores de altura manométrica e vazão aproximadamente constante, os conjuntos motor-bomba poderão operar próximos ao seu ponto de rendimento máximo.

Para a otimização dos reservatórios com o objetivo de melhorar a distribuição de água, aproveitar ao máximo a capacidade de reserva e dar segurança operacional ao sistema, são necessários estabelecer: limites operacionais de segurança e regras operacionais (TSUTIYA, 2005).

A **distribuição** constitui a etapa final de um sistema de abastecimento de água, destinando-se a conduzir a água, através de tubulações, para os diversos pontos de atendimento de consumo de água. As tubulações para distribuição de água podem ter origem logo após a captação (no caso de água de poços artesianos), nas ETAs, nas adutoras, nas subadutoras ou nos reservatórios. As redes de distribuição são normalmente projetadas de forma a abastecer os pontos mais desfavoráveis com uma pressão mínima suficiente, fato ligado à economia da água e, como consequência, à economia da energia elétrica. Quando a pressão se situa em uma faixa abaixo do satisfatório, o sistema encontra-se prejudicado, pois não conta com a pressão mínima que permita ao usuário receber água em vazão suficiente, ou sequer receber água. Por outro lado, quando a pressão for maior

que o satisfatório, a rede estará mais propensa a vazamentos e, com isso, ao desperdício de água. Assim, maior desperdício de água implicará um maior gasto de energia elétrica para disponibilizar a quantidade excedente de água no sistema. Da mesma forma, vazamentos que ocorram no sistema irão contribuir para um desperdício ainda maior de água e energia elétrica, quando o sistema estiver sendo operado sob pressão excessiva (BAHIA, 1998).

A Figura 2.5 apresenta um esquema de abastecimento de 3 setores através de uma estação elevatória. Neste caso, a água é bombeada diretamente para os reservatórios dos setores 1 e 2; no entanto, como o setor 3 está localizado mais distante e com cota superior aos demais, foi necessário utilizar um "booster" para a alimentação do reservatório.

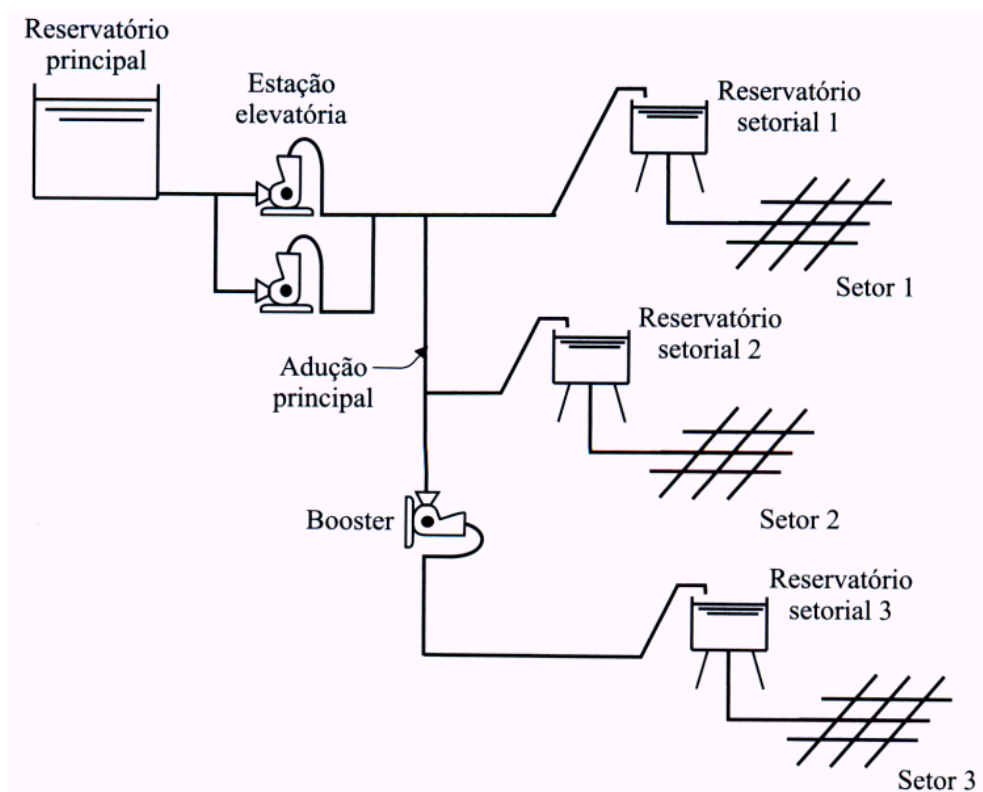


Figura 2.5 - Abastecimento de água de redes localizadas em setores distintos (TSUTIYA, 2005)

De acordo com TSUTIYA (2005), para o dimensionamento da rede, são importantes a pressão dinâmica mínima e a pressão estática máxima. Estabelecem-se pressões mínimas para que a água alcance os reservatórios domiciliares e é recomendável que, obedecidas as condições de pressões mínimas, as máximas sejam as menores possíveis. Para atender os limites de pressão, a rede deve ser subdividida em zonas de pressão (alta, média e baixa), sendo que cada zona de pressão é abastecida por um reservatório de distribuição.

Geralmente para atender a zona alta utiliza-se um reservatório elevado ou de um booster, e para atender a zona média ou baixa, utiliza-se um reservatório apoiado, semi-enterrado, enterrado e/ou de válvula redutora de pressão. A Figura 2.6 apresenta um esquema de abastecimento de água para atender os limites de pressão na rede de distribuição de água.

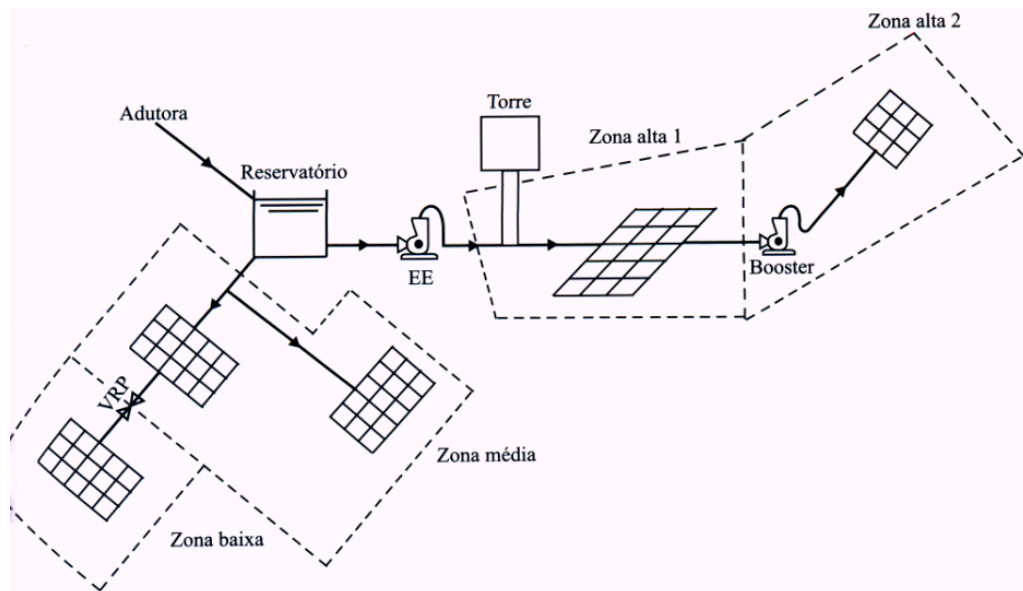


Figura 2.6 - Esquema de abastecimento de água para atender as diversas zonas de pressão (TSUTIYA, 2005)

O consumo energético em cada uma destas etapas deve ser analisado para possibilitar um programa de eficiência energética no sistema de abastecimento de água, podendo se adequar em cada situação em função da concepção do sistema, do projeto adotado, da implantação executada e da operação do sistema, com reflexos nos valores finais das tarifas de água (BAHIA, 1998).

## 2.3 Consumo Energético em Sistemas de Abastecimento de água

De acordo com ELETROBRÁS et al. (2005), 3% do consumo total de energia elétrica do Brasil, o equivalente a 8,3 bilhões de kWh/ano, são consumidos por prestadores de serviços de saneamento em todo o País. Esse consumo engloba os diversos usos nos processos de abastecimento de água e esgotamento sanitário, com destaque para os

conjuntos motobomba, que são normalmente responsáveis por 90% do consumo nessas instalações. As despesas totais dos prestadores de serviços de saneamento com energia elétrica chegam a R\$ 1,5 bilhão por ano, variando entre 6,5% e 23,8% das despesas totais, com média de 12,2% para os sistemas de abastecimento de água e de esgotamento sanitário de companhias estaduais de saneamento.

Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS, o Brasil perde 44,81% da água distribuída em relação à água captada, essa quantidade de água seria suficiente para abastecer simultaneamente países como a França, a Suíça, a Bélgica e o norte da Itália. As elevadas perdas de água têm relação direta com o desperdício de energia elétrica. Os índices de perdas de faturamento dos prestadores de serviços de saneamento ambiental têm variado regionalmente entre 34% (região centro-oeste) e 57,6% (região norte), com média de 40,5% para o País (ELETROBRÁS et al., 2005).

De acordo com BAHIA (1998), existe uma relação direta entre o consumo de água e o consumo de energia elétrica utilizada para disponibilizar água tratada para a população. Contudo um processo que busca a eficiência energética deve partir do princípio de buscar menor consumo energético com, no mínimo, a mesma garantia de abastecimento e qualidade da água.

Embora não existam dados consolidados sobre quanto da energia consumida é desperdiçada, os dados referentes só às perdas da água já são indicadores do impacto positivo que ações corretivas de natureza gerencial, administrativa e de engenharia, para redução dessas perdas, teriam sobre o balanço financeiro dos prestadores de serviços. Ainda assim, estima-se que a despesa anual dos prestadores de serviços de saneamento, somente pela ineficiência energética, atinge o patamar de R\$ 375 milhões, despesa que é freqüentemente repassada para a sociedade via tarifa (ELETROBRÁS et al., 2005).

Segundo TSUTIYA (2001) as despesas com energia elétrica representam os custos mais importantes nas empresas de saneamento brasileiras. A SABESP (Companhia de Saneamento de São Paulo) tem sido a maior empresa consumidora de energia elétrica do Estado de São Paulo, consumindo cerca de 3% de toda a energia consumida no Estado, sendo que as instalações administrativas representam apenas 2% do custo total de energia elétrica e as instalações operacionais de água e esgoto 98%. Desse consumo de energia os motores representam 90% do total, enquanto que os serviços auxiliares 7,5% e a iluminação 2,5%.

### 2.3.1 Consumo energético nas estações elevatórias de água

As estações elevatórias são componentes essenciais dos sistemas de abastecimento de água, sendo utilizado na captação, adução, tratamento e distribuição de água. No entanto, o uso intensivo das elevatórias em sistemas de abastecimento de água e esgoto sanitário tem elevado as despesas com energia elétrica, sendo um dos principais itens dos custos operacionais das prestadoras de serviços de saneamento básico (TSUTIYA, 2005).

A Figura 2.7 apresenta o sistema de abastecimento de água dividido em componentes, subcomponentes e sub-subcomponentes. Para a estação elevatória os subcomponentes estão divididos em: estrutura, elétrica, mecânica e tubulação; para os sub-subcomponentes em: bomba, motor, controle, painel, transformador e linha de transmissão.

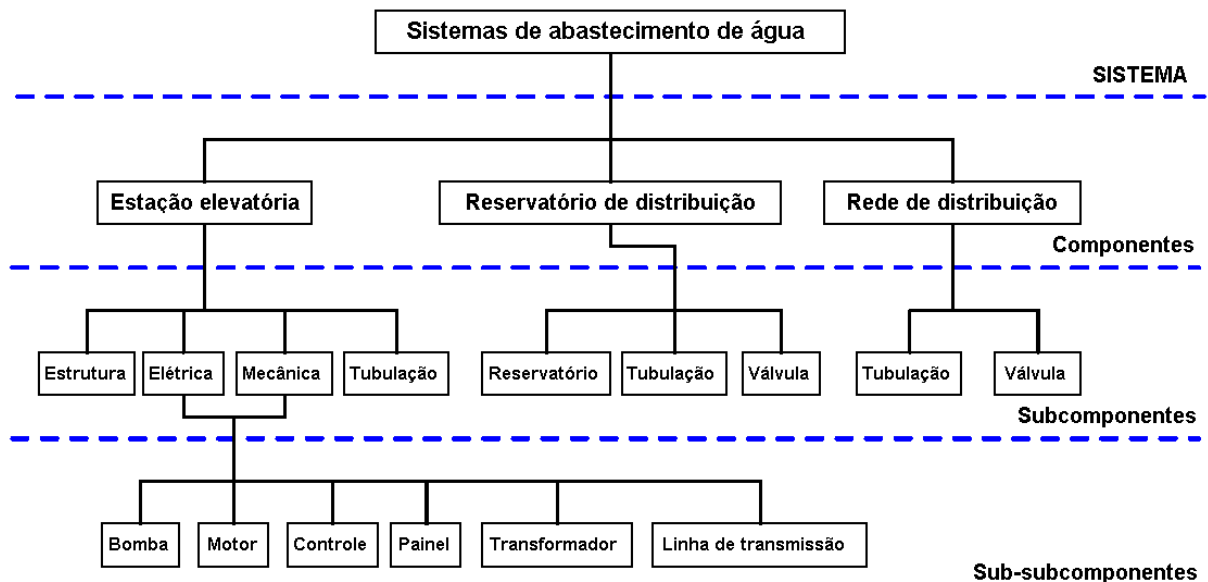


Figura 2.7 - Componentes e subcomponentes do sistema de abastecimento de água (TSUTIYA, 2005)

Dentre os subcomponentes de uma estação elevatória, o **motor elétrico** é o mais importante consumidor de energia elétrica. O motor elétrico é a máquina destinada a transformar energia elétrica em energia mecânica, e é o mais utilizado para o acionamento de bombas pela sua simplicidade, confiabilidade, flexibilidade e menor custo. Os métodos de comando de um motor de indução são implementados com equipamentos eletromecânicos, elétricos e eletrônicos. Estes equipamentos permitem acelerar (partir) e desacelerar (frenar) o motor de acordo com requisitos impostos pela carga, segurança, concessionárias de energia elétrica etc. (TSUTIYA, 2005).

Durante a partida, os motores elétricos solicitam uma corrente elevada do sistema de alimentação, muitas vezes da ordem de 6 a 10 vezes a sua corrente nominal de funcionamento (MEDEIROS, 1997). Na prática, deseja-se acionar uma carga, limitando-se a corrente de partida, evitando distúrbios na rede elétrica. Desta maneira, a escolha de um sistema de partida adequado, pode trazer benefícios como vida útil prolongada do motor e redução de custos de operação e manutenção.

De acordo com WEG (2004), as principais formas de partida de motores elétricos de indução trifásicos para o acionamento de bombas em elevatórias de água são:

- **Partida direta:** método de partida onde o motor de indução é alimentado diretamente através da rede elétrica, ocasionando uma corrente de partida de 5 a 6 vezes maior que a corrente nominal. Essa elevada corrente de partida pode trazer conseqüências prejudiciais como uma acentuada queda de tensão no sistema de alimentação, impedindo o correto funcionamento de equipamentos que estejam interligados ao sistema. Por este motivo, e principalmente para motores de grande porte, a partida direta não é utilizada.
- **Partida estrela-triângulo:** é utilizada para amenizar os efeitos da partida de motores elétricos no sistema de alimentação, pois, durante a partida, a corrente fica reduzida a  $1/3$  do valor nominal. Para a utilização desse tipo de partida, é necessário que o motor possua dupla tensão nominal (por exemplo 3x380V e 3x220V). A partida se inicia em estrela, sendo que a comutação para triângulo deve ser feita somente quando o motor estiver próximo a velocidade de regime. Muitas vezes a comutação pode provocar uma certa elevação da corrente, principalmente se for antecipada em relação ao ponto ideal. Como vantagem, pode-se citar o baixo custo.
- **Partida eletrônica (soft-starter):** O soft-starter é uma chave de partida a estado sólido microprocessada que controla o ângulo de disparo de um conjunto de pares de tiristores, aplicando uma tensão variável nos terminais do motor durante a sua aceleração. Essa chave eletrônica não possui partes móveis como as chaves mecânicas, tendo uma vida mais longa. Controla a aceleração, desaceleração e protege o motor, controlando suas características de funcionamento, também proporciona uma partida e parada suave do motor da bomba, com corrente bem inferior aos outros métodos de partida, conforme mostra a Figura 2.8.

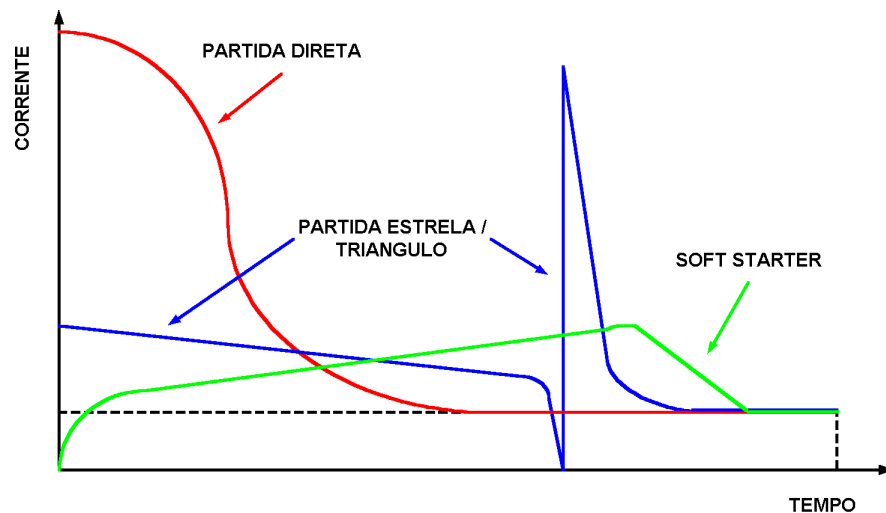


Figura 2.8 - Comparação entre métodos de partida de motores elétricos (WEG, 2004)

Nos últimos anos, a partida eletrônica vêm sendo amplamente utilizadas em sistemas de bombeamento devido as seguintes razões: proteção eletrônica integral do motor; diminuição dos efeitos dos transitórios hidráulicos nos sistemas de bombeamento (variações de pressão e vazão); limitação dos picos de corrente na partida; limitação de quedas de tensão na partida; diminuição de choques mecânicos; aumento da vida útil do motor e outros equipamentos (TSUTIYA, 2005).

### 2.3.2 Avaliação dos custos de sistemas de bombeamento

Estima-se que o elevado número de sistemas de bombeamento existentes a nível mundial, nas suas mais variadas aplicações (abastecimento público e predial de água potável; coleta, transporte e tratamento de águas residuais; instalações de irrigação; industrial etc.), consumam cerca de 20% da energia elétrica global (EUROPUMP; HYDRAULIC INSTITUTE, 2001).

Trata-se portanto de um consumo significativo, principalmente agora, em que a questão energética assume um importante papel na economia nacional e mundial. Então, a correta escolha de todos os componentes desse sistema apresenta-se assim como uma oportunidade para uma redução nos custos globais da instalação, ao longo da sua vida útil (MARQUES, 2001).

Segundo EUROPUMP e HYDRAULIC INSTITUTE (2001), o Custo do Ciclo de Vida (CCV) é uma ferramenta de gestão que pode ajudar as empresas a minimizar os des-

perdícios e a maximizar a eficiência de energia em diferentes tipos de sistemas, incluindo sistemas de bombeamento. O processo do CCV é um método que permite a comparação de soluções alternativas, em termos de custos. O processo em si é basicamente matemático, mas extremamente dependente da informação disponível, logo os resultados do processo apresentam certamente um grau de confiabilidade similar ao dos dados de base.

Com base nos estudos efetuados em problemas deste tipo, a EUROPUMP e HYDRAULIC INSTITUTE (2001) propõe a metodologia apresentada na equação 2.1 para calcular o custo do ciclo de vida:

$$CCV = C_i + C_{in} + C_e + C_o + C_m + C_p + C_{amb} + C_d \quad (2.1)$$

onde:

- $CCV$  é o Custo do Ciclo de Vida
- $C_i$  são os Custos iniciais, que incluem geralmente os seguintes custos: serviços de engenharia (estudos, projeto, desenhos, especificações etc.), aquisição, construção civil, inspeção e testes iniciais, controles, equipamentos auxiliares, entre outros.
- $C_{in}$  são os Custos de instalação, que incluem custos de entrada em operação tais como: ligações das tubulações, ligações elétricas e de instrumentação, ligações dos sistemas auxiliares, avaliações e regulações na partida, treinamento do pessoal etc.
- $C_e$  são os Custos energéticos. O consumo energético é freqüentemente uma das parcelas com maiores custos e geralmente domina o valor final do CCV, especialmente quando o tempo de operação das bombas ultrapassa as 2000 horas de operação/ano. A fórmula do cálculo da potência requerida de cada conjunto motor-bomba é apresentada na equação 2.2:

$$Pot(kW) = \frac{Q \times H \times \gamma}{\eta_m \times \eta_b} \quad (2.2)$$

onde:  $Pot$  é a Potência ( $kW$ );  $Q$  é a vazão ( $m^3/s$ );  $H$  é a altura manométrica ( $m.c.a.$ );  $\eta_m$  é a eficiência do motor-bomba (%);  $\eta_b$  é a eficiência da bomba (%)

Logo o consumo de energia de cada conjunto motor-bomba é dado pela equação 2.3:

$$E(kWh) = \int_{t_0}^{t_1} \frac{Q_{(t)} \times H_{(t)} \times \gamma}{\eta_m \times \eta_b} \partial t \quad (2.3)$$

Assim, o custo energético do sistema de bombeamento é dado pelo consumo da energia de cada conjunto motor-bomba multiplicado pelo custo da tarifa elétrica vigente.

- $C_o$  são os Custos de operação e estão associados à mão de obra e a supervisão normal do sistema. Estes podem variar muito dependendo da complexidade e função do sistema. Por exemplo uma bomba instalada em ambientes corrosivos pode requerer verificações diárias, enquanto um sistema semelhante com outro fluido pode apenas necessitar de supervisões limitadas.
- $C_m$  são os Custos de manutenção preventiva, de rotina e reparos. O alcance da longevidade esperada para uma bomba, requer uma manutenção regular e eficiente. O fabricante aconselhará a frequência e a natureza da manutenção periódica. Os custos dependem do tempo e da frequência do serviço, mas também dos custos dos materiais. O custo total da manutenção de rotina é o resultado do produto dos custos por intervenção pelo número de intervenções esperadas durante o ciclo de vida da bomba. Embora as avarias não possam ser previstas, podem ser estimadas estatisticamente pelo cálculo do tempo médio entre avarias.
- $C_p$  são os Custos de paralisação temporária com perdas na produção. Estes custos são uma parcela muito significativa no valor CCV e podem rivalizar com os custos energéticos ou com os custos de peças de substituição. Na maior parte das vezes, os custos de paralisação são inaceitáveis por representarem custos superiores à instalação de um equipamento de substituição ou reserva. Se for utilizado um equipamento de reserva, o custo inicial será mais elevado, mas os custos de manutenção não programada incluirão apenas os custos da reparação. O custo de perda de produção ou de indisponibilidade pode ser considerado dependente do tempo de paralisação e deve ser analisado para cada caso específico.
- $C_{amb}$  são os Custos ambientais devido a contaminação pelo líquido bombeado e equipamentos auxiliares.
- $C_d$  são os Custos de desmontagem e descarte do equipamento, esse custo inclui custos de reparação do meio ambiente de serviço e alienação de serviços auxiliares.

A Figura 2.9 mostra que para bombas de pequeno e grande porte, ao longo de sua vida útil, os custos iniciais são inferiores aos custos de energia e custos de manutenção.

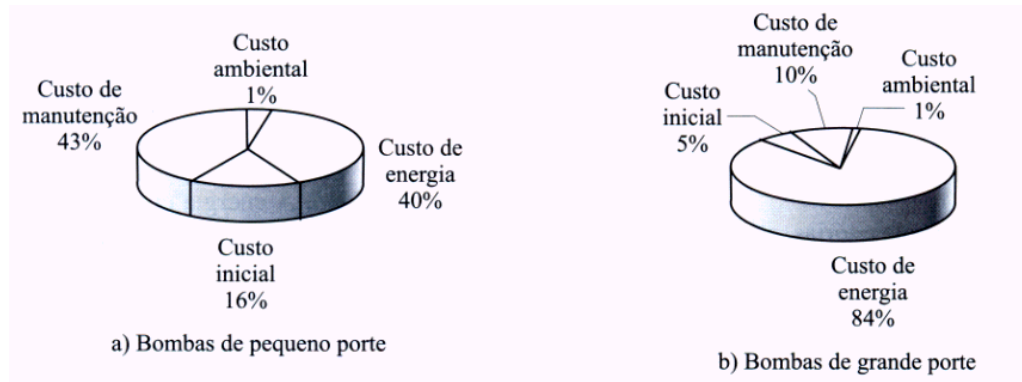


Figura 2.9 - Distribuição típica de custos (MARQUES, 2001)

O processo do CCV é um caminho para encontrar a melhor solução custo-benefício, pois permite fazer uma comparação entre alternativas com os dados disponíveis. Normalmente os sistemas de bombeamento têm um período de vida de 15 a 20 anos.

### 2.3.3 Estratégias para redução do custo de energia em sistemas de abastecimento de água

A implantação de medidas que possam reduzir os custos com energia elétrica é de suma importância para a viabilidade econômica das empresas que operam os sistemas de água e esgoto, pois o custo de energia elétrica tem sido cada vez mais elevado, principalmente devido a crise no setor energético (ELETROBRÁS et al., 2005).

Para reduzir o custo de energia elétrica em um sistema de abastecimento de água há necessidade de implementar várias ações, iniciando-se com um diagnóstico do sistema existente, principalmente com a identificação dos pontos de uso excessivo de energia. Em seguida, normalmente, são realizadas algumas ações administrativas, posteriormente a otimização dos equipamentos eletromecânicos e a otimização hidráulica, levando-se em conta os aspectos operacionais do sistema (TSUTIYA, 2001). Na Figura 2.10 são apresentados algumas ações para a economia de energia elétrica em uma instalação.

TSUTIYA (2001) apresenta diversas alternativas para a redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água, as quais são:

#### 1. Redução do custo sem diminuição do consumo de energia:

- Redução do custo sem investimento (ações administrativas): verificação da

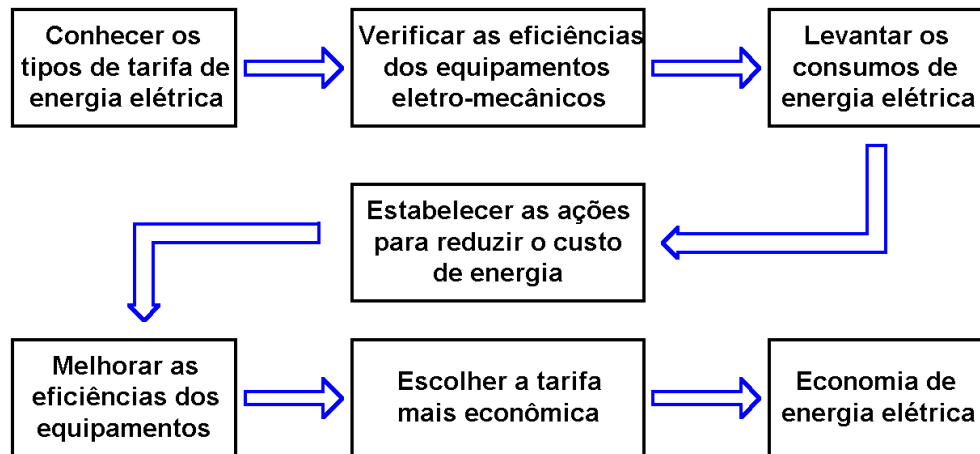


Figura 2.10 - Ações iniciais para a redução de custo de energia elétrica em uma instalação (TSUTIYA, 2001)

classe em que se enquadra o sistema (instalações de água, esgoto e saneamento gozam do desconto de 15% na tarifa); regularização da demanda contratada; alteração da estrutura tarifária; desativação de instalações sem uso (corte de ligação); conferência da medição da energia elétrica (erro de leitura); negociação com as companhias energéticas para a redução de tarifas e operações emergenciais (paradas imprevistas e/ou falta de energia elétrica).

- Redução do custo com investimento (ações operacionais): correção do fator de potência; alteração da tensão de alimentação; melhoria do fator de carga.

## 2. Redução do custo pela diminuição do consumo de energia:

- Redução da altura manométrica: redução da altura geométrica; redução das perdas de carga (escolha adequada do diâmetro, limpeza ou revestimento da tubulação etc.)
- Redução no volume de água: controle de perdas de água; uso racional da água.
- Aumento no rendimento dos conjuntos motor-bomba: melhora no rendimento do motor (motor de alto rendimento); melhora no rendimento da bomba.

## 3. Redução do custo pela alteração do sistema operacional:

alteração do sistema de bombeamento - reservação; utilização de variadores de rotação nos conjuntos motor-bomba; alteração nos procedimentos operacionais. Engloba uma infinidade de soluções possíveis que podem ser alcançadas com **estratégias operacionais otimizadas**, como por exemplo, a diminuição ou interrupção do bombeamento

em horários de ponta onde as tarifas de energia são mais caras.

4. **Redução do custo pela automação do sistema de abastecimento de água:** instalação de automação em sistemas de bombeamento, que reduz sensivelmente os custos operacionais com mão-de-obra, ao mesmo tempo em que minimiza as possibilidades de ocorrência de problemas operacionais causados por falhas humanas. Conforme se observa nas Figuras 2.11 e 2.12, o controle dos sistemas de abastecimento de água pode ser feito através de diferentes níveis de automação.

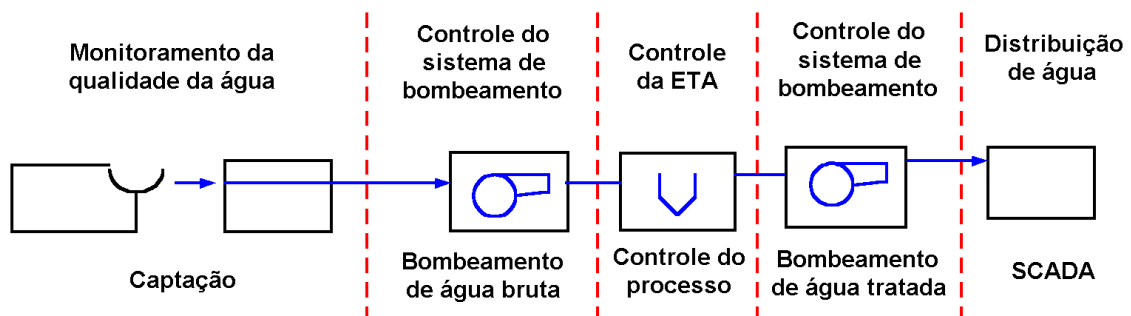


Figura 2.11 - Controle do sistema de abastecimento de água por módulos (TSUTIYA, 2001)

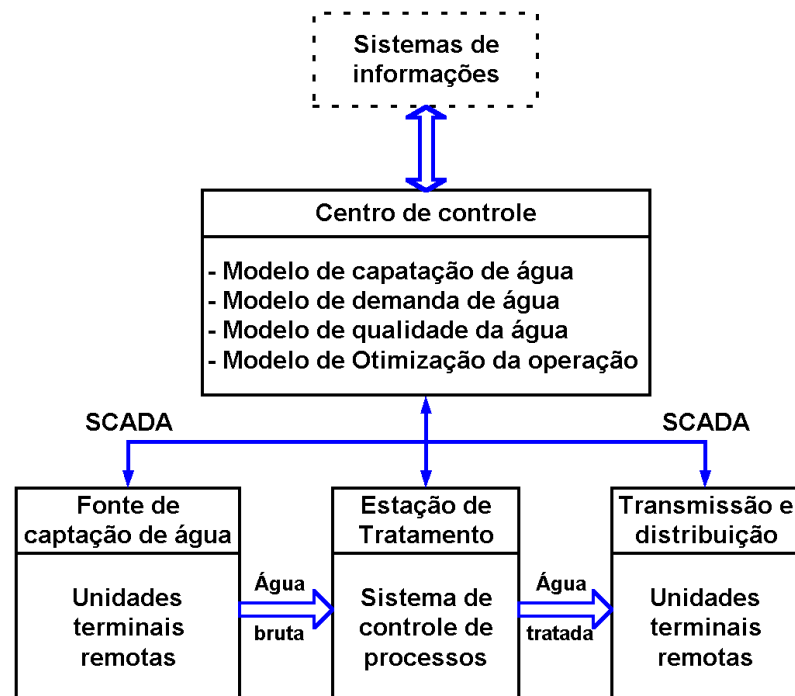


Figura 2.12 - Controle integrado do sistema de abastecimento de água (TSUTIYA, 2001)

5. **Redução do custo com a geração de energia elétrica:** aproveitamento de

potenciais energéticos; uso de geradores em horários de ponta. São ações que se referem à geração de energia por sistemas independentes ou como auto-produtor.

MONACHESI (2005) apresenta também, algumas medidas para economizar o consumo de energia, que consistem em utilizar instalações adequadas do ponto de vista da hidráulica, isto é:

- utilizar tubulações com diâmetros bem dimensionados;
- manter a tubulação em bom estado de conservação quanto à rugosidade interna;
- trabalhar com arranjos de concepção de projeto e de operação que sejam norteados pela melhor setorização das zonas de pressão, evitando-se o desperdício com altas pressões na rede, que, além de tudo, são um fator de indução de perdas hidráulicas reais e que se traduzem, em última análise, em ineficiência energética;

Cabe ressaltar, que em sistemas de abastecimento de água o consumo de energia elétrica é de cerca de 0,6 kWh por  $m^3$  de água produzida (valor médio dos sistemas operados pela SABESP). A redução no índice de perdas de água e o uso racional da água, terão influencia significativa no custo de energia elétrica, pois com a diminuição do volume de água a ser recalçada, haverá uma diminuição no consumo de energia elétrica (TSUTIYA, 2001).

Na elaboração de um projeto de automação de estações elevatórias, deverá ser considerado a dinâmica de controle do processo, ou seja, a manutenção da rotina operacional de bombeamento da instalação a ser automatizada. Outros fatores importantes a serem considerados na dinâmica de controle de processo são os mecanismos de proteção elétrica e hidráulica, bem como, as informações sobre o estado dos equipamentos que devem compor a automação.

A operação de uma instalação de recalque deverá sempre contemplar lógicas de proteção que visem preservar e prolongar a vida útil dos equipamentos. O monitoramento contínuo de sinais de proteção são pré-condições para o controle da operação da instalação, o que deverá implicar um menor tempo de paradas para manutenções não previstas, contribuindo assim para uma ótima eficiência do sistema de abastecimento de água (TSUTIYA, 2005).

No entanto, nenhuma alternativa isolada poderá trazer tantos benefícios quanto combinar duas ou mais ações. Por exemplo, um programa de redução de vazamentos irá, economizar água e reduzir as perdas de pressão levando à economia de energia a partir da redução de demanda no bombeamento. A simples substituição de uma bomba por uma mais eficiente economizará energia. Se as duas ações são coordenadas através de um programa de eficientização de água e energia, a redução nas perdas de pressão devido a vazamentos irá permitir que bombas menores sejam adquiridas, o que de outra forma não seria possível, economizando assim energia e capital adicionais. Aliás, dessas duas ações, pode-se otimizar a operação das bombas deslocando a maior carga para os períodos de menor custo tarifário, obtendo assim, melhores resultados e maior redução dos custos operacionais (JAMES et al., 2002).

A Figura 2.13 apresenta um programa de racionalização do consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água. Esse programa tem como objetivo fundamental a eliminação do desperdício, pois o consumo racional ocasiona o máximo desempenho com o mínimo de consumo, sem comprometer a segurança e a qualidade nos serviços.

## 2.4 Sistema Tarifário de Energia Elétrica Brasileiro

O sistema tarifário de energia elétrica é um conjunto de normas e regulamentos que tem por finalidade estabelecer o preço da eletricidade para os diferentes tipos de consumidores (COMITÊ DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 1994). No Brasil, o órgão regulamentador do sistema tarifário vigente é a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), autarquia sob regime especial, vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME). O instrumento legal mais recente que estabelece e consolida as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica é a Resolução ANEEL N° 456, publicada no Diário Oficial em 29 de novembro de 2000, a qual revoga a Portaria DNAEE N° 33/88.

A análise dos elementos que compõem a estrutura tarifária, seja esta convencional ou horo-sazonal, é indispensável para a correta tomada de decisão em projetos de eficiência energética. Pode-se partir de uma análise histórica, com no mínimo 12 meses, na qual apresenta informações relevantes para projetos de conservação de energia, e serve como base de comparação para futuras mudanças. Na Figura 2.14 é dada uma visão geral da tarifação adotada pelo Sistema Elétrico Brasileiro.

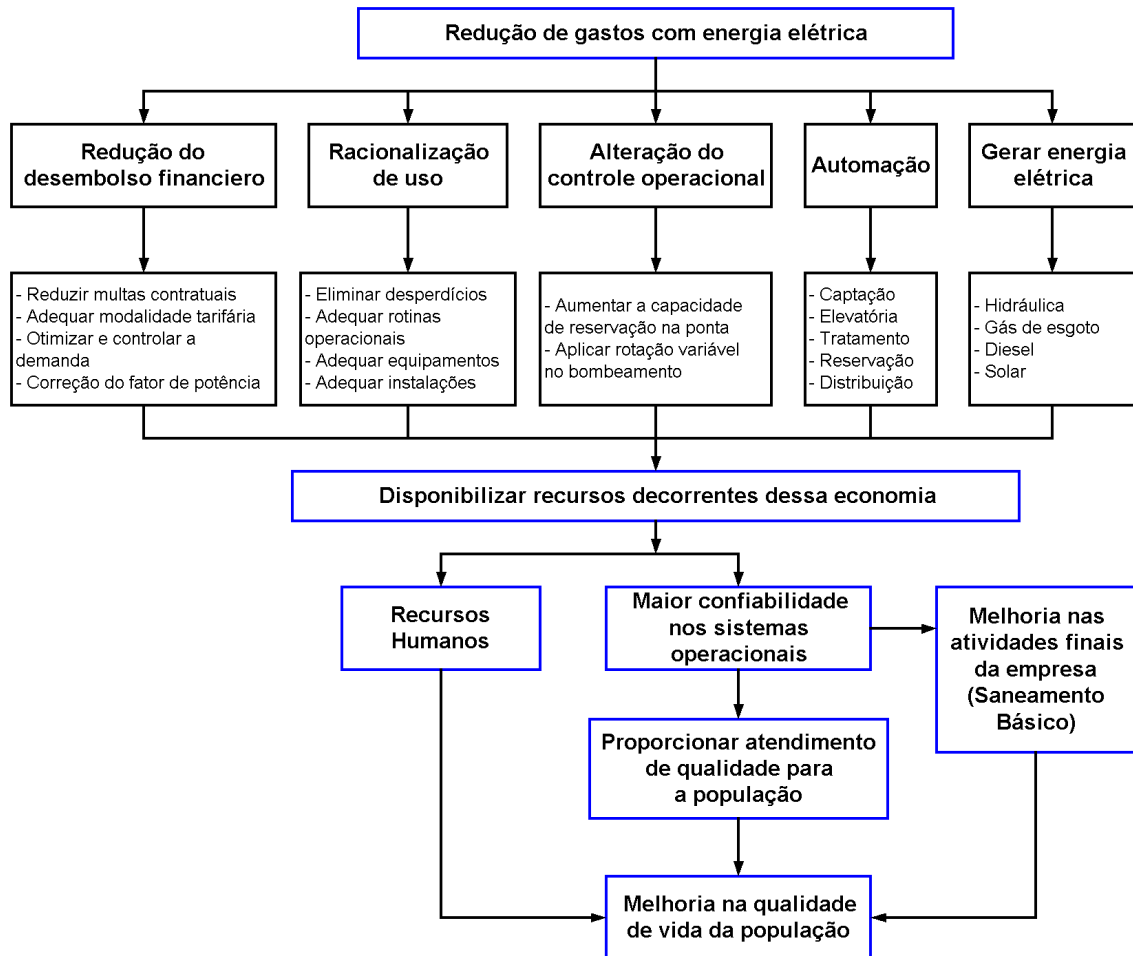


Figura 2.13 - Programa de racionalização do consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água (TSUTIYA, 2001)

Segundo HADDAD et al. (2001), várias medidas de efficientização e otimização energética não são implantadas pelos consumidores responsáveis devido aos elevados custos envolvidos, quando comparados aos possíveis decréscimos nas faturas de energia elétrica.

### 2.4.1 Classificação dos Consumidores

Segundo a Resolução ANEEL N° 456 e o PROCEL (2001), os consumidores são classificados de acordo com o nível de tensão em que são atendidos, e podem ser classificados em dois grupos principais:

- **GRUPO A:** composto por unidades consumidoras com fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3 kV ou, ainda, atendidas em tensão inferior a 2,3 kV a partir de sistema subterrâneo de distribuição. O grupo é caracterizado pela estruturação

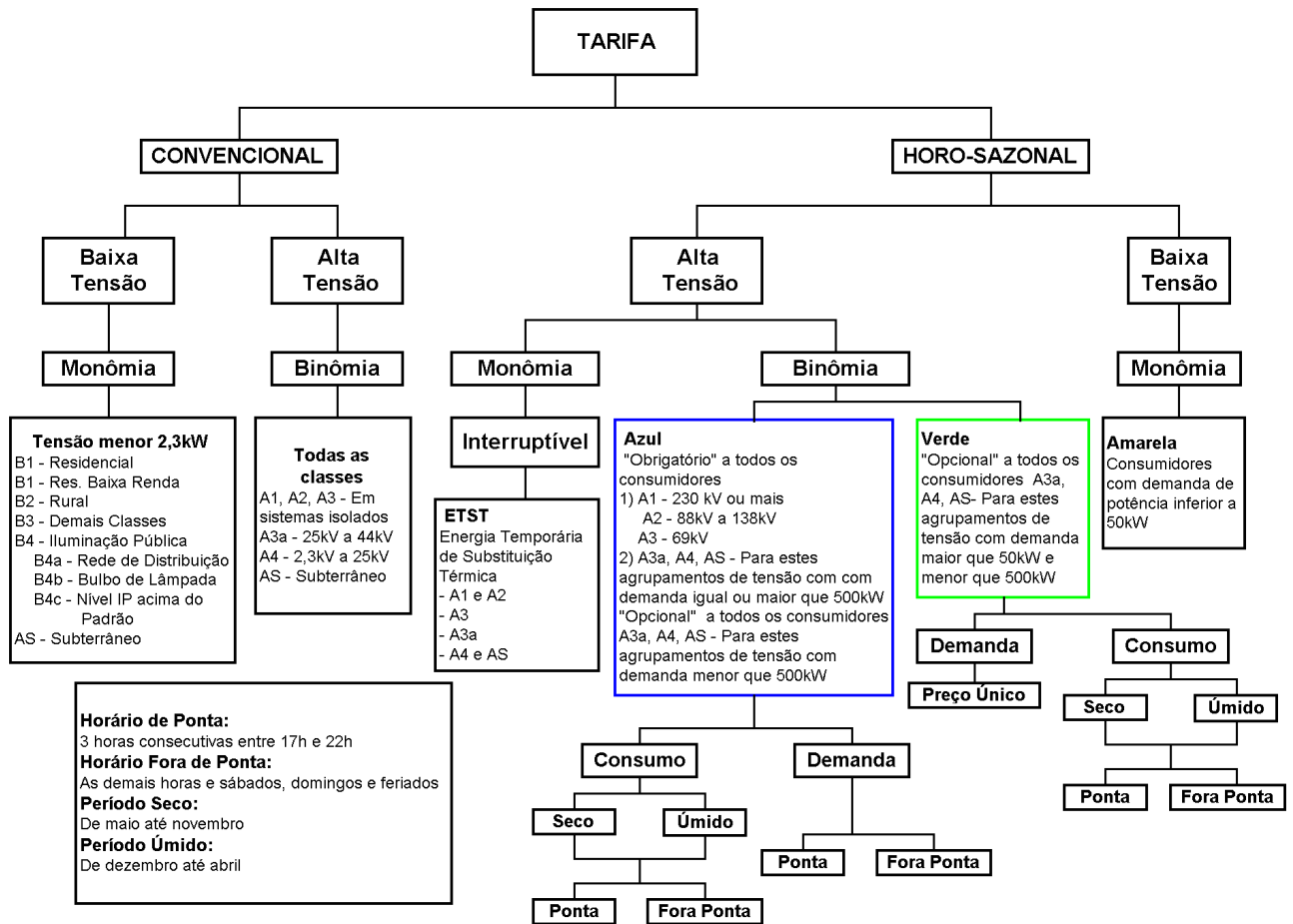


Figura 2.14 - Sistema Brasileiro de Tarificação de Energia Elétrica (Portaria DNAEE N°33/88 e N°466/97)

tarifária binômia, isto é, são cobrados tanto pela demanda quanto pela energia que consomem. Os consumidores do Grupo A podem enquadrar-se em uma das duas alternativas tarifárias, Tarificação Convencional e Tarificação Horo-Sazonal. O Grupo A é subdividido de acordo com a tensão de atendimento, tal como é apresentado na Tabela 2.1.

- **GRUPO B:** conhecidos também como consumidores secundários, o grupo está composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão inferior a 2,3 kV, geralmente em 127 ou 220 volts, ou, ainda, atendidas em tensão superior a 2,3 kV. O grupo é caracterizado pela estruturação tarifária monômia, isto é, são cobrados apenas pela energia que consomem. O Grupo B é subdividido em subgrupos de acordo com a atividade do consumidor, tal como é apresentado na Tabela 2.2.

Tabela 2.1 - Consumidores Grupo A

| Subgrupo | Tensão de fornecimento |
|----------|------------------------|
| A1       | $\geq 230$ kV          |
| A2       | de 88 kV a 138 kV      |
| A3       | de 69 kV               |
| A3a      | de 30 kV a 44 kV       |
| A4       | de 2,3 kV a 25 kV      |
| AS       | Subterrâneo $< 2,3$ kV |

Tabela 2.2 - Consumidores Grupo B

| Subgrupo | Atividade do consumidor            |
|----------|------------------------------------|
| B1       | Residencial                        |
| B1       | Residencial baixa renda            |
| B2       | Rural                              |
| B2       | Cooperativa de eletrificação rural |
| B2       | Serviço público de irrigação       |
| B3       | Demais classes                     |
| B4       | Iluminação pública                 |

## 2.4.2 Estrutura Tarifária

A estrutura tarifária é um conjunto de valores (lista de preços) aplicáveis aos componentes do consumo de energia elétrica e/ou à demanda de potência ativa, que deve estar de acordo com a modalidade de fornecimento de energia elétrica. As tarifas de energia elétrica não têm um mesmo valor para todos os consumidores, pois se diferenciam entre grupos tarifários, de acordo com a tensão de fornecimento, o momento do consumo, o tipo de tarifa e a classe do consumidor (HADDAD et al., 2001).

A nova estrutura tarifária, implementada pela Resolução ANEEL N° 456, em 20 de novembro do 2000, permitiu a implantação de um sinal econômico para os consumidores, incentivando-os à maior utilização de energia durante os períodos de menor demanda ou de maior disponibilidade de oferta pelo sistema elétrico, levando assim a uma utilização mais racional da energia.

As duas modalidades tarifárias estabelecidas pela a Resolução ANEEL N° 456 são:

- **TARIFA CONVENCIONAL:** estrutura tarifária caracterizada pela aplicação de tarifas de consumo de energia elétrica e/ou demanda de potência, independentemente, das horas de utilização do dia e dos períodos do ano. A tarifa é aplicada aos

consumidores dos grupos A e B. Para os consumidores do grupo A, somente aqueles que possuírem tensão inferior a 69 kV e demanda inferior a 500 kW, a tarifa estabelece um preço único para demanda e consumo. Para os consumidores do grupo B, é cobrada apenas o consumo. Essa modalidade tarifária, exige um contrato específico com a concessionária, no qual se pactua um único valor da demanda pretendida pelo consumidor, denominada de "Demanda Contratada". O custo da energia elétrica desses consumidores é composta pela soma das parcelas referentes ao consumo de energia, à demanda de potência e ao ultrapassagem de demanda medida se houver, observadas nas equações 2.4, 2.5, 2.6 e 2.7:

$$C_{EE} = C_{CE} + C_{DP} + C_{DU} \quad (2.4)$$

$$C_{CE} = TC \times CM \quad (2.5)$$

$$C_{DP} = TD \times DC \quad (2.6)$$

$$C_{DU} = TU \times (DM - DC) \quad (2.7)$$

onde:

$C_{EE}$  é o custo total de energia elétrica;

$C_{CE}$  é o custo do consumo de energia elétrica;

$C_{DP}$  é o custo da demanda de potência;

$C_{DU}$  é o custo da demanda de ultrapassagem de potência;

$TC$  é a tarifa do consumo de energia ( $R\$/kWh$ );

$CM$  é o consumo medido de energia elétrica ( $kWh$ );

$TD$  é a tarifa de demanda de potência ( $R\$/kW$ );

$DC$  é a demanda de potência contratada ( $kW$ );

$TU$  é a tarifa de ultrapassagem ( $R\$/kW$ );

$DM$  é a demanda de potência medida ( $kW$ ).

- **TARIFA HORO-SAZONAL (THS):** Esta tarifa permite um melhor aproveitamento da energia elétrica disponível, pois objetivam manejar os horários de consumo de forma mais adequada, reduzindo as necessidades de investimento para atendimento a novos consumidores. Do ponto de vista do consumidor, pode-se reduzir os

custos com energia elétrica ao diminuir os consumos nos horários de ponta e períodos secos do ano. O cálculo desta tarifa é influenciado pelos horários do dia (ponta e fora de ponta) e pelos períodos do ano (seco e úmido), tendo-se preços diferenciados para consumo e demanda, conforme a seguinte especificação:

- **THS Azul:** Destina-se aos consumidores do grupo A, com os seguintes critérios:
  1. Aplicação compulsória (automática): consumidores atendidos com tensão igual ou maior que 69 kV ou aqueles que demandam potência acima de 500 kW, mesmo sendo atendidos sob tensão menor que 69 kV;
  2. Aplicação opcional: consumidores atendidos com tensão inferior a 69 kV, com demanda de potência entre 50 e 500 kW (ver tabela 2.1);

A condição básica e essencial para a opção pela tarifa-azul é que o consumidor deve apresentar nos últimos 11 meses, 3 ou mais registros de demanda no intervalo de valores indicados acima, ou contratar, a partir da data mencionada, no mínimo 50 kW de demanda.

A estrutura da THS Azul é diferenciada para o consumo de energia elétrica e para a demanda de potência. A forma de cálculo dessa tarifa leva em consideração:

- a) Demanda de potência (kW): preço para o horário de ponta; e preço para horário fora de ponta.
- b) Consumo de energia (kWh): preço para horário de ponta, no período úmido; preço para fora de ponta, no período úmido; preço para horário de ponta, no período seco; e preço para fora de ponta, no período seco.

A parcela de ultrapassagem é cobrada apenas quando a demanda medida ultrapassa a Demanda Contratada, acima dos limites de tolerância, sendo diferenciada por horário, mais cara nas horas de ponta. Esses limites de tolerância são de 5% para os sub-grupos A1, A2 e A3 e de 10% para os demais sub-grupos.

O custo da energia elétrica da THS azul é composta pela soma das parcelas

dadas pelas equações 2.8; 2.9; 2.10 e 2.11:

$$C_{EE} = C_{CE} + C_{DP} + C_{DU} \quad (2.8)$$

$$C_{CE} = TC_p \times CM_p + TC_{fp} \times CM_{fp} \quad (2.9)$$

$$C_{DP} = TD_p \times DC_p + TD_{fp} \times DC_{fp} \quad (2.10)$$

$$C_{DU} = TU_p \times (DM_p - DC_p) + TU_{fp} \times (DM_{fp} - DC_{fp}) \quad (2.11)$$

onde:

$C_{EE}$  é o custo total de energia elétrica;

$C_{CE}$  é o custo do consumo de energia elétrica;

$C_{DP}$  é o custo da demanda de potência;

$C_{DU}$  é o custo da demanda de ultrapassagem de potência;

$p$  é o horário de ponta;

$fp$  é o horário fora de ponta;

$TC$  é a tarifa do consumo de energia ( $R\$/kWh$ );

$CM$  é o consumo medido de energia elétrica ( $kWh$ );

$TD$  é a tarifa de demanda de potência ( $R\$/kW$ );

$DC$  é a demanda de potência contratada ( $kW$ );

$TU$  é a tarifa de ultrapassagem ( $R\$/kW$ );

$DM$  é a demanda de potência medida ( $kW$ ).

- **THS Verde:** apresenta-se como uma opção aos consumidores do grupo A com demanda na faixa de 50 a 500 kW, sob tensão de 2,3 a 44 kV. O enquadramento na tarifa Verde dos consumidores do Grupo A, sub-grupos A3a, A4 e AS, é opcional (ver tabela 2.1). A condição para optar por a tarifa verde é que o consumidor deve apresentar nos últimos 11 meses, 3 ou mais registros de demanda iguais ou superiores a 50 kW, ou contratar, no mínimo, 50 kW de demanda. Contudo, o consumidor deve realizar o cálculo de ambas tarifas horo-sazonais (azul e verde), e optar por aquela que fornecer um menor custo. A estrutura da THS Verde é diferenciada somente para o consumo de energia elétrica segundo as horas de utilização do dia e os períodos do ano. A forma de cálculo dessa tarifa leva em consideração:

a) Demanda de potência (kW), a preço único, ou seja, independentemente do horário de uso.

b) Consumo de energia (kWh): preço para horário de ponta, no período úmido; preço para fora de ponta, no período úmido; preço para horário de ponta, no período seco; e preço para fora de ponta, no período seco.

A parcela de ultrapassagem é cobrada apenas quando a demanda medida ultrapassa em mais de 10% a Demanda Contratada.

O custo da energia elétrica da THS verde é composta pela soma das parcelas dadas pelas equações 2.12; 2.13; 2.14 e 2.15:

$$C_{EE} = C_{CE} + C_{DP} + C_{DU} \quad (2.12)$$

$$C_{CE} = TC_p \times CM_p + TC_{fp} \times CM_{fp} \quad (2.13)$$

$$C_{DP} = TD \times DC \quad (2.14)$$

$$C_{DU} = TU \times (DM - DC) \quad (2.15)$$

onde:

$C_{EE}$  é o custo total de energia elétrica;

$C_{CE}$  é o custo do consumo de energia elétrica;

$C_{DP}$  é o custo da demanda de potência;

$C_{DU}$  é o custo da demanda de ultrapassagem de potência;

$p$  é o horário de ponta;

$fp$  é o horário fora de ponta;

$TC$  é a tarifa do consumo de energia ( $R\$/kWh$ );

$CM$  é o consumo medido de energia elétrica ( $kWh$ );

$TD$  é a tarifa de demanda de potência ( $R\$/kW$ );

$DC$  é a demanda de potência contratada ( $kW$ );

$TU$  é a tarifa de ultrapassagem ( $R\$/kW$ );

$DM$  é a demanda de potência medida ( $kW$ ).

No entanto, o consumidor paga um preço final que inclui além das tarifas, as taxas ou encargos, as contribuições e os impostos, tal como é ilustrado na Figura 2.15.

O preço final se forma a partir da composição da tarifa com a tributação calculada

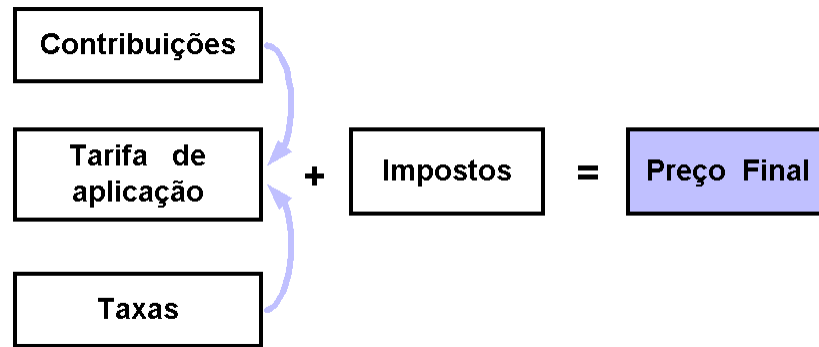


Figura 2.15 - Preço Final do Fornecimento Elétrico

a partir de métodos que fogem do escopo deste trabalho. Ao se considerar no cálculo das tarifas, além dos aspectos econômicos e financeiros, outros de natureza política, social, operacional, além dos ajustes relativos a práticas de comercialização, medição, cobrança etc., tem-se uma tarifa integrada (COMITÊ DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 1994).

Os impostos estão relacionados à política tributária nacional e/ou regional, às vezes vinculados aos serviços de eletricidade. Como exemplo de imposto, cita-se o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), que é um tributo estadual. Os tributaristas consideram esse imposto um dos mais complexos e de difícil operacionalização.

O ICMS incidente sobre o fornecimento de energia elétrica é um imposto onde as suas taxas são definidas em lei estadual. Cabe à concessionária, na qualidade de contribuinte legal e substituto tributário do referido imposto, dentro de sua área de concessão, apenas a tarefa de recolher ao Erário Estadual as quantias cobradas nas Faturas de Energia Elétrica (TSUTIYA, 2001).

De acordo com HADDAD et al. (2001), o ICMS é devido por todos os consumidores e seu cálculo é efetuado de forma onde a montante do impostos integra a sua própria base de cálculo. Para operacionalizar o cálculo é adotada a equação 2.16, definida pelo Conselho de Política Fazendária (CPF):

$$ICMS = F \times \left[ \left( \frac{1}{1 - X} \right) - 1 \right] \quad (2.16)$$

Onde:  $F$  é o custo do fornecimento de energia elétrica ( $R$ );  $X$  é a alíquota estipulada no Estado (em porcentagem %)

### 2.4.3 Faturamento de Energia e Demanda Reativa

Alguns aparelhos elétricos, como os motores e transformadores, além de consumirem energia ativa, solicitam também energia reativa necessária para proporcionar o fluxo magnético que seu funcionamento exige (MONACHESI, 2005). A Energia Reativa é aquela energia que circula continuamente entre os diversos campos elétricos e magnéticos de um sistema de corrente alternada, não realiza trabalho útil mas produz perdas por provocar aquecimento nos condutores (MEDEIROS, 1997).

A Energia Reativa é calculada pelo produto da potência reativa (kVAr) pelo número de horas de utilização, sendo a unidade de medida o quilo-Volt-Ampere-reactivo-hora (kVArh). Medido a cada trinta dias pelas concessionárias nas instalações de alta tensão, entretanto, quando a carga da instalação de baixa tensão é predominantemente composta de motores, também pode ser medido em baixa tensão (TSUTIYA, 2001).

A Resolução ANEEL N° 456 estabelece que os consumidores do Grupo A são cobrados pela energia reativa, da mesma forma que pela energia ativa. De acordo com o PROCEL (2001) o faturamento de energia e demanda reativas dependem do tipo de tarifa e são calculados da seguinte forma:

- Tarifa Convencional: considera tanto o consumo de energia reativa (UFER) quanto a demanda reativa (UFDR). Observadas nas equações 2.17 e 2.18:

$$FER = TC \times UFER \quad (2.17)$$

$$FDR = TD \times UFDR \quad (2.18)$$

onde:

$FER$  é o faturamento de energia reativa;

$FDR$  é o faturamento de demanda de potência reativa;

$UFER$  é o consumo de energia reativa;

$UFDR$  é a demanda de potência reativa;

$TC$  é a tarifa de consumo de energia reativa;

$TD$  é a tarifa da demanda de potência reativa.

- THS Azul: considera tanto o consumo de energia reativa (UFER) quanto da de-

manda reativa (UFDR), para as horas de ponta e horas fora de ponta. Temos as equações 2.19 e 2.20:

$$FER = TC_p \times UFER_p + TC_{fp} \times UFER_{fp} \quad (2.19)$$

$$FDR = TD_p \times UFDR_p + TD_{fp} \times UFDR_{fp} \quad (2.20)$$

onde:

$FER$  é o faturamento de energia reativa;

$FDR$  é o faturamento de demanda de potência reativa;

$UFER$  é o consumo de energia reativa;

$UFDR$  é a demanda de potência reativa;

$TC$  é a tarifa de consumo de energia reativa;

$TD$  é a tarifa da demanda de potência reativa;

$p$  é o horário de ponta;

$fp$  é o horário fora de ponta.

- THS Verde: considera o consumo de energia reativa na ponta e fora de ponta (UFER) e a demanda reativa (UFDR). Observadas nas equações 2.21 e 2.22:

$$FER = TC_p \times UFER_p + TC_{fp} \times UFER_{fp} \quad (2.21)$$

$$FDR = TD \times UFDR \quad (2.22)$$

onde:

$FER$  é o faturamento de energia reativa;

$FDR$  é o faturamento de demanda de potência reativa;

$UFER$  é o consumo de energia reativa;

$UFDR$  é a demanda de potência reativa;

$TC$  é a tarifa de consumo de energia reativa;

$TD$  é a tarifa da demanda de potência reativa;

$p$  é o horário de ponta;

$fp$  é o horário fora de ponta.

Não existe cobrança de ultrapassagem para a demanda de potência reativa.

#### 2.4.4 Fator de Potência

O Fator de Potência ( $fp$ ) é um índice que reflete como a energia está sendo utilizada, mostrando a relação entre a potência realmente útil (ativa-W) e a potência total (aparente-VA), fornecida pelo sistema elétrico (MEDEIROS, 1997). Esse índice é também definido como a razão entre a energia elétrica ativa e a raiz quadrada da soma dos quadrados das energias elétricas ativa e reativa, consumidas num mesmo período especificado (HADDAD et al., 2001). A Figura 2.16 ilustra o Triângulo de Potências e a relação entre as potências que fundamenta o índice de  $fp$ .



Figura 2.16 - Triângulo de Potências

O  $fp$  é sempre um número entre zero e 1 e pode ser capacitivo ou indutivo, dependendo dos elementos que compõem a carga. No entanto, a maioria das cargas de uma instalação elétrica são indutivas (MEDEIROS, 1997).

A Resolução ANEEL N° 456 fixa o fator de potência de referência  $fr$  (capacitivo ou indutivo) em 0,92 como o limite mínimo permitido de  $fp$  para as unidades consumidoras. A medição do  $fp$  é obrigatória e permanente para as unidades consumidoras do Grupo A, enquanto para o Grupo B, a medição será facultativa.

Os novos critérios para o faturamento regulamentam a cobrança de excedente de energia reativa abandonando a figura do “ajuste por baixo fator de potência” a qual sempre se associou a ideia de multa. O excedente de reativo indutivo ou capacitivo, que ocorre quando o  $fp$  é inferior ao fator de potência de referência  $fr = 0,92$ , é cobrado utilizando-se tarifas de fornecimento de energia ativa. Surge então o conceito de energia

ativa reprimida, ou seja, a cobrança pela circulação de excedente de reativo no sistema elétrico (HADDAD et al., 2001).

De acordo com o Art. 65 da Resolução ANEEL N° 456, para cada unidade consumidora faturada na estrutura tarifária horo-sazonal ou na estrutura tarifária convencional com medição apropriada, o faturamento correspondente ao consumo de energia elétrica e à demanda de potência reativas, será calculado de acordo com as equações 2.23 e 2.24:

$$FER_p = \sum_{t=1}^n [CA_t \times (\frac{fr}{fp} - 1)] \times TCA_p \quad (2.23)$$

$$FDR_p = [MAX_{t=1}^n (DA_t \times \frac{fr}{fp}) - DF(p)] \times TDA_p \quad (2.24)$$

onde:

$t$  indica intervalo de uma hora, no período de faturamento;

$p$  indica o posto horário, ponta ou fora de ponta, para as tarifas horo-sazonais ou período de faturamento para a tarifa convencional;

$n$  é o número de intervalos de integralização  $t$ , por posto horário  $p$ , no período de faturamento.

$FER_p$  é o valor do faturamento, por posto horário  $p$ , correspondente ao consumo de energia reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência  $fr$ , no período de faturamento;

$CA_t$  é o consumo de energia ativa medida em cada intervalo de uma hora  $t$ , durante o período de faturamento;

$fr$  é o fator de potência de referência igual a 0,92;

$fp$  é o fator de potência da unidade consumidora, calculado em cada intervalo  $t$  de uma hora, durante o período de faturamento;

$TCA_p$  é a tarifa de energia ativa, aplicável ao fornecimento em cada posto horário  $p$ ;

$FDR_p$  é o valor do faturamento, por posto horário  $p$ , correspondente à demanda de potência reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência  $fr$  no período de faturamento;

$DA_t$  é a demanda medida no intervalo de integralização de uma hora  $t$ , durante o

período de faturamento;

$DF_p$  é a demanda faturável em cada posto horário  $p$  no período de faturamento;

$TDA_p$  é a tarifa de demanda de potência ativa aplicável ao fornecimento em cada posto horário  $p$ ;

$MAX$  é a função que identifica o valor máximo da fórmula, dentro dos parênteses correspondentes, em cada posto horário  $p$ ;

Segundo HADDAD et al. (2001) a correção do fator de potência pode ser feito mediante a instalação de bancos de capacitores estáticos ou automáticos, através de motores síncronos, liberando a parcela de energia ativa da rede, sendo essa medida uma das mais baratas a ser implementadas para a redução das despesas com energia elétrica.

## 2.5 Legislação e Programas de Eficiência Energética Brasileiros

Uma política de eficiência energética é evidentemente distinta de um programa emergencial para reduzir o consumo. A conservação busca reduzir o consumo energético sem reduzir o serviço prestado, com benefícios econômicos para o consumidor, que devem ser permanentes. Assim, por envolver uma cadeia de investimentos desde fabricantes até os consumidores, uma política de eficiência energética exige uma estratégia que mostra seus principais efeitos no médio e longo prazos (INEE, 2001).

Os primeiros programas de eficiência energética no Brasil surgiram após os choques do petróleo ocorridos na década do 70. Em 1981, foi criado o Programa CONSERVE cujo objetivo era a conservação da energia e a substituição de derivados do petróleo por eletricidade no setor industrial.

Devido a expansão do sistema elétrico e o aumento abrupto do consumo de eletricidade, a Portaria Interministerial N° 1.877 de 30 de dezembro de 1985, institui o PROCEL - Programa de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica (mais tarde chamado Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica), como a primeira tentativa sistemática de promover o uso racional da eletricidade. Depois de um período pouco ativo (1991-1994), o PROCEL foi reativado e reestruturado, dando um novo enfoque ao programa. Atualmente, o PROCEL tem realizado uma quantidade de acordos de coo-

peração com entidades internacionais ligadas à eficiência energética, passou também a dedicar maior atenção aos problemas de marketing e à busca efetiva de um mercado que considere de forma permanente a eficiência energética (transformação de mercado).

Em fevereiro de 1995, foi aprovada a Lei N° 8.987, denominada Lei de Concessões Elétricas. A regulamentação, para o caso específico do setor elétrico, se deu no mesmo ano através da Lei 9.074, com isso foram necessárias uma série de implementações de cunho institucional para viabilizar mudanças no setor elétrico. A Lei N° 9.427, de 26 de dezembro de 1996, institui a ANEEL, agência responsável pela regulamentação tarifária e que tem como objetivo principal traçar as diretrizes da indústria de energia e fiscalizar o cumprimento da legislação.

Através da Resolução da ANEEL N° 261, de 03 de setembro de 1999, foi formalmente lançado o primeiro Manual para Elaboração do Programa Anual de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica - Ciclo 1999/2000, que regulamentou a obrigatoriedade de aplicação de recursos das concessionárias de energia elétrica em ações de combate ao desperdício de energia elétrica e pesquisa e desenvolvimento tecnológico do setor elétrico para o biênio 1999/2000. A característica básica deste manual é que as medidas sejam, predominantemente, implementadas nas instalações de consumidores podendo envolver, também, ações institucionais relacionadas com o uso final da energia.

Atualmente, está vigente, o Manual para a Elaboração do Programa de Eficiência Energética - Ciclo 2005/2006, que regulamenta os procedimentos dirigidos as concessionárias de serviço público de distribuição de energia elétrica, para elaboração do Programa de Eficiência Energética (PEE). Define-se neste manual a estrutura e forma de apresentação, os critérios para avaliação econômica, aprovação e acompanhamento, e os tipos de projetos que podem constar do PEE. O manual também apresenta os procedimentos para contabilização dos custos e os tipos de recursos que podem ser utilizados para elaboração do PEE (ANEEL, 2005).

Em 17 de outubro de 2001 foi promulgada a Lei N° 10.295, que dispõe sobre a "Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia", esta lei instituiu a etiquetagem obrigatória no Brasil, mecanismo de reconhecida eficácia para melhorar o uso eficiente de energia. Para regulamentar essa Lei, foi promulgado em 19 de dezembro de 2001 o Decreto N° 4.059, que define os procedimentos e as responsabilidades para o estabelecimento dos indicadores e dos níveis de eficiência energética. O Decreto instituiu o Comitê Gestor de

## Indicadores e de Níveis de Eficiência Energética (CGIEE)

O CGIEE está constituído pelo Ministério das Minas e Energia (MME), Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC), Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Agência Nacional de Petróleo (ANP), um representante de universidade e um cidadão brasileiro, ambos especialistas em energia, com mandatos de dois anos. Algumas das atribuições deste comitê são: a elaboração das regulamentações específicas para cada tipo de aparelho consumidor de energia; o estabelecimento do Programa de Metas com indicação da evolução dos níveis a serem alcançados por cada equipamento regulamentado; a constituição de comitês técnicos para analisar matérias específicas e a deliberação sobre as proposições do grupo técnico para a efficientização de energia em edificações. Portanto, a atuação do GCIEE é uma tarefa de longo prazo e que busca instituir uma cultura de equipamentos eficientes.

Mediante o Decreto N° 4.508 de 11 de dezembro 2002 foi regulamentado o primeiro equipamento, o motor elétrico trifásico, que segundo estudos, pode chegar a consumir 32% da energia elétrica do país. No setor de saneamento o motor elétrico é amplamente usado para o acionamento das bombas, por isso sua importância nos estudos que visam como objetivo a eficiência energética dos sistemas de abastecimento de água.

Assim, com o objetivo de implementar medidas de conservação e uso eficiente de energia e água em sistemas de saneamento ambiental, foi criado em 2003, o Programa de Eficiência Energética em Saneamento Ambiental (PROCEL SANEAR), com a meta de reduzir em 20% o consumo de energia elétrica no setor. Os principais objetivos do PROCEL SANEAR são: promover ações que visem o uso eficiente de energia elétrica e água em sistemas de saneamento ambiental, incentivar o uso eficiente dos recursos hídricos e contribuir para a universalização dos serviços de saneamento ambiental (ELETROBRÁS et al., 2005).

## 3 Modelagem de Sistemas de Abastecimento de Água

### 3.1 Considerações gerais

Os sistemas de abastecimento de água são projetados e operados para transportar, armazenar, tratar e distribuir água às populações. Esses sistemas são concebidos com base em critérios técnico-econômicos e de engenharia para satisfazer as necessidades incertas de consumo. Usualmente, durante todo o seu ciclo de vida, esses sistemas funcionam muito além da capacidade para que foram projetados. No entanto, o abastecimento de água em condições satisfatórias é essencial para o bem estar da população, pois seu fornecimento adequado está estreitamente ligado com o desenvolvimento econômico, social e ambiental da população atingida (JAMES et al., 2002).

Segundo ORMSBEE e LANSEY (1994), devido ao aumento dos níveis de urbanização e, conseqüentemente, à mudança nos padrões de demanda, a operação de muitos sistemas de abastecimento de água tem se tornado uma tarefa progressivamente complexa. Diante desse cenário, a busca por soluções técnicas tem sido alvo de pesquisas teóricas e aplicadas, lançando-se mão dos recursos da pesquisa operacional acoplados aos modernos recursos da informática.

Com as modernas tecnologias disponíveis e acessíveis, duas ações importantes se viabilizam: o monitoramento do sistema através de automação de medidas em tempo real de pressões, vazões, níveis de reservatórios e a implementação da modelagem matemática com uso de simuladores numéricos que possibilitam investigar o comportamento hidráulico e a desejada otimização operacional dos sistemas de abastecimento de água.

Para modelar os sistemas de abastecimento de água, deve-se ter em conta, que

o consumo de água é alterado em função de uma série de fatores, tais como o clima, padrão de vida da população, sistema de fornecimento e cobrança (serviço medido ou não), qualidade da água fornecida, custo e sistema tarifário, nível de pressão na rede distribuidora, existência ou não de redes de esgoto, tipo de uso da água, além de outros fatores (BORGES, 2004).

Os modelos de simulação destinam-se a oferecer uma resposta rápida do sistema, face a sua complexidade, sem ser necessário intervir no próprio sistema ou arriscá-lo a modos de operação desconhecidos. Os problemas podem ser antecipados e as soluções avaliadas antes dos investimentos serem implementados. Conseqüentemente, a condição de se estabelecer uma regra de operação, com a utilização de qualquer modelo a priori, é sempre melhor do que uma operação baseada apenas na experiência dos operadores (ZAHED, 1990).

## 3.2 Modelos de Simulação Hidráulica

Os modelos de simulação são ferramentas eficazes e necessárias nos sistemas de abastecimento de água, sendo utilizados na fase de projeto (dimensionamento das unidades) e de operação (avaliação de seu desempenho). Foram introduzidos nos finais dos anos 60, e desde então, com os avanços tecnológicos, os modelos tem sido aperfeiçoados (CARRIJO, 2004).

Muitos dos modelos matemáticos para simulação de redes de abastecimento de água possuem módulos de cálculo hidráulico e de qualidade de água. Os cálculos hidráulicos destes modelos se baseiam nos princípios de Conservação de Massa e Conservação de Energia.

Aplicando a Lei da Conservação de Massa aos nós de uma rede, a demanda em um sistema representa a diferença entre a vazão aduzida (entrada) no sistema e a vazão requerida (saída) do sistema. Seguindo esse conceito, LANSEY e MAYS (2000) apresentam a equação 3.1:

$$\sum Q_i - \sum Q_j = q \quad (3.1)$$

sendo que  $Q_i$  e  $Q_j$  são as vazões das tubulações com fluxo direcionado ao nó (entrada) e para o fluxo em sentido oposto ao nó (saída), respectivamente, e  $q$  representa a demanda ou consumo no nó.

Na Lei da Conservação de Energia, a diferença de energia entre dois pontos é igual a soma de todas as perdas de carga (atrito e localizada) acrescidas às energias adicionais (bombas) nos trechos. Um balanço de energia pode ser descrito sob três formas: (1) entre dois pontos de um trecho, (2) entre dois nós de energia constante contendo uma série de tubulações, válvulas e bombas entre esses pontos, (3) um circuito que começa e termina no mesmo ponto. LANSEY e MAYS (2000) apresentam essas afirmações na equação 3.2.

$$\sum_{i \in \mathfrak{J}} h_{p_i} + \sum_{i \in \mathfrak{J}} h_{b_i} = \Delta E \quad (3.2)$$

sendo  $\mathfrak{J}$  um circuito (aberto ou fechado);  $h_p$  a perda de carga do componente  $i$  pertencente ao circuito  $\mathfrak{J}$ ;  $h_b$  a energia adicionada pela bomba no trecho  $i$  pertencente ao circuito  $\mathfrak{J}$  e  $\Delta E$  a diferença de energia entre os pontos extremos do circuito.

A solução do problema hidráulico é obtida quando as equações hidráulicas (equações 3.1 e 3.2) de balanço nos nós e nos circuitos são satisfeitas.

Um modelo de simulação pode ser considerado como a união de um algoritmo de cálculo com os respectivos dados de entrada. Os dados de entrada do modelo simulador referem-se aos elementos físicos do sistema, tais como: comprimento, diâmetro e coeficiente de rugosidade da tubulação, cotas nos nós e nos reservatórios, dimensões dos reservatórios, curvas das bombas, localização dos medidores de pressão e válvulas (BORGES, 2004). Esses modelos são alimentados por dados cadastrais que indicam a topologia do sistema, dados operacionais, como níveis dos reservatórios e dados de consumo, como as demandas de água revistas.

ZAHED (1990) ressaltou que os modelos de simulação podem ser utilizados na operação em tempo real, de forma a verificar a resposta do sistema a uma dada manobra. A simulação por períodos extensivos ajuda na operação, verificando se as pressões nos nós e nos pontos de reserva apresentam valores adequados, no entanto, considerou que os modelos em períodos extensivos deveriam ser utilizados admitindo-se uma curva de consumo conhecida ou adotada.

Dentre os benefícios da implantação de um modelo simulador para controle operacional em um sistema de abastecimento se tem: melhor compreensão do funcionamento do sistema, calibração da rede existente, previsão de operação do sistema para atender às necessidades (normais e emergenciais) (BORGES, 2004).

Esses modelos podem ser usados para a determinação das principais características do sistema (pressões, operação das estações elevatórias, níveis de água nos reservatórios etc.), porém, não podem determinar o ótimo funcionamento ou os custos mínimos de operação e manutenção.

MONACHESI (2005) apresenta alguns tipos clássicos de aplicação dos modelos simuladores:

- Sob a ótica do planejamento e do projeto, as análises são feitas, dentre outras funções, para: prevenir o colapso dos sistemas (possibilitando a execução de obras de ampliação no momento ótimo); estudar que alteração seria necessária no sistema no caso de introduzir um consumo significativo (indústria, bairro etc.); avaliar o período de vida útil do sistema existente em função da projeção do crescimento demográfico; estabelecer etapas de obras, otimizando a aplicação dos recursos financeiros; e estudar a circulação da água, evitando problemas de qualidade.
- Sob a ótica da operação, as análises hidráulicas podem ser úteis, dentre outras finalidades, para: a identificação de problemas de abastecimento (pressão insuficiente ou exagerada e/ou qualidade de água distribuída); a otimização energética de sistemas de bombeamento e reservação (estudo de paralisação de elevatórias em horários críticos); a detecção de perdas; o treinamento de operadores (encarregados de operação e de manutenção); o simples entendimento do funcionamento do sistema que se opera; e o controle em tempo real.

Segundo CARRIJO (2004), as várias unidades como reservatórios, estações de bombeamento, válvulas, redes de distribuição primária e secundária, são interligados, porém, não de forma padronizada, o que dificulta a simulação hidráulica para avaliação da operação do sistema ou mesmo para projetos de futuras expansões, aliás, os cadastros técnicos, em geral não atualizados e não apresentam informações confiáveis do sistema.

Diversos modelos de simuladores hidráulicos têm sido propostos na literatura. Atualmente, o simulador *EPANET* destaca-se entre os demais modelos, por ser um software de distribuição gratuita, sem limitação de número de trechos e inclusive com código aberto que possibilita a programação. O *EPANET* é um programa de computador que permite executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade da água de sistemas de distribuição sob pressão (ROSSMAN, 2001).

O *EPANET* modela o sistema de distribuição de água como um conjunto de trechos ligados a nós. Os trechos representam as tubulações, as bombas e as válvulas de controle. Os nós representam junções, reservatórios de nível fixo (RNF) e reservatórios de nível variável (RNV) (ROSSMAN, 2001). A Figura 3.1 ilustra como esses componentes se podem ligar entre si para constituir uma rede.

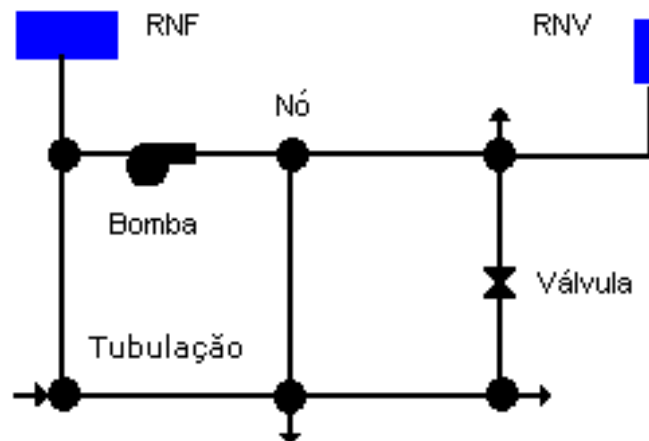


Figura 3.1 - Componentes físicos de um sistema de distribuição de água (ROSSMAN, 2001)

De acordo com ROSSMAN (2001) algumas das características dos componentes físicos para modelar a rede são:

- Os RNF são nós especiais que representam um volume de armazenamento de água de capacidade ilimitada e carga hidráulica constante. São utilizados para simular lagos, rios, aquíferos ou ligações a outros sistemas. As propriedades dos RNF são totalmente independentes do funcionamento da rede, pelo que os resultados destes parâmetros não são alterados durante a simulação.
- Os RNV são nós especiais da rede que possuem uma capacidade de armazenamento limitada e que pode variar ao longo da simulação. São modelados para operar entre as alturas de água mínima e máxima. Um RNV é definido pelas seguintes propriedades: cota de fundo, diâmetro do reservatório, altura de água mínima, altura de água máxima, altura de água inicial para o cenário a simular.
- As bombas são trechos de rede que transferem energia para o escoamento unidirecionalmente, aumentando a sua carga hidráulica. As bombas podem ser ligadas ou

desligadas em determinados períodos de tempo ou quando ocorrem determinadas condições de operação na rede. Os principais dados para as bombas, são os nós inicial e final e a curva da bomba. Os principais resultados da simulação são a vazão bombeada e a altura de elevação. Para os cálculos energéticos é importante a curva de rendimento do conjunto motor-bomba.

O módulo de simulação hidráulica do *EPANET* calcula a carga hidráulica nos nós e a vazão nos trechos, para um conjunto fixo de níveis nos RNF, alturas nos RNV e consumos para uma sucessão de pontos, ao longo do tempo. A solução para o valor da carga hidráulica e para a vazão em um ponto particular da rede, em determinado instante, é obtida resolvendo simultaneamente a equação da continuidade (conservação da massa) para cada nó e a equação da conservação da energia para cada trecho da rede. Esse procedimento denominado “Balanço Hidráulico” da rede, requer a utilização de técnicas iterativas para resolver as equações não lineares envolvidas (ROSSMAN, 2001).

Embora existam vários métodos para análise de redes de distribuição de água (gradiente local, Newton-Raphson, linearização sucessiva e minimização numérica), o simulador hidráulico *EPANET 2* utiliza um Método Híbrido Nó-Malha para resolver as equações da continuidade, da conservação da energia e da perda de carga em função da vazão, características do equilíbrio hidráulico de uma rede em um dado instante. TODINI e PILATI (1987) optaram por designar esse método como sendo o “Método do Gradiente”.

A simulação hidráulica é importante para um melhor projeto de redes de abastecimento, mas não é suficiente para uma melhor operação na distribuição da água. Alguns autores, como ZAHED (1990), destacam que há necessidade de um sistema automatizado, com o apoio de softwares para análise, previsão de consumos e otimização para a melhoria da operação dos sistemas de distribuição.

### 3.3 Calibração de Sistemas de Abastecimento de Água

WALSKI (1983) definiu a calibração como um processo que consiste na comparação de valores de vazões e pressões previstas e observadas, para condições de operação conhecidas e que ajusta os dados de entrada de um modelo, até que as pressões calculadas com o modelo sejam próximas daquelas observadas no sistema real.

O modelo de simulação hidráulico resolve as equações da continuidade e energia

utilizando os dados coletados no sistema em operação, porém o modelador não deve assumir que o modelo seja uma representação matemática fiel do sistema. Assim, antes de utilizar os resultados obtidos pelo modelo desenvolvido, é fundamental a calibração minuciosa do modelo até que simule condições de campo para um horizonte especificado e um nível de acurácia estabelecido.

De acordo com WALSKI (2001), o processo de calibração é necessário pelas seguintes razões:

- Confiança, pois os resultados fornecidos pelo modelo computacional são frequentemente utilizados para tomadas de decisão na operação ou melhorias nos projetos hidráulicos. A calibração produz informações sobre as condições reais do sistema, aumentando a confiança e fornecendo previsões sobre os procedimentos para melhoria do sistema.
- Entendimento, devido a que o processo de calibração de um modelo hidráulico fornece informações dos procedimentos e performances do sistema. Com um melhor entendimento do sistema, o modelador terá uma idéia dos possíveis impactos das mudanças operacionais e das futuras expansões do sistema.

ZAHED (1990) ressaltou que a calibração poderia ser realizada através de algoritmos matemáticos que estimam os parâmetros, de forma que os valores medidos no campo coincidam com os valores calculados no modelo de simulação. De acordo com este autor, o conhecimento dos coeficientes de rugosidade dos trechos, através de medidas de campo, é um processo difícil e oneroso devido a suas características dinâmicas.

SAVIC e WALTERS (1997) implementaram uma metodologia de otimização utilizando os algoritmos genéticos (AGs) para calibração de redes de distribuição de água. Os autores enumeraram as vantagens dos AGs quando comparados com os métodos de tentativa e erro. O modelo desenvolvido pode ser utilizado para calibrar uma grande quantidade de parâmetros hidráulicos, ou seja, calibração não só de coeficientes de rugosidade e demandas, mas de cotas topográficas, diâmetros e outros parâmetros da rede.

A calibração de um modelo de redes é um procedimento preliminar a ser adotado antes de qualquer análise de reabilitação e/ou operação de redes (sistema existente) com objetivo de identificar os parâmetros do sistema e assim poder representar, por meio de simulações hidráulicas, o comportamento realístico das variáveis de estado. O procedi-

mento de calibração visa ajustar os parâmetros do sistema de tal forma que o desvio entre os dados simulados e os dados observados seja mínimo (CHEUNG, 2003).

Depois que os dados são calibrados, os modelos computacionais podem ser utilizados para diversas finalidades, principalmente para auxiliar no dimensionamento ótimo de componentes da rede, seja no projeto de expansão, operação ou reabilitação.

### 3.4 Operação de Sistemas de Abastecimento de Água

A operação de um sistema de abastecimento de água tem como objetivo principal o atendimento das demandas de consumo a um menor custo operacional com confiabilidade, segurança e eficiência energética. De acordo com LUVIZOTTO (1995), a operação de um sistema de abastecimento consiste no estabelecimento de regras operacionais, isto é, na seqüência de manobras efetuadas sobre os seus elementos ativos, tais como válvulas, bombas e outros componentes, de forma a atender o objetivo descrito anteriormente. Essa seqüência de manobras (regras operacionais) são definidas com base nos dados do sistema e seus elementos no estado atual e nos estados previsionais.

ZAHED (1990) afirmou que para que se possa definir a melhor regra operacional para um sistema de abastecimento de água, algumas condições básicas são necessárias:

1. **Definição dos objetivos a serem alcançados:** envolve aspectos de natureza técnica (ex: confiabilidade do abastecimento, pressões adequadas etc.), econômica (ex: minimizar custos operacionais), social (ex: atender as necessidades da população) e política (ex: cumprir com a legislação vigente).
2. **Conhecimento do sistema:** conhecer a topologia do sistema e as características hidráulicas e mecânicas dos elementos que o compõem, o que permitirá que o modelo matemático utilizado represente de forma mais fiel possível o sistema em análise.
3. **Conhecimento de dados previsionais de consumo:** indispensável na obtenção de modelos de simulação em tempo real.
4. **Disponibilidade de modelos matemáticos:** estudo das diferentes técnicas propostas com a finalidade de modelação da rede hidráulica.

Definidas as regras operacionais, o sistema poderá ser operado de variadas formas,

sendo usual classificar essas formas de operação de acordo com a estratégia utilizada. A definição da estratégia a ser utilizada depende das características do sistema e da disponibilidade de recursos técnicos e financeiros (LUVIZOTTO, 1995). O controle pode-se exercer de duas formas:

- **Controle de forma isolada ou controle local:** esse controle pode ser exercido de três maneiras: *o controle manual*, onde os elementos do sistema são manobrados por operadores locais, que possuem pouca ou nenhuma informação a respeito do restante do sistema, é aplicado em sistemas simples; *o controle automático*, mantém a mesma simplicidade do controle manual, prescindindo do operador humano, é o caso de reservatórios controlados por bóias e o das elevatórias operadas a partir de pressostatos; e *o controle automático programado*, variante mais evoluída do controle local, é baseado em Controladores Lógicos Programados (PLC), capazes de adquirir, analisar e comandar o processo.
- **Controle centralizado:** o processo de decisão fica a cargo de uma central de controle, que se baseia em dados do sistema obtidos através de rádio, telefone ou telemetria. O controle pode ser exercido por operadores locais que recebem ordens da central, ou ainda por um operador central que controla remotamente os elementos do sistema. Esta última forma é conhecida como sistema *SCADA*. Uma possibilidade ainda mais avançada de controle central, é aquela totalmente automatizada em que o computador seria também o decisor.

Através da automação é possível interferir nas diversas unidades de controle, em tempo real, o que acarreta uma grande melhoria no desempenho operacional, uma vez que todas as variáveis envolvidas no processo são monitoradas possibilitando a ação imediata sobre as unidades de controle. As variáveis monitoradas são: pressão de redes e recalque; vazões de produção e distribuição; volumes de produção e distribuição; níveis dos reservatórios; vibração dos conjuntos moto-bomba; temperatura dos mancais dos conjuntos motor-bomba; grandezas elétricas; cloro residual; fluor residual. Os equipamentos controlados são: conjuntos motor-bomba; válvulas motorizadas para controle de vazão, pressão e bloqueio de redes (MALHER et al., 2003).

A partir de um centro de controle operacional, os operadores podem monitorar e controlar qualquer situação operacional, mediante o recebimento de dados de estações

remotas e o envio de comando para as mesmas. Todas informações são obtidas em tempo real, de forma a identificar qualquer ocorrência, visando à correção e, se necessário ao acionamento do pessoal da manutenção.

As formas de operar-se um sistema de abastecimento de água são muito variadas e dependem de vários fatores, tais como a dimensão e a complexidade do sistema; a experiência dos operadores; a disponibilidade de equipamentos apropriados para comunicação, para comando de estruturas de controle e para cálculos; e a disponibilidade de modelos matemáticos para análises das informações. Outros aspectos igualmente importantes são a segurança, a confiabilidade e os custos operacionais (CARRIJO et al., 2004).

GARGANO e PIANESE (2000) acrescentaram outros aspectos importantes, tais como: o consumo (demanda) que varia de forma aleatória, possíveis falhas ou remoção do serviço de um ou mais componentes eletromecânicos do sistema (tubulações, bombas, válvulas etc.), quantidade de água disponível nos reservatórios para suprir o aumento diário ou semanal das demandas e a qualidade da água a ser distribuída ao consumidor.

Um sistema de abastecimento deve ser operado de maneira eficiente, com menores gastos de energia elétrica e de manutenção, fornecendo para cada nó da rede de distribuição a demanda de consumo com pressão desejada. Além disso, deve ser confiável no sentido de permitir o suprimento de água em condições anormais ocasionadas por falhas em componentes do sistema.

Assim, pode-se citar dois aspectos fundamentais na operação de sistemas de abastecimento de água:

1. O custo da energia elétrica consumida pelas operações de bombeamento de água que representa a maior parcela dos custos operacionais destes sistemas.
2. A confiabilidade que pode ser definida como a medida da performance (desempenho) do sistema. De acordo com MAYS (1989), existem dois tipos de confiabilidade que devem ser consideradas:

- **Confiabilidade mecânica:** é a capacidade que os componentes do sistema têm de atender as necessidades dos consumidores continuamente e, por longo período de operação, sem necessidade de freqüentes reparos e/ou modificações de componentes ou sub-componentes. No caso de sistemas de abastecimento de água, os dados básicos sobre falhas e informações sobre reparos são escassos,

o que dificulta o cálculo matemático da confiabilidade mecânica.

- **Confiabilidade hidráulica:** é a capacidade que os componentes do sistema têm para fornecer serviço com nível aceitável de interrupções, mesmo em condições anormais. Essa medida é um índice de desempenho de um sistema de distribuição. O desempenho hidráulico do sistema de distribuição depende, em grande parte, dos seguintes fatores: interação entre as unidades de adução, reservação, bombeamento e reguladores de vazão e pressão; confiabilidade/disponibilidade de componentes individuais do sistema e variação espacial e temporal de demandas.

GARGANO e PIANESE (2000) definiram a confiabilidade hidráulica como a capacidade que o sistema possui de distribuir uma quantidade de água requerida pelos usuários, sob as diversas condições operacionais a que o sistema pode ser submetido. Esses autores apresentaram uma metodologia para avaliar a confiabilidade hidráulica baseada na análise estatística de índices de performance hidráulica, derivados de um grande número de simulações e de vários cenários de demandas de água e/ou condições operacionais. A operação adequada de um sistema de abastecimento depende de um grande número de fatores, tais como: a demanda, que varia aleatoriamente com o tempo e o espaço, a possível falha ou remoção de um equipamento eletromecânico do sistema (tubos, válvulas, bombas), a quantidade de água armazenada nos tanques para atender a variação diária e semanal da demanda, além da qualidade de água distribuída entre os usuários do sistema.

A procura da eficiência de um sistema de abastecimento começa pelo tipo de controle operacional selecionado para as operações de liga/desliga dos conjuntos motor-bomba nas estações elevatórias. Assim, visando incrementar a confiabilidade e a segurança operacional do sistema, pode-se exigir do operador local, um sistema automático. Em uma primeira modalidade, a decisão é tomada pelo operador central. A esse tipo de controle denomina-se *SCADA* (ZAHED, 1990).

O estágio mais avançado de operação de um sistema de grande porte exige a mudança de uma forma *SCADA* para uma outra, denominada controle automático por computador, que exige algoritmos de otimização da operação. Esse controle indica falhas que podem ser contornadas pela atuação manual que aumenta a segurança operacional. No entanto, somente após a comprovação da eficiência e segurança de um algoritmo desenvolvido para a operação de um sistema é que se deve automatizá-lo (CARRIJO, 2004).

Na busca de um sistema de controle de abastecimento eficiente, há necessidade de utilização de softwares de análises, simulação e otimização voltados à operação dos sistemas de abastecimento de água. Quanto mais complexo o controle a ser efetuado, mais indicado é o seu uso e a implantação de um equipamento confiável para o controle operacional.

A otimização do processo, o aumento da eficiência dos equipamentos e das instalações, são algumas ações que garantem um bom padrão de regularidade no abastecimento de água. Esses procedimentos evitam desperdícios de energia elétrica e de água, e garantem reduções nos custos operacionais e de manutenção. A falta deles poderia acarretar em diminuição da vida útil dos equipamentos, causada pelas operações indevidas (JAMES et al., 2002).

Segundo ZAHED (1990), o grau de automação é variável e dependente do porte do sistema e de suas necessidades. Os sistemas mais complexos tendem a evoluir para uma operação automática baseada em sistemas *SCADA* de forma a liberar os operadores para tarefas de supervisão.

### 3.5 Modelos de Otimização de Sistemas de Abastecimento de Água

Os problemas de otimização apresentam-se como uma estrutura em que se busca maximizar ou minimizar uma função objetivo, considerando a existência de um conjunto de restrições, que devem ser atendidas (FRAGA et al., 1989).

Para dar suporte ao planejamento, as técnicas de otimização vêm sendo progressivamente aplicadas nos problemas de recursos hídricos, devido às facilidades computacionais existentes e à possibilidade de modelagem mais realística dos problemas. De acordo com FRAGA et al. (1989), para a aplicação de uma modelagem matemática em um problema, faz-se necessário o estabelecimento de relações lógico-matemáticas, a fim de representar um problema físico como um problema matemático. Essas condições são alcançadas através do estabelecimento de restrições que a solução deve respeitar e os objetivos devem buscar. A solução procurada é traduzida através do valor obtido nas variáveis de decisão, as quais definem como o sistema será operado.

A complexidade da otimização de um sistema de abastecimento de água reside na dinâmica e na quantidade de parâmetros e variáveis envolvidos. Para facilidade, vários pesquisadores têm implementado diversas técnicas de otimização para componentes isolados do sistema, tais como estações de bombeamento, reservatórios, válvulas etc., tratando o modelo com um único objetivo, considerando a variação das demandas ao longo do dia e os diferentes custos de energia elétrica, buscando uma confiabilidade adequada, em termos de atendimento ao consumidor. No entanto, outros preferem considerar as unidades do sistema (bombas, válvulas, reservatórios, entre outros) em conjunto, tratando o problema com múltiplos objetivos, sendo estes objetivos: a confiabilidade hidráulica e mecânica, os custos de operação e manutenção e os benefícios hidráulicos (CARRIJO, 2004).

Segundo ORMSBEE e LANSEY (1994), as restrições para problemas de sistemas de abastecimento de água podem ser divididas em três grupos: limitações físicas dos sistemas (capacidade dos reservatórios, capacidade dos mananciais, configuração das bombas etc.); leis físicas (conservação da massa nos nós da rede, conservação da energia nos anéis etc.); e requisitos externos (atendimento da demanda, manutenção dos níveis de pressão aceitáveis etc.). Esses autores ressaltaram, também, que é fundamental a previsão da demanda, que deve empregar três passos, que são: a previsão de demanda diária, a demanda distribuída espacialmente associada aos nós da rede e a distribuição de demanda durante um horizonte de planejamento.

Na formulação do problema de otimização deve-se tomar cuidado especial com a análise e interpretação dos resultados, sempre reavaliando as hipóteses assumidas em confronto com os resultados ótimos obtidos. BRION e MAYS (1991) ressaltam a necessidade de fazer-se uma análise de sensibilidade para identificar ótimos locais ao invés dos ótimos globais.

Além dos objetivos econômicos e técnicos, a otimização dos sistemas de abastecimento de água, visa outros benefícios como: contribuir para o adiamento das necessidades de ampliação dos componentes da rede e/ou do suprimento energético; permitir um melhor conhecimento sobre as interações entre os componentes do sistema; e contribuir, a longo prazo, para o alcance de uma melhor política de uso dos recursos hídricos e energéticos (JAMES et al., 2002).

LUVIZOTTO (1995) descreve uma série de vantagens que advém da automação e do controle ótimo de sistemas de abastecimento:

- **Redução de custos:** experiências mostram que cerca de 5 a 20% do custo de eletricidade no bombeamento pode ser reduzida.
- **Controle de perdas:** a maior fonte de eficácia da gerencia de uma instalação advém do controle de perdas. Em locais onde se dispõe de poucos recursos, investimentos para a redução de perdas podem aparecer como o mais eficaz caminho para suprir um incremento de demanda.
- **Segurança:** as falhas mais freqüentes de sistemas complexos são devidas a erros ou falhas humanas. Portanto a segurança é beneficiada com a adoção de um controle automatizado.
- **Qualidade do serviço:** os modelos computacionais podem fornecer estratégias adequadas, não somente para as operações diárias, como também para situações emergenciais, melhorando a qualidade do serviço prestado ao consumidor.

Assim, as técnicas de otimização vêm sendo utilizadas na busca de soluções ótimas para problemas operacionais específicos. Caso se busque o mínimo custo operacional, a função custo estará associada à tarifa de energia elétrica, ao rendimento das bombas, aos custos de manutenção, às perdas de carga nas instalações etc. Por outro lado, há restrições impostas pelo próprio sistema, tais como, níveis máximos e mínimos dos reservatórios, limites de pressão e de potência e quantidade de água disponível (LUVIZOTTO, 1995).

### 3.5.1 Otimização de Estações de Bombeamento

O objetivo da operação de sistemas de abastecimento de água é o atendimento das necessidades de consumo sem riscos e com a minimização dos custos operacionais, tais como os de consumo de energia e manutenção e, de maneira implícita, num melhor aproveitamento do sistema de transporte e reservação, de forma a retardar investimentos com ampliações (LUVIZOTTO, 1995). Para que isso ocorra, deve haver um equilíbrio entre a adução e os diversos componentes do sistema, como estações de bombeamento, válvulas e reservatórios.

Dentre as unidades de um sistema de abastecimento de água, as estações de bombeamento ou elevatórias são as que apresentam maior complexidade com relação às questões de custos, confiabilidade, benefícios hidráulicos e flexibilidade (MONACHESI, 2005). Em

função disso, vários autores têm preferido desenvolver modelos de otimização trabalhando com esse sistema de forma isolada.

De acordo com PEZESHK e HELWEG (1996), a otimização da operação de bombeamento pode gerar economias significativas, as quais, no caso de grandes sistemas, poderão atingir a ordem de centenas de milhares de dólares anualmente.

A relação entre operação das bombas na estação elevatória e os níveis dos reservatórios para atendimento das demandas diárias, tem se figurado como a grave preocupação dos analistas de saneamento. De fato, no mesmo momento que se pretende minimizar o consumo de energia elétrica, deve-se também garantir confiabilidade dos sistemas de abastecimento de água. Sendo os objetivos: econômico, em termos de minimização dos custos de energia elétrica na estação de bombeamento, estabilidade na operação das bombas e confiabilidade no atendimento de demandas que variam aleatoriamente (CARRIJO, 2004).

WALSKI (1993) enumerou uma série de causas que podem levar uma estação de bombeamento a operar de forma irregular não atendendo a condição de custo ótimo:

- seleção incorreta das bombas;
- limitação na capacidade de transmissão-distribuição do sistema;
- incompatibilidade dos equipamentos de telemetria;
- incapacidade de controle automático ou remoto de bombas e válvulas;
- inexistência de uma política adequada de tarifa de energia elétrica;
- não verificação (monitoramento) da demanda de potência;
- erros humanos (operador); e
- não atendimento das condições ótimas na definição das estratégias de controle.

A literatura reporta diversos métodos de otimização que têm sido aplicados nos sistemas de abastecimento de água, tais como métodos de programação clássica (programação linear e programação não linear), programação dinâmica e métodos heurísticos (algoritmos genéticos, *simulated annealing* etc.), cujas aplicações mais freqüentes são na operação das estações de bombeamento. ORMSBEE e LANSEY (1994) apresentam uma revisão

de várias metodologias aplicadas na otimização da programação de bombas, incluindo programação dinâmica, linear e não linear.

As dificuldades na utilização das técnicas de otimização na operação desses sistemas estão associadas ao grande número de equações a serem resolvidas, à dificuldade de formulação do problema geral, ao tratamento de restrições operacionais não explícitas e à aquisição e manutenção de dados (LUVIZOTTO, 1995).

A **programação linear** é amplamente utilizada como técnica de otimização operacional de sistemas de abastecimento de água, este método é aplicável quando tanto a função objetivo como as restrições podem ser expressadas como combinações lineares das variáveis. No entanto, pode-se chegar a essas formas lineares, mediante a formulação de modelos simples ou a linearização de situações mais complexas (FRAGA et al., 1989). Utilizando este método, JOWITT e GERMANOPOULOS (1992) implementaram um modelo para a determinação do custo ótimo (mínimo) de consumo de energia em estações elevatórias com base em 24 horas de funcionamento, considerando os custos relativos à energia consumida e à demanda de potência. Foram enumeradas as restrições operacionais, as características hidráulicas do sistema, o perfil de demanda e a política tarifária local de energia elétrica. Porém, os resultados da otimização não foram apresentados, pois os autores preocuparam-se mais com o tempo de processamento.

A **programação não linear** não têm sido utilizada com muita frequência em otimização de sistemas de distribuição de água, devido ao fato do processo de otimização ter alto custo computacional quando comparado com outros métodos, porém, pode oferecer uma formulação matemática mais geral que a programação dinâmica e pode fornecer uma fundamentação para análise por outros métodos. Assim, alguns autores, como BRION e MAYS (1991), McCORMICK e POWELL (2003), com o objetivo de otimizar a operação de estações de bombeamento em sistemas de distribuição de água, através da redução dos custos de energia elétrica, implementaram métodos baseados na programação não linear, devido ao formato do problema, em termos do número das variáveis de decisão e de suas características não-lineares, com resultados satisfatórios.

Os métodos de otimização clássica (programação linear e programação não linear), geralmente utilizam técnicas de decomposição matemática para simplificar o problema. Essas técnicas são eficientes em sistemas de pequeno e médio porte, mas para sistemas de grande porte apresentam problemas de esforço computacional e de convergência (FRAGA

et al., 1989).

A **programação dinâmica** é um procedimento bastante utilizado em sistemas de abastecimento de água, é aplicado para a otimização de processos de decisão multi-estágio. Esse método tem muito sucesso devido ao fato de que as características não lineares e estatísticas, que caracterizam a maior parte dos sistemas de água, podem ser traduzidas na formulação de programação dinâmica (FRAGA et al., 1989). No entanto, a grande desvantagem dessa técnica está no tempo de processamento, para a solução do elevado número de equações necessárias, pois o número de equações necessárias para completar a formulação do problema cresce de forma exponencial com o número de reservatórios envolvidos (LUVIZOTTO, 1995).

ORMSBEE et al. (1989) propuseram uma metodologia utilizando programação dinâmica para otimizar a operação de bombas através da diminuição dos custos de energia elétrica envolvendo duas fases básicas: o desenvolvimento de uma trajetória ótima do nível de água no reservatório e desenvolvimento de uma política operacional ótima da bomba para encontrar uma trajetória (curva) ótima global. O modelo foi aplicado a um setor da rede de distribuição de Washington, nos Estados Unidos, e possibilitou uma diminuição no custo anual de energia elétrica de 6,7%, quando comparado ao custo previsto em projeto. Mediante uma abordagem similar à proposta por ORMSBEE et al. (1989), porém, considerando curvas diferentes para cada combinação de bombas, LANSEY e AWUMAH (1994), possibilitaram uma maior versatilidade com relação à operação do sistema.

NITIVATTANANON et al. (1996) propuseram um método de otimização progressiva para a operação de estações de bombeamento em tempo real, considerando a complexidade da política tarifária, incertezas na variação de demanda, vazões de bombeamento entre outras restrições hidráulicas. O modelo dividia o sistema em vários sub-sistemas no tempo e espaço, planejando intervalos dentro dos períodos operacionais. O modelo foi testado no sistema de abastecimento de água da cidade de Pittsburgh e a solução ótima apresentou uma redução de 20% nos custos de operação das estações de bombeamento, quando comparados com os custos reais.

Considerando a relação entre a operação das bombas e os níveis dos reservatórios para atendimento das demandas diárias, KO et al. (1997) utilizaram um algoritmo de programação dinâmica para a análise multiobjetiva ao determinar a operação ótima de bombas e reservatórios. Os autores definiram três objetivos distintos: econômico (minimi-

zação de custos de energia elétrica), estabilidade na operação das bombas e confiabilidade no atendimento das demandas. O modelo foi aplicado no sistema de abastecimento de água da cidade de Kumi (Korea), e segundo os autores, os resultados indicaram uma melhora na operação do sistema quando comparados às operações antes do modelo.

Com a finalidade de reduzir o tempo de processamento do modelo de otimização PE-ZESHK e HELWEG (1996) adotando **métodos heurísticos** como ferramentas propuseram um algoritmo discreto de busca por ajuste para otimizar o funcionamento de bombas de um sistema com combinações simples e tarifa elétrica fixa. O algoritmo proposto selecionava qual bomba seria ligada ou desligada usando uma combinação de coeficientes de influência e leituras de pressão na rede. Esse coeficiente fornecia uma indicação do impacto na variação de pressão no ponto monitorado, quando a estação elevatória estava em operação, o processo era repetido até que a seleção das bombas satisfizesse a pressão requerida para o sistema. Os autores ressaltaram que depois de quatro iterações atingiram valores ótimos e recomendaram a utilização do modelo para controle de sistemas em tempo real.

Um método utilizado com frequência para otimização operacional de sistemas de abastecimento de água são os **algoritmos genéticos**, que são técnicas de busca estocásticas que imitam matematicamente os mecanismos de evolução natural. MACKLE et al. (1995) e BOULOS et al. (2001) aplicaram os algoritmos genéticos para minimizar os custos de energia elétrica mediante a otimização da operação de bombeamento. Os resultados obtidos indicaram que o modelo desenvolvido pode reduzir o custo da energia consumido, mediante a seleção e programação de combinações de operação de bombas em um sistema complexo da distribuição da água, ao mesmo tempo que garante os níveis satisfatórios do serviço.

O *simulated annealing* é uma técnica de otimização combinatorial que foi desenvolvida analisando o processo de *annealing* em sólidos, que é um dos processos de construção de cristais perfeitos. Nessa técnica um material é aquecido até uma temperatura elevada e depois esfriado lentamente, mantendo durante o processo o chamado quase equilíbrio termodinâmico, o processo pára quando o material atinge seu estado de energia mínima na qual se transforma num cristal perfeito. Assim, o algoritmo de *simulated annealing* tenta simular um processo equivalente para encontrar a configuração ótima de um problema complexo, porém, a desvantagem é o esforço computacional elevado (FRAGA et al., 1989).

SOUSA et al. (2006) implementaram um algoritmo *simulated annealing* para minimização dos custos operacionais. A função objetivo desse modelo de otimização visa minimizar os custos de consumo de energia elétrica e da demanda de potência, com tarifas diferenciadas para horário de ponta e fora de ponta. Essa função inclui um termo de penalidade para evitar o número excessivo de mudanças no estado de funcionamento das bombas (liga/desliga). O modelo foi aplicado em uma rede hipotética, obtendo-se regras operacionais para a programação das bombas que reduzem os custos energéticos.

Atualmente, há uma tendência na literatura em tratar a otimização dos sistemas de abastecimento de água como um problema envolvendo múltiplos objetivos. A **otimização multiobjetivo** consiste em um número de funções objetivo a serem minimizadas ou maximizadas simultaneamente, e contém um número de restrições que devem ser satisfeitas. A existência de várias funções objetivo que, usualmente, estão em conflito, faz mudar o conceito do ótimo, pois, neste tipo de problema, tenta-se encontrar bons compromissos (*trade-offs*) e não uma simples solução. As técnicas de otimização convencionais são de difícil aplicação ao caso multiobjetivo, porque não trabalham com soluções múltiplas. Portanto, há uma tendência em substituir os métodos de otimização convencionais por técnicas de otimização multiobjetivo não convencionais baseadas na programação evolucionária (CHEUNG, 2003).

Carrijo et al. (2004) propuseram os algoritmos genéticos multiobjetivo para analisar duas funções objetivo: minimização dos custos de energia elétrica nas estações de bombeamento e maximização dos benefícios hidráulicos. O modelo foi aplicado ao sistema de macro distribuição de água potável da cidade de Goiânia, obtendo-se resultados que comprovaram a validade do modelo proposto ao implementar-se as regras operacionais para o funcionamento das bombas. BARÁN et al. (2005) aplicaram vários métodos evolucionários multiobjetivo para otimizar os períodos de operação das bombas de uma estação elevatória no Paraguai, considerando os objetivos: custo de energia elétrica, custo de manutenção, picos de potência e variação do nível do reservatório, obtendo resultados satisfatórios.

Os **modelos híbridos** são outra possibilidade para a definição das regras operacionais. Consistem na utilização conjunta das técnicas de simulação hidráulicas com técnicas de otimização. BRION e MAYS (1991) propuseram uma técnica que utiliza algoritmos de programação não linear e um simulador para resolver os problemas das restrições hidráulicas do otimizador, sendo que essa técnica possibilita uma maior aplicabilidade em

relação a otimização isolada. A metodologia é baseada no interfaceamento de um modelo de otimização não linear com um modelo hidráulico de simulação, utilizado implicitamente para resolver as equações de conservação de massa e de energia que descrevem o escoamento hidráulico no modelo de otimização. Essa técnica foi utilizada para obter a operação ótima das estações de bombeamento, em termos do mínimo custo operacional. O esquema de interfaceamento é apresentado na Figura 3.2.

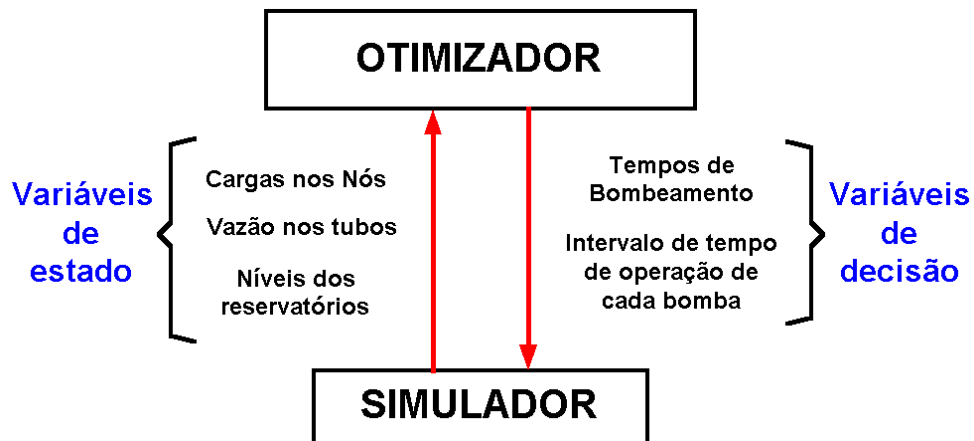


Figura 3.2 - Conexão Otimizador - Simulador (BRION; MAYS, 1991)

Com o objetivo de estabelecer as regras operacionais mais promissórias em sistemas de abastecimento de água, várias técnicas de otimização vêm sendo associadas com os diversos simuladores hidráulicos. Dentre essas técnicas podemos citar SOUSA et al. (2006) que implementaram um modelo de simulação com o algoritmo *simulated annealing*; CARRIJO (2004) e CARRIJO et al. (2004) que implementaram um modelo de otimização multiobjetivo com o simulador hidráulico *EPANET 2*.

# 4 Algoritmos Evolucionários

## Multiobjetivo

### 4.1 Considerações gerais

A Inteligência Artificial (IA) começou a se desenvolver nos anos cinqüenta, tendo como objetivo principal, criar sistemas inteligentes que reproduzam aspectos do comportamento humano, tais como: percepção, raciocínio, adaptação e aprendizado (PESSIS-PASTERNAK, 1993). Mas atualmente, com o desenvolvimento do computador, os pesquisadores de IA buscam transformar o computador para encontrar soluções de qualquer problema, a partir de uma descrição de alto nível do mesmo, sem ter que programá-lo em forma explícita. Dessa forma, sistemas inteligentes podem ser construídos com velocidade e precisão, sendo capazes de encontrar a solução ótima de diversos problemas de forma eficiente e eficaz (CARRIJO, 2004).

Na busca por compreender o pensamento e o comportamento humano, se realizou o cruzamento das neurociências e da informática a fim de reproduzi-las artificialmente. Posteriormente, a ênfase foi deslocada a aprendizagem das propriedades da natureza, principalmente no processo evolutivo, no qual tem se encontrado uma importante fonte de inspiração (PESSIS-PASTERNAK, 1993). De fato, a evolução natural pode ser entendida como um processo de busca entre um grande número de possíveis combinações de genes. Como resultado dessa busca são obtidas aquelas seqüências que permitem aos organismos sobreviver e reproduzir-se em seus diferentes entornos, adaptando-se às mudanças que se produzem no ambiente (DARWIN, 1992). Assim, a partir das noções provenientes da evolução biológica surge a Computação Evolucionária (*Evolutionary Computation*) como uma forma de simular o processo evolutivo para a resolução de distintos problemas computacionais.

As primeiras idéias de buscas genéticas ou evolutivas apareceram no início da década de cinquenta como uma curiosidade científica. Na década de sessenta desenvolveram-se as bases dos métodos principais da computação evolutiva, mas a falta de recursos computacionais para a implementação desses métodos em problemas reais os levou para um período de pouco interesse. Na década de oitenta, com o desenvolvimento do computador, esses algoritmos receberam maior atenção como métodos para resolução de problemas. No entanto, foi a partir da década de noventa que esses métodos se estabeleceram como alternativas práticas depois que foram utilizados com êxito para a resolução de uma ampla variedade de problemas de otimização e busca de grande complexidade.

Usualmente, os distintos métodos da computação evolutiva são denominados coletivamente Algoritmos Evolucionários (*Evolutionary Algorithms - AEs*), ainda que cada enfoque tenha suas características particulares. Os AEs que tem recebido maior atenção da comunidade científica nos últimos anos, foram os Algoritmos Genéticos (AG) (GOLDBERG, 1989).

Na otimização de objetivo único, a tarefa é encontrar uma solução que otimize uma função objetiva específica, achando, segundo o problema, o máximo ou o mínimo global. Na otimização multiobjetivo se procura um conjunto de soluções que são superiores às outras soluções do espaço de busca, isto é, encontrar soluções que forneçam o melhor compromisso entre os diversos objetivos para o decisor.

Técnicas de otimização convencionais, como métodos de busca direta são de difícil aplicação ao caso multiobjetivo, porque não trabalham com soluções múltiplas. Atualmente, com o aparecimento de técnicas de otimização não convencionais tais como os algoritmos evolucionários (AEs), flexíveis na busca paralela de solução, os problemas de otimização multiobjetivo vêm sendo revistos (CHEUNG, 2003).

## 4.2 Algoritmos Evolucionários

O processo de evolução pode ser visto como a busca entre o conjunto de possíveis seqüências de genes de aquelas correspondam aos melhores indivíduos. Essa busca que a natureza realiza é robusta, no sentido que é capaz de localizar eficaz e eficientemente indivíduos de melhor adaptação em um grande espaço de busca e que muda constantemente.

Segundo DARWIN (1992), as regras da evolução são notavelmente simples. As espé-

cies evoluem por meio da seleção natural, isto é, a conservação das diferenças e variações individualmente favoráveis e a destruição das que são prejudiciais. Os indivíduos que têm vantagem sobre outros, por pequena que seja, terão mais probabilidade de sobreviver e procriar sua espécie.

Os filhos são semelhantes a seus pais, razão pela qual, cada nova geração tem indivíduos semelhantes aos melhores indivíduos da geração anterior. Além do processo da seleção natural, na natureza ocasionalmente se produzem mutações aleatórias. Algumas de essas mutações conduzirão a novos e melhores indivíduos, de essa maneira, alterações aleatórias serão introduzidas e depois disseminadas às gerações futuras. Pelo contrário, as características negativas introduzidas pela mutação tenderão a desaparecer pois conduzem a indivíduos fracamente adaptados. Se as modificações do ambiente são menores, as espécies irão evoluindo gradualmente, porém, é provável que uma alteração de ambiente provoque a desapareição de espécies inteiras e o nascimento de outras novas, capazes de sobreviver no novo entorno.

Os AEs são técnicas de busca estocástica e otimização que simulando os mecanismos essenciais da evolução Darwiniana, tentam reproduzir as características de robustez e simplicidade existentes na natureza para evoluir e atingir melhores soluções em problemas computacionais (GOLDBERG, 1989). A idéia é que o algoritmo seja capaz de evoluir uma população de estruturas computacionais, de modo que melhore a média dos indivíduos que formam essa população em relação ao ambiente a que a população está submetida.

De acordo com ZITZLER (1999), os AEs são classificados em: Algoritmos Genéticos (AGs), Estratégias de Evolução (EE), Programação Evolucionária (PE), Programação Genética (PG) e Sistemas Classificatórios (SCs). Todas essas técnicas operam um conjunto de soluções simultaneamente (algoritmos populacionais), e o conjunto evolui devido a dois princípios básicos: seleção e variação. A seleção é baseada no princípio da seleção natural de Darwin e representa a competição entre indivíduos de mesma espécie, sendo caracterizada pela escolha de soluções candidatas dentro do conjunto de possíveis soluções e simulada por um processo de seleção estocástica. Cada solução recebe a chance de se reproduzir um certo número de vezes, dependendo da sua qualidade enquanto solução. O outro princípio, a variação, imita a capacidade natural das espécies de criar “novos” indivíduos, no caso dos AGs, esse princípio é analogamente associado ao processo de recombinação e mutação (CHEUNG, 2003).

Os AEs trabalham com um conjunto de possíveis soluções para o problema que se tenta resolver. Cada uma das soluções representa um indivíduo e todo o conjunto representa uma população. A informação relativa às características dos indivíduos em populações naturais vêm dada nos cromossomos, os quais são responsáveis da carga hereditária. Por isso, quando se trabalha com EAs, as soluções do problema considerado se codificam em forma de cadeias semelhantes às cadeias dos genes que conformam os cromossomos.

Na natureza, cada indivíduo tem características particulares, que medem, de alguma maneira, a sua capacidade de adaptação com respeito a outros indivíduos da mesma espécie em um entorno dado. Da mesma forma, os EAs, assinam a cada solução da população artificial um valor de aptidão (*fitness*) segundo a qualidade para solucionar o problema em questão. Esse valor servirá para que um processo aleatório de seleção artificial, que favorece aos indivíduos com melhor aptidão, tome pares de indivíduos da população para serem submetidos a um operador de cruzamento. O operador de cruzamento implementa alguma forma de intercâmbio entre as cadeias que conformam os indivíduos selecionados (pais), para gerar novas soluções (filhos) as quais formarão uma nova população.

Os procedimentos de designação de *fitness*, seleção e cruzamento se repetem de forma iterativa até que algum critério de parada seja cumprido. A cada iteração se lhe denomina comumente geração. Então, se diz que um novo conjunto de soluções é criado em cada geração por meio da seleção de bons indivíduos da geração atual e o cruzamento dos mesmos.

Os membros de cada nova geração criada a partir da seleção e o cruzamento terão características dos melhores indivíduos (soluções) da geração anterior. No entanto, certas características importantes podem se perder em esse processo. Um operador de mutação que altera em forma aleatória uma solução tem sob seu cargo recuperar a informação que se possa perder durante o processo simulado de evolução natural, introduzindo uma busca aleatória no espaço de soluções. Esse processo análogo ao processo natural, proporciona aos EAs as características necessárias para um comportamento robusto que lhe permite ser utilizado para um amplo *range* de problemas de otimização de funções, otimização combinatória, sistemas de aprendizagem de lógica difusa, aprendizagem de redes neurais, entre outros (VELDHUIZEN, 1999).

ZITZLER (1999) afirmou que os AEs são extremadamente adaptados ao problema

de otimização multiobjetivo pela habilidade de manter múltiplas soluções em uma única simulação e pela facilidade em se explorar regiões do espaço de busca através do princípio de variação (recombinação e mutação).

#### 4.2.1 Algoritmos Genéticos

Os Algoritmos Genéticos (AGs) são uma técnicas de busca estocástica baseada na teoria da evolução natural, declarada em 1859 pelo naturalista e fisiologista inglês Charles Darwin em seu livro *"A Origem das Espécies"* (GOLDBERG, 1989). De acordo com DARWIN (1992) ..."quanto melhor um indivíduo se adaptar ao seu meio ambiente, maior será sua chance de sobreviver e gerar descendentes"..., os mecanismos que regem a evolução natural não são completamente conhecidos, mas algumas de suas características são claras e amplamente aplicadas no processo de aplicação dos AGs.

Os AGs são métodos de otimização inspirados nos mecanismos de evolução de populações de seres vivos. Foram introduzidos em 1975 pelo pesquisador John Holland da Universidade de Michigan em seu livro *"Adaptation in Natural and Artificial Systems"* e mais tarde popularizados por um dos seus alunos, David Goldberg, através do livro *"Genetic Algorithms in search, optimization and machine learning"* publicado em 1989 (LACERDA; CARVALHO, 1999).

Em contraste com outras técnicas evolutivas, a grande idéia de Holland não foi desenvolver algoritmos para solucionar problemas específicos, mas sim estudar o fenômeno da adaptação como ele ocorre na natureza e desenvolver caminhos através dos quais os mecanismos de adaptação natural pudessem ser importados para os sistemas computacionais. O algoritmo desenvolvido por Holland resolvia problemas complexos de uma maneira muito simples, assim como acontece na natureza, ignorando o tipo de problema a ser resolvido. Uma simples função de ajuste fazia o papel de medida de adaptação dos organismos ao meio ambiente. Então, os cromossomos com uma melhor aptidão, medida por esta função, tinham maior oportunidade de reprodução do que aqueles com uma má adequação, imitando o processo evolucionário natural (CARRIJO, 2004).

Os AGs iniciam o processo gerando aleatoriamente um conjunto inicial de soluções possíveis denominadas população. Cada indivíduo dessa população, denominado cromossomo (elemento microscópico das células nucleares), constitui uma possível representação completa de solução para o problema. O cromossomo é representado por um vetor, cujos

elementos são denominados analogamente genes, que representam as características de uma solução e podem ser codificados através de números binários ou reais. Os cromossomos tendem a evoluir gradativamente através de sucessivas iterações, produzindo novas gerações de indivíduos mais aptos ou capazes em termos da função de aptidão.

Durante cada iteração (geração), as soluções (cromossomos) são avaliadas através da função objetivo ou através de uma função modificada (aptidão), que permite sua classificação e ordenação enquanto solução. Uma nova geração é formada através dos processos de seleção, recombinação e mutação, cujas soluções com valor elevado da função objetivo têm maior probabilidade de serem preservadas para a próxima geração.

Para se criar uma nova geração, novos cromossomos denominados filhos ou descendentes são produzidos pela combinação de dois indivíduos pais (cromossomos) da geração corrente, utilizando os operadores genéticos de recombinação e mutação (modificação eventual dos genes). Após várias iterações o algoritmo converge para uma solução ótima ou quasi-ótima do problema (CHEUNG, 2003).

Contudo, é comum no processo de AGs que o melhor membro de uma população falhe na produção de um descendente (*off spring*) na próxima geração. O melhor cromossomo pode ser perdido de uma geração para outra devido ao corte da recombinação ou à ocorrência de mutação. DeJong (1975) apud (LACERDA; CARVALHO, 1999) propôs a estratégia do **elitismo**, que se baseia na transferência do melhor cromossomo de uma geração para outra sem alterações, já que o melhor cromossomo pode ser perdido devido à aplicação dos operadores de reprodução. A estratégia do elitismo pode aumentar a velocidade de dominação de uma população devido a um “superindivíduo”, mas no balanço, esta estratégia melhora a performance do AG. A solução, no AG com elitismo, é encontrada de forma mais rápida que no AG não elitista.

Na Figura 4.1 é ilustrada a estrutura geral dos AGs, onde as soluções são representadas em código binário, diversas são as possibilidades de implementação dos AGs em termos da sistemática de representação das soluções, dos operadores genéticos e dos parâmetros a serem adotados como as probabilidades de recombinação e mutação, o número de indivíduos da população de soluções e o critério de convergência.

Algumas vantagens dos AGs apresentadas por LACERDA e CARVALHO (1999) são: funcionam tanto com parâmetros contínuos, discretos ou uma combinação deles; maior probabilidade de encontrar o ótimo global porque realizam busca simultâneas em várias

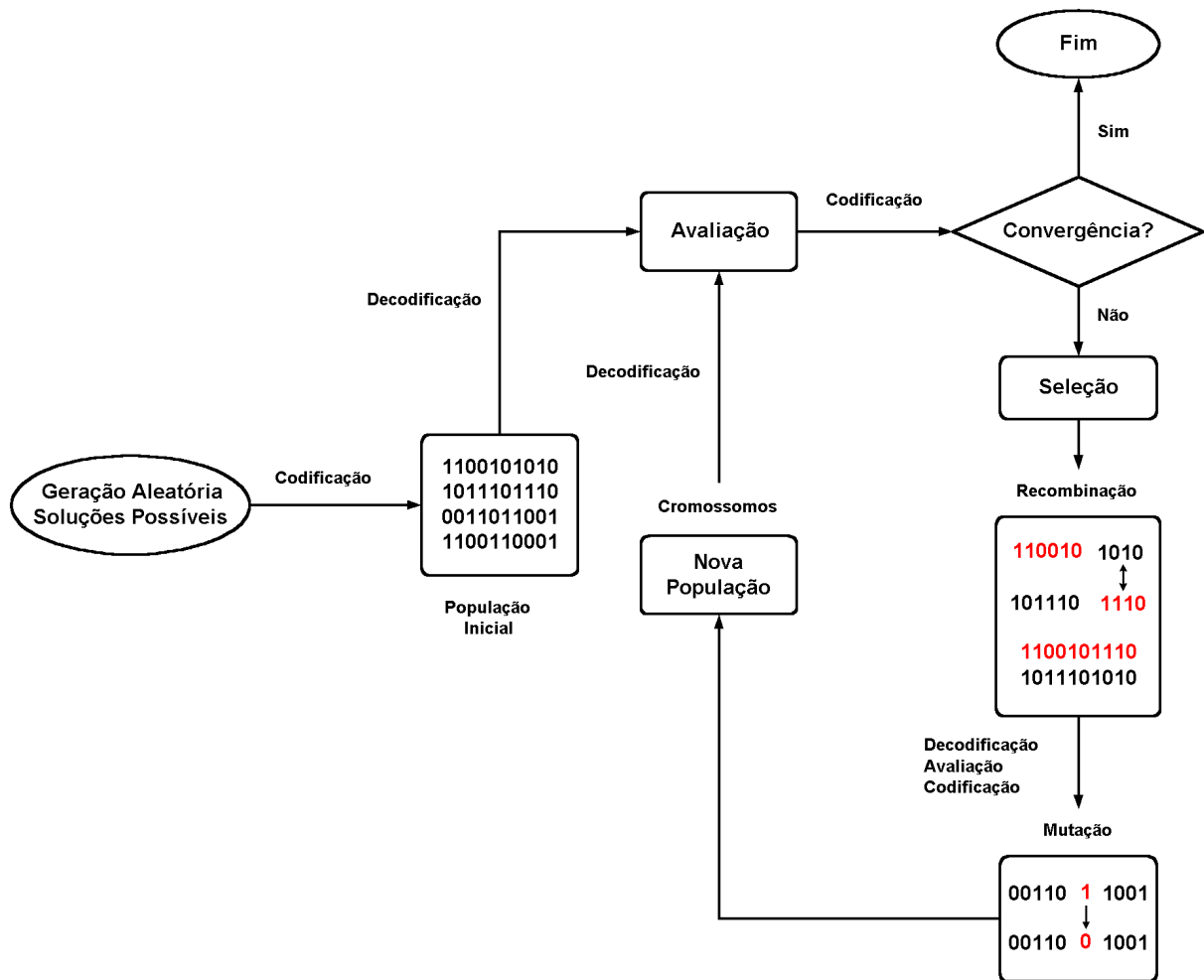


Figura 4.1 - Esquema geral dos algoritmos genéticos convencionais (CHEUNG, 2003)

regiões do espaço de solução, pois trabalham com uma população e não com um único ponto; otimizam um número grande de variáveis; não têm requisitos de linearização e cálculo de derivadas parciais; trabalham com uma codificação do conjunto de parâmetros e não com os próprios parâmetros; fornecem uma lista de parâmetros ótimos e não uma simples solução; são flexíveis para trabalhar com restrições arbitrárias e otimizar múltiplas funções com objetivos conflitantes; podem ser hibridizados com outras técnicas e heurísticas; utilizam informação apenas da função objetivo, não necessitando de derivadas ou de outras informações; têm grande aplicação em várias áreas de engenharia.

Apesar dessas vantagens, os AGs não são eficientes para muitos problemas, em alguns casos são bastante lentos, pois são eficazes na avaliação do espaço de soluções, mas oscilam em torno da solução ótima. Outro problema é a convergência prematura que ocorre quando surgem soluções de valor de aptidão elevado (mas não ótimo) e as soluções realmente ótimas ainda não estão presentes na população, como consequência, o

algoritmo converge para um máximo ou mínimo local.

Este problema de convergência prematura pode ser minimizado limitando o número de filhos por cromossomos, esta limitação que pode ser realizada mediante: a utilização de diferentes critérios de seleção; o aumento da taxa de mutação para manter a diversidade dos cromossomos na população (mais genes são criados); e evitando a inserção de filhos duplicados na população (LACERDA; CARVALHO, 1999). Contudo, o principal campo de aplicação dos AGs é em problemas complexos, com múltiplos mínimos/máximos e para os quais não existe um algoritmo de otimização eficiente conhecido para resolvê-los.

### 4.3 Otimização Multiobjetivo

A maioria dos problemas reais requerem soluções que atendam de forma simultânea vários objetivos. A otimização multiobjetivo, também chamada de otimização multicritério, pode ser definida como um processo que busca encontrar um vetor de variáveis de decisão, que satisfaça restrições e otimize um vetor em que os elementos representem as funções objetivo. Com várias funções objetivo, há uma mudança no conceito de ótimo, pois, neste tipo de problema, tenta-se encontrar bons compromissos (*trade-offs*) e não uma simples solução como nos casos de otimização global (CARRIJO, 2004).

VELDHUIZEN (1999) afirmou que em um problema de otimização multiobjetivo, o espaço de busca da solução se encontra parcialmente ordenado e duas soluções podem ser indiferentes entre si, sendo pouco usual que uma única variável de decisão otimize de maneira simultânea todas as funções objetivos. Portanto, não existe uma solução única que possa ser considerada como “a melhor”, mas um conjunto de soluções que representam os melhores compromissos entre os distintos objetivos.

COELLO (1996) apresenta algumas características da otimização multiobjetivo:

- os objetivos podem ser distintos e conflitantes, ter unidades distintas de medidas e ser incomensuráveis;
- ao existir objetivos contraditórios não existe uma solução única que seja melhor que as outras com respeito a todos os objetivos. O que se tem é um conjunto de alternativas de solução, que representa os melhores compromissos entre os distintos objetivos;

- das alternativas existentes, só interessa o conjunto de soluções que atendem certas restrições (soluções factíveis); e
- existindo um conjunto de alternativas possíveis é necessário que um tomador de decisões proporcione informação de preferência com intuito de selecionar a solução a ser implementada.

ZITZLER (1999) define o conceito geral do problema multiobjetivo para um problema de maximização e garante que para problemas de minimização ou mistos (maximização e minimização), as definições apresentadas são semelhantes. Neste item são apresentados os conceitos e terminologias da otimização multiobjetivo, de acordo com ZITZLER (1999).

**Definição 4.1. Problema de Otimização Multiobjetivo** *Um problema de otimização multiobjetivo inclui um conjunto de  $n$  parâmetros (variáveis de decisão), um conjunto de  $k$  funções objetivo e  $m$  restrições, funções das variáveis de decisão. O objetivo da otimização é:*

$$\text{Maximizar : } y = f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x))$$

$$\text{sujeito a : } g(x) = (g_1(x), g_2(x), \dots, g_m(x)) \leq 0$$

$$\text{sendo: } x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X$$

$$y = (y_1, y_2, \dots, y_k) \in Y$$

onde:  $x$  é o vetor de decisão,  $y$  é o vetor objetivo,  $X$  é denotado como o espaço de decisão e  $Y$  é denominado espaço objetivo. As restrições  $g(x) \leq 0$  determinam o conjunto de soluções factíveis. Uma solução  $x$  que não satisfaz todas essas restrições  $m$  e todos os limites de cada variável de decisão é denominada **solução infactível**. Por outro lado, se alguma solução  $x$  satisfaz todas as restrições e todos os limites de cada variável de decisão, é denominada **solução factível**. O conjunto de todas soluções factíveis é denominado região factível ou  $Y$ .

**Definição 4.2. Conjunto factível** *O conjunto factível  $X_f$  é definido como o conjunto de vetores de decisão  $x$  que satisfazem às restrições  $g(x)$  :*

$$X_f = \{x \in X \mid g(x) \leq 0\}$$

A imagem de  $X_f$ , isto é, a região factível no espaço da superfície de resposta, é denotada como:

$$Y_f = f(X_f) = \bigcup_{x \in X_f} \{f(x)\}$$

Nos problemas de otimização multiobjetivo, geralmente, os objetivos são conflitantes, e conseqüentemente, uma solução que é ótima para uma dada função não é ótima para as outras funções. Portanto, os objetivos não podem ser otimizados simultaneamente, ao contrário, o que se pretende é buscar uma relação satisfatória, denominada também compensatória, compatibilizada ou de compromisso, entre as funções. Essa relação (*trade-off*) é contextualizada através da definição de otimalidade.

ZITZLER (1999) afirmou que na otimização de objetivo único, o conjunto factível é completamente ordenado de acordo com sua função objetivo ( $f$ ). Por exemplo, para duas soluções  $a$  e  $b$  pertencentes ao conjunto  $X_f$ , o que pode ocorrer é  $f(a) \geq f(b)$  ou  $f(b) \geq f(a)$ . A meta então é encontrar a solução que fornece um valor máximo ou mínimo de  $f$ . Entretanto, quando vários objetivos são envolvidos, a situação muda. Por exemplo,  $X_f$ , é, em geral não totalmente ordenado, mas parcialmente ordenado, ilustrado pela Figura 4.2. Nessa ilustração considera-se que as funções  $f_1$  e  $f_2$  devam ser maximizadas. A solução representada pelo ponto B é melhor que a solução representada por C, porque B apresenta maior valor que C para  $f_1$  e  $f_2$ . Comparando C e D, C é melhor que D porque o valor de C para  $f_1$  é maior e para  $f_2$  as soluções empatam. Para expressar essa situação matematicamente, as relações  $=$ ,  $\geq$  e  $>$  são estendidos aos vetores objetivo por analogia ao caso de otimização de um único objetivo.

**Definição 4.3.** *Considerando dois vetores  $u$  e  $v$ ,*

$$u = v \text{ se e somente se } \forall i \in \{1, 2, \dots, k\} : u_i = v_i$$

$$u \geq v \text{ se e somente se } \forall i \in \{1, 2, \dots, k\} : u_i \geq v_i$$

$$u > v \text{ se e somente se } u \geq v \wedge u \neq v$$

*As relações  $\leq$  e  $<$  são definidas similarmente*

Baseando-se na Definição 4.3., pode-se garantir observando a Figura 4.2 que  $B > C$ ,  $C > D$  implica que  $B > D$ . Entretanto, quando B e E são comparados entre si, não se pode identificar qual solução é superior, desde que  $B \not> E$  e  $E \not> B$ . Embora a solução E tenha maior valor de  $f_2$  do que a solução B, quando observada a função  $f_1$ , a solução E tem

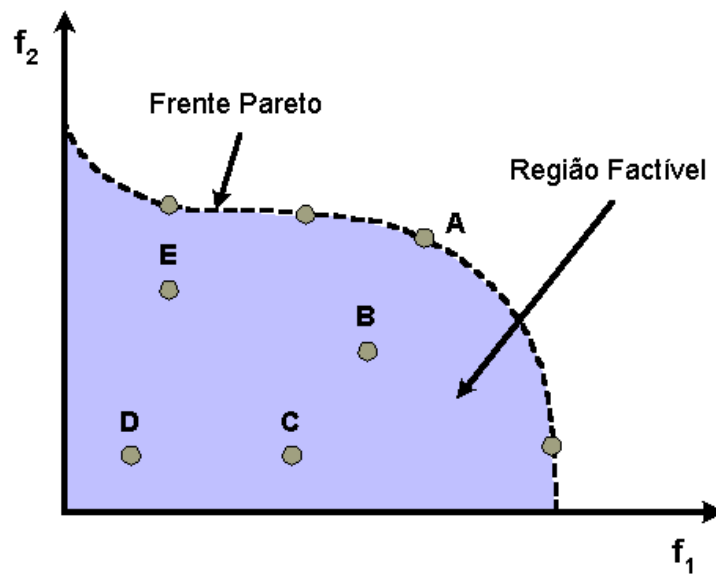


Figura 4.2 - Espaço variável de decisão (ZITZLER, 1999)

menor valor que a solução B. Portanto, duas variáveis de decisão quaisquer a e b podem ter três possibilidades nos problemas multiobjetivo considerando o símbolo  $\geq$  (em contraste aos problemas de objetivo único com duas soluções sendo comparadas):  $f(a) \geq f(b)$ ,  $f(b) \geq f(a)$ , ou  $f(a) \not\geq f(b) \wedge f(b) \not\geq f(a)$ . Neste trabalho, essas terminologias são utilizadas para classificar e ordenar diferentes situações (ZITZLER, 1999).

De acordo com COELLO (1996) e VELDHUIZEN (1999), a noção do ótimo mais aceita para problemas multiobjetivos foi a proposta originalmente por Francis Ysidro Edgeworth, e generalizada posteriormente por Vilfredo Pareto. Alguns autores o chamam de Edgeworth-Pareto-ótimo, porém é mais comumente conhecido como Pareto-ótimo (*Pareto Optimum*). Os conceitos essenciais para entender a noção do Pareto-ótimo são: dominância de Pareto (*Pareto Dominance*), Pareto ótimo (*Pareto Optimality*), Conjunto Pareto-ótimo (*Pareto Optimal Set*) e Frente Pareto (*Pareto Front*).

**Definição 4.4. Dominância Pareto** Considerando um conjunto de dois vetores de decisão a e b,

$a \succ b$  (a domina b) se e somente se  $f(a) > f(b)$

$a \succeq b$  (a domina fracamente b) se e somente se  $f(a) \geq f(b)$

$a \sim b$  (a é indiferente a b) se e somente se  $f(a) \not\geq f(b) \wedge f(b) \not\geq f(a)$

As definições para os problemas de minimização ( $\prec, \preceq, \sim$ ) são análogas.

Na Figura 4.3, o retângulo referenciado com o texto "Domina", representa que o vetor solução B domina todo espaço objetivo que contem as soluções C e D. O outro retângulo referenciado com o texto "É dominado", significa que o vetor solução A domina o vetor solução B. Todas as outras soluções pertencentes ao espaço objetivo são indiferentes em relação ao vetor solução B.

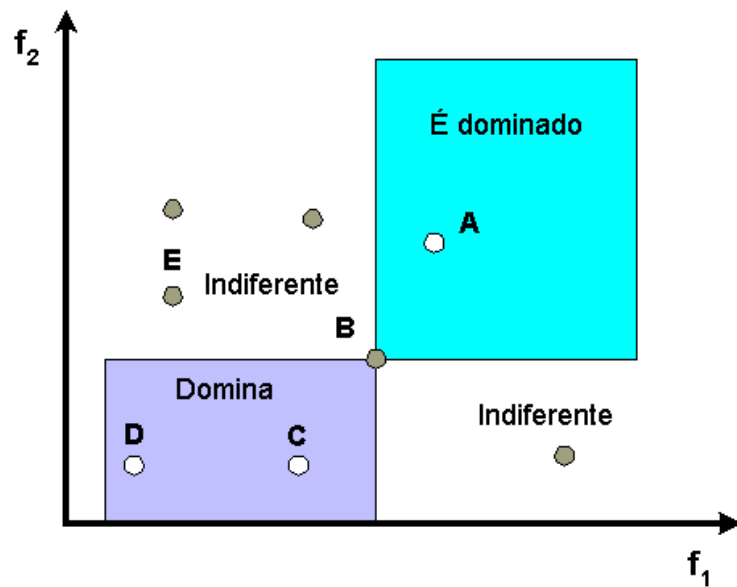


Figura 4.3 - Espaço função objetivo (ZITZLER, 1999)

Baseando-se no conceito de dominância Pareto, se pode introduzir o critério da otimalidade para otimização multiobjetivo. Na Figura 4.2, o vetor solução A é único dentre as outras soluções (C, D e E) não dominado por nenhum outro vetor no espaço objetivo. Tais soluções são denominadas Ótimas Pareto ou Não Inferiores.

Note que a definição dada de dominância de Pareto é independente quando se trata de minimizações, maximizações ou combinações delas (VELDHUIZEN, 1999). A Tabela 4.1 resume a notação utilizada para os conceitos de dominância Pareto entre vetores objetivo.

**Definição 4.5. Otimalidade Pareto** Um vetor de decisão  $x \in X_f$  é dito ser não dominado, ao considerar um conjunto  $A \subseteq X_f$  se e somente se:  $\nexists a \in A : a \succ x$

Se estiver claro qual conjunto  $A$  é mencionado, essa relação simplesmente é omitida. Além disso,  $x$  é dito ser ótimo Pareto se e somente se  $x$  é não dominado considerando  $X_f$ .

Tabela 4.1 - Relações de dominância de Pareto entre vetores objetivos

| Relação          | Denotação                   | Significado                                            |
|------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------------|
| Dominância forte | $\vec{u} \succ \vec{v}$     | $\vec{u}$ é melhor que $\vec{v}$ em todos os objetivos |
| Dominância       | $\vec{u} \succ \vec{v}$     | $\vec{u}$ domina $\vec{v}$                             |
| Não Dominância   | $\vec{u} \not\succ \vec{v}$ | $\vec{u}$ não domina $\vec{v}$                         |
| Dominância fraca | $\vec{u} \succeq \vec{v}$   | $\vec{u}$ não é pior que $\vec{v}$ em nenhum objetivo  |
| Não comparáveis  | $\vec{u} \sim \vec{v}$      | $\vec{u}$ é indiferente a $\vec{v}$                    |

Na Figura 4.2 os pontos grisalhos pertencentes à linha pontilhada são soluções ótimas Pareto. Essas soluções são indiferentes umas das outras. Essa é a principal diferença dos problemas de otimização de objetivo único, não existe uma solução ótima, mas um conjunto de soluções compatibilizadas (*trade-offs*). Nenhuma dessas soluções pode ser identificada como melhor que as outras, a não ser que, alguma informação de preferência seja incluída. O conjunto de todas as soluções ótimas Pareto é denominado conjunto Pareto ótimo; os vetores (objetivo) correspondentes formam a frente ou a superfície Pareto ótima.

A vantagem de usar Pareto ótimo é que não exige que as avaliações sejam normalizadas pois não combina objetivos, com diferentes unidades de medida, porém, suas desvantagens são que necessita de um critério adicional para a escolha da solução ótima dentre as pertencentes ao conjunto Pareto-Ótimo e que pode não orientar a evolução no sentido desejado, levando a resultados insatisfatórios para certos problemas (falta de equilíbrio entre os objetivos)

**Definição 4.6. Frentes e Conjuntos Não Dominados** Sendo  $A \subseteq X_f$ . A função  $p(A)$  fornece o conjunto de vetores de decisão não dominado em  $A$ :

$$p(A) = \{ a \in A \mid a \text{ é não dominado em } A \}$$

O conjunto  $p(A)$  é o conjunto não dominado em  $A$ , o conjunto correspondente de vetores objetivo  $f(p(A))$  é a frente não dominado em  $A$ . Além disso, o conjunto  $X_p = p(X_f)$  é denominado conjunto Pareto ótimo e o conjunto  $Y_p = f(X_p)$  é denotado frente Pareto ótima

O conjunto Pareto ótimo compreende as soluções de melhor compromisso. No entanto, semelhante à otimização de objetivo único, na otimização multiobjetivo também existe os ótimos locais que constituem um conjunto não dominado dentro de uma certa vizinhança.

**Definição 4.7.** Considerando um conjunto de vetores de decisão  $A \subseteq X_f$ .

1. O conjunto  $A$  é denotado como um conjunto ótimo Pareto se e somente se:

$$\forall a \in A : \nexists x \in X_f : x \succ a \wedge \|x - a\| < \varepsilon \wedge \|f(x) - f(a)\| < \delta$$

sendo que  $\|\cdot\|$  é uma métrica de distância correspondente e  $\varepsilon > 0, \delta > 0$ .

2. O conjunto  $A$  é denominado um conjunto Pareto ótimo global se e somente se:

$$\forall a \in A : \nexists x \in X_f : x \succ a$$

A diferença entre os ótimos global e local é ilustrada pela Figura 4.4. A linha pontilhada constitui a frente Pareto ótima global enquanto a linha contínua uma frente Pareto ótima local. Pode-se notar que um conjunto Pareto ótimo não necessariamente contém todas soluções ótimas Pareto e que o conjunto ótimo global é um conjunto ótimo local.

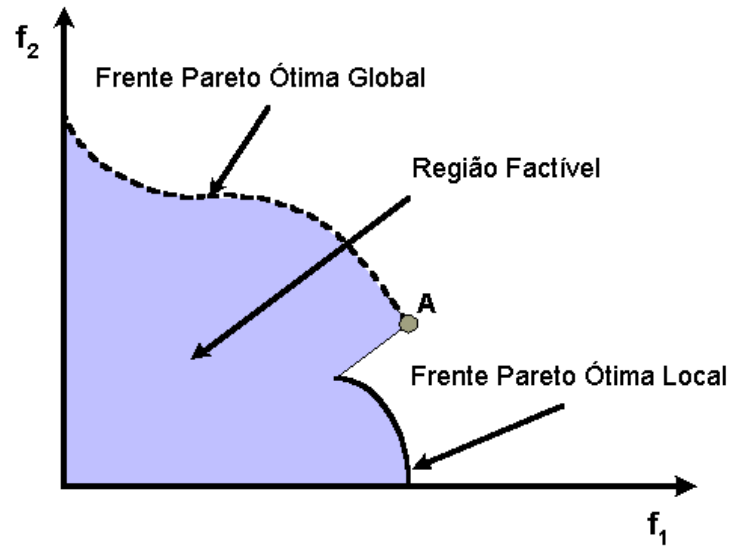


Figura 4.4 - Ilustração dos conjuntos Pareto ótimo global e local no espaço objetivo (ZITZLER, 1999)

Assim, um problema de otimização multiobjetivo se considera matematicamente solucionado quando o conjunto Pareto ótimo é encontrado, porém, em problemas reais, usualmente se requer uma única solução. Do ponto de vista matemático todas as soluções do conjunto Pareto têm a mesma importância. Entretanto, para se obter uma solução implementada no problema, necessita-se de informação adicional de preferência. Um decisor humano ou um grupo de decisores é quem proporciona a informação de preferência necessária para selecionar uma solução do conjunto Pareto (ZITZLER, 1999).

De acordo com DEB (2001), o procedimento para resolver um problema otimização multiobjetivo deve ser dividido em duas etapas. A primeira etapa tem como objetivo gerar as soluções ótimas aplicando-se algum modelo de otimização e a segunda etapa refere-se à escolha dessas soluções. Na Figura 4.5 se ilustra de forma geral tal procedimento.

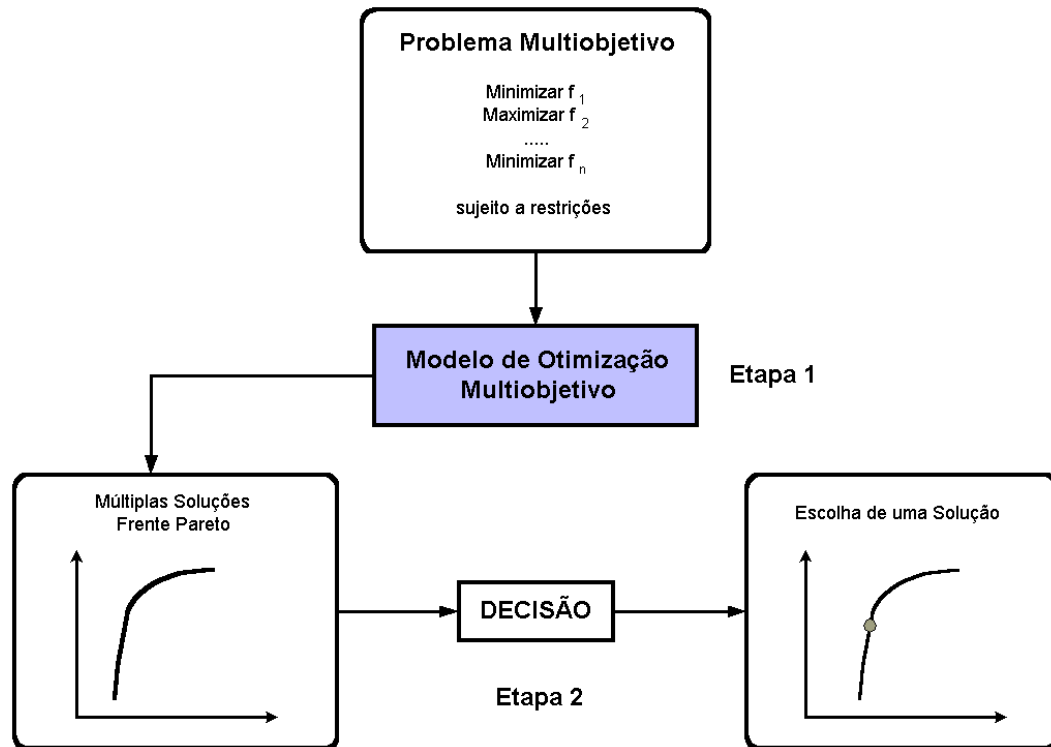


Figura 4.5 - Esquema geral de um procedimento multiobjetivo (DEB, 2001)

No entanto, cada solução na frente Pareto corresponde a uma ordem específica de importância dos objetivos. Assim, se fatores de preferência entre os objetivos forem conhecidos para um problema específico, não há necessidade de seguir o princípio apresentado na Figura 4.5 para um problema multiobjetivo (CHEUNG, 2003).

## 4.4 Algoritmos Evolucionários Multiobjetivo

Um renascimento no campo da otimização multiobjetivo se produz na década dos 90, com o surgimento dos primeiros algoritmos evolucionários que consideravam de forma simultânea a otimização de objetivos múltiplos utilizando o conceito de dominância de Pareto.

Na otimização multiobjetivo, a noção de ótimo não é tão óbvia, já que se deve com-

patibilizar as diferenças existentes entre os objetivos. Nesses casos, é útil o conceito de ótimo de Pareto que sugere a obtenção não de uma única solução, senão de uma família de soluções que são chamadas de não dominadas. Assim, devido ao sucesso obtido pelos algoritmos evolucionários em otimização de uma única função e suas próprias características motivaram o interesse dos pesquisadores para utilizá-los em otimização multiobjetivo (FONSECA e FLEMING, 1995; VELDHUIZEN, 1999; ZITZLER, 1999).

Os AGs requerem informação escalar para sua implementação sobre o valor de adaptação dos indivíduos, o que significa que, pretendendo aplicá-los em problemas multiobjetivos é fundamental que os vetores objetivos sejam escalares. Esse procedimento nem sempre é possível pela dificuldade de obtenção de um critério global baseado na formulação do problema. Na ausência de informações, os objetivos tendem a assumir o mesmo grau de importância para o problema. Caso contrário, pode combiná-los de acordo com a informação disponível, provavelmente assumindo mais importância para determinados objetivos (CARRIJO, 2004). Devido a esse fato, não é difícil entender que os primeiros enfoques evolutivos para trabalhar com objetivos múltiplos baseiam-se na ideia de combinar um AG simples com métodos de escalarização da função objetivo.

A estrutura dos AGs multiobjetivo, ilustrada na Figura 4.6, é similar à dos AGs convencionais, ilustrada na Figura 4.1. No entanto, a diferença está basicamente no estágio de avaliação, onde deve introduzir-se uma modificação para que os algoritmos evolucionários multiobjetivo busquem, ao invés de uma solução, um conjunto de soluções ótimas. Nos algoritmos genéticos multiobjetivo, primeiro, a população inicial é classificada segundo os conceitos de dominância, e dessa forma, obtêm-se os vetores de decisão que são não dominados. Esses vetores são as melhores combinações da iteração corrente e têm alta probabilidade de se encontrarem na próxima iteração (geração). A solução final compreenderá todos vetores de decisão não dominados da última iteração (CHEUNG, 2003).

De acordo com FONSECA e FLEMING (1995) as técnicas evolucionárias para otimização multiobjetivo podem ser classificadas em três categorias: Técnicas de funções agregadas; Técnicas populacionais que não consideram o conceito Pareto; Técnicas populacionais que consideram o conceito Pareto.

Apresentam-se a seguir, de forma sucinta, as características das técnicas para otimização multiobjetiva aplicadas aos algoritmos genéticos em problemas de engenharia, com base em estudos feitos por GOLDBERG (1989), COELLO (1996), FONSECA e

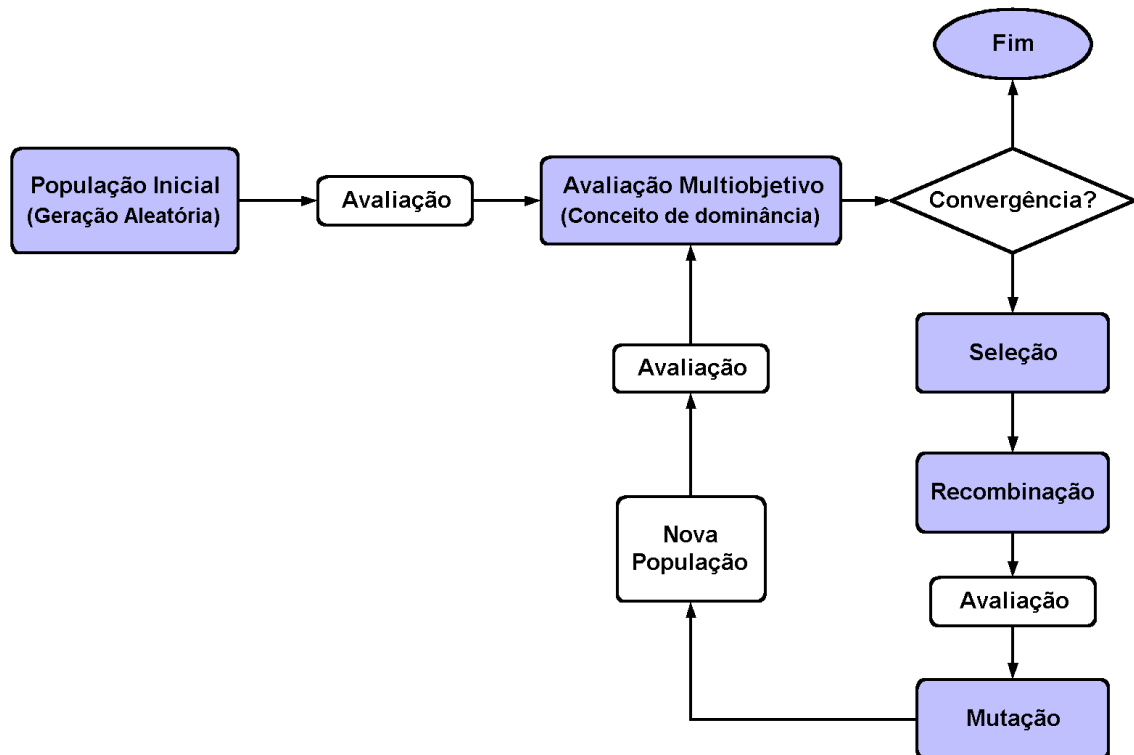


Figura 4.6 - Estrutura geral dos algoritmos genéticos multiobjetivo (CHEUNG, 2003)

FLEMING (1995), DEB (2001), entre outros.

#### 4.4.1 Técnicas de funções agregadas

As técnicas de funções agregadas representam esforços em tentar reproduzir a frente Pareto e têm a característica de combinar várias funções em uma única função através do escalonamento de valores das funções objetivo. Assim, o decisor propõe as metas que devem ser alcançadas e, então, o algoritmo é aplicado várias vezes para gerar a solução compatibilizada (CHEUNG, 2003).

As técnicas de maior transcendência apresentadas por COELLO (1996) são: técnica dos pesos, técnica de programação de metas e técnica de restrições- $\varepsilon$ .

##### Técnica dos pesos

No método dos pesos ou de soma ponderada as funções objetivas do problema de otimização multiobjetivo original se combinam de forma linear utilizando diferentes coeficientes de peso para formar uma função escalar a ser otimizada. Então, ao otimizar:

$$F(\vec{x}) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x))$$

$$\text{sujeito a : } g(\vec{x}) = (g_1(x), g_2(x), \dots, g_m(x)) \leq 0$$

se transforma em um problema de otimização da equação 4.1:

$$y = F(\vec{x}) = w_1 \cdot f_1(x) + w_2 \cdot f_2(x) + \dots + w_k \cdot f_k(x) = \sum_{i=1}^k w_i \cdot f_i(x) \quad (4.1)$$

$$\text{sujeito a : } g(\vec{x}) = (g_1(x), g_2(x), \dots, g_m(x)) \leq 0$$

$$\text{onde : } w_i \geq 0 \text{ para todo } i = 1, \dots, k; \quad \sum_{i=1}^k w_i = 1$$

Para obter um conjunto de soluções utilizando o método da soma ponderada, é necessário resolver a equação 4.1 utilizando diferentes combinações de pesos. Assim, o processo de busca de soluções se inicia com a seleção de um vetor inicial de pesos  $w^0$  com o que se obtém uma solução. Esta seleção pode ser feita segundo as preferências do decisor ou em forma aleatória. Após, o vetor de pesos inicial se modifica para obter um novo. O processo se repete até que um número dado de soluções seja encontrado. O problema desse método é que o tomador de decisões não pode estar seguro de refletir a importância de cada objetivo original de forma apropriada.

### Técnica de programação de metas

No método de programação de metas, o decisor tem que designar objetivos ou metas que se desejam alcançar para cada objetivo. Estes valores se incorporam no problema como restrições adicionais. A técnica tratará de minimizar os desvios absolutos de cada objetivo com respeito ao desejado. A forma mais simples que este método pode se formular é:

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^k \left| \frac{f_i(x) - T_i}{T_i} \right| \text{ sujeita a } x \in X_f$$

Onde  $T_i$  denota a meta ou objetivo estabelecido pelo decisor para a  $i$ -ésima função objetivo  $f_i$ . O critério é, então, minimizar a soma dos valores absolutos das diferenças entre os valores desejados e obtidos.

Esta técnica pode ser eficiente em termos de tempo de processamento se conhecermos as metas que desejamos obter e se essas metas se encontram na região factível, ainda que para isto, o decisor tem a tarefa de encontrar pesos e prioridades adequadas para os

objetivos, o qual é difícil para a maioria dos casos. Se a região factível é difícil de localizar, esse método pode se tornar ineficiente.

### Técnica de restrições- $\epsilon$

O método das restrições se baseia na otimização de uma função objetivo (principal ou preferida) e considera os demais objetivos como restrições que serão determinados por certos níveis permisíveis  $\epsilon_i$ . Portanto, se aplica a otimização de objetivo único para a função objetivo mais relevante  $f_r$  sujeita a restrições adicionais nas outras funções objetivo. Os níveis  $\epsilon_i$  se alteram após para gerar outros pontos do conjunto Pareto. O método pode formular-se da seguinte maneira:

1. encontrar o ótimo da  $r$ -ésima função objetivo, é dizer, achar  $x^*$  tal que:  $f_r(x^*) = f_r^*$  sujeita a restrições adicionais da forma:  $f_i(x^*) \leq \epsilon_i \quad \forall i \neq r \quad (i, r \in \{1, \dots, k\})$  onde  $\epsilon_i$  são os valores supostos das funções objetivo que não desejamos exceder, em um contexto de minimização.
2. Repetir (1) para diferentes valores de  $\epsilon_i$ . A informação derivada de um conjunto bem selecionado de  $\epsilon_i$  pode ser útil para tomar a decisão final. A busca para quando o decisor encontra a solução satisfatória.

Pode ser necessário repetir o processo anterior para diferentes índices de  $r$ . Para obter valores adequados de  $\epsilon_i$ , se efetuam normalmente otimizações individuais para cada uma das funções objetivo em turno, usando técnicas de programação matemática. O inconveniente desta técnica é que consome muito tempo e que a codificação das funções objetivo pode ser muito difícil, até impossível para certos problemas, particularmente se existem objetivos múltiplos. Aliás, esse método tende a encontrar soluções fracamente não dominadas, o qual pode não ser adequado em certas aplicações.

### 4.4.2 Técnicas populacionais que não consideram o conceito Pareto

As técnicas populacionais que não consideram o conceito Pareto, consideram os objetivos definidos individualmente e tem a característica de trabalhar com soluções múltiplas em uma única simulação. O critério de seleção é diferente dos AGs convencionais,

pois a busca é realizada em várias direções ao mesmo tempo, utilizando várias combinações lineares dos objetivos (CHEUNG, 2003).

Entre as técnicas mais sobressalentes desta classificação temos: o algoritmo VEGA, o ordenamento lexicográfico e o uso da teoria dos jogos.

### **Vector Evaluated Genetic Algorithm - VEGA**

SCHAFFER (1984) desenvolveu uma extensão dos AGs simples para acomodar valores das funções aptidão ou avaliação em um vetor, e foi denominado como *Vector Evaluated Genetic Algorithm (VEGA)*.

No VEGA o operador seleção foi modificado considerando que em cada geração, um número de sub-populações é gerada pela performance da seleção proporcional de acordo com cada função objetivo. O algoritmo considera um conjunto dividido em  $n$  partes de dimensões iguais. Uma parte desse conjunto é preenchida com indivíduos escolhidos aleatoriamente na população corrente de acordo com um dos seus objetivos. Posteriormente, a outra parte é preenchida por novos indivíduos criados a partir de indivíduos que já se encontram nesse conjunto. Os novos vetores solução (indivíduos) são obtidos através da aplicação dos operadores genéticos (recombinação e mutação) convencionais. Depois desse procedimento, aplica-se o operador de seleção proporcional (CHEUNG, 2003). Entretanto, como esta metodologia seleciona indivíduos baseados em suas características de dimensão (função) simples, em problemas com objetivos altamente conflitantes, os bons compromissos (*trade-offs*) serão eliminados.

Um dos problemas encontrados nas soluções produzidas pelo algoritmo VEGA foi à tendência da população em dividir-se, em diferentes espécies fortes em relação aos objetivos considerados. A esse fenômeno é dado o nome de especiação (FONSECA e FLEMING, 1995; SRINIVAS e DEB, 1995).

### **Ordenamento Lexicográfico**

No ordenamento lexicográfico os objetivos são ranqueados em função do grau de importância. As funções objetivo se ordenam levando-se em conta a importância de cada objetivo, antes de iniciar o processo de busca de soluções. Depois a solução ótima se obtém minimizando as funções objetivo, começando com a mais importante e procedendo

segundo a ordem de importância designada para cada um dos objetivos. Esse método é adequado só quando a importância de cada objetivo é conhecida e pode se determinar claramente, o qual não é usual na prática.

#### 4.4.3 Técnicas populacionais que consideram o conceito Pareto

Os diferentes métodos para trabalhar com algoritmos evolucionários multiobjetivo utilizando o conceito Pareto podem ser classificados, de forma simples, da seguinte forma:

- Técnicas não elitistas baseadas no conceito Pareto: *Multiple objective Genetic Algorithm - MOGA*, *Non dominated Sorting Genetic Algorithm - NSGA* e *Niched - Pareto Genetic Algorithm - NPGA* e *NPGA II*.
- Técnicas elitistas baseadas no conceito Pareto: *Pareto Archived Evolution Strategy - PAES*, *Pareto Envelope based Selection Algorithm - PESA* e *PESA II*, *Strength Pareto Evolutionary Algorithm - SPEA* e *SPEA II*, *Non dominated Sorting Genetic Algorithm - NSGA II* e *Multiobjective Messy Genetic Algorithm - MOMGA* e *MOMGA II*.

### USO DE TÉCNICAS NÃO ELITISTAS BASEADAS NA TEORIA DE PARETO

#### Multiple objective Genetic Algorithm - MOGA

FONSECA e FLEMING (1993) foram os primeiros a introduzir técnicas de otimização multiobjetivo, utilizando o conceito de dominação (soluções não dominadas), em algoritmos genéticos. Os autores denominaram esse algoritmo como *Multiple objective Genetic Algorithm (MOGA)*.

No MOGA, as soluções não dominadas e a diversidade da população são tratadas simultaneamente durante o processo iterativo. A técnica consiste de um esquema em que o ranqueamento (*ranking*) de um certo indivíduo corresponde ao número de indivíduos na população que domina esse indivíduo. Esta técnica difere do AG típico pelo fato da cadeia (*fitness*) ser alocada para cada solução na população.

A classificação da população baseada no conceito de dominância garante que todos os indivíduos não dominados tenham o mesmo valor de ordenação, mas não garante uni-

formidade de soluções na frente. De forma a evitar a tendência da população em dividir-se em pequenas sub populações e convergirem individualmente para cada um dos objetivos considerados, algumas técnicas preventivas foram desenvolvidas. Essas técnicas possibilitam a representatividade das soluções não dominadas de maneira distribuída ao longo da superfície Pareto. Essas aplicações são denominadas técnicas de compartilhamento (*fitness sharing*).

### **Non dominated Sorting Genetic Algorithm - NSGA**

O *Non dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA)* foi proposto por SRINIVAS e DEB (1994) com o objetivo de se trabalhar o conceito de dominância e a manutenção da diversidade da população simultaneamente, seguindo a idéia baseada nos conceitos de otimização multiobjetivo sugeridas por GOLDBERG (1989). Esse método é similar ao algoritmo *MOGA*, entretanto, o *NSGA* difere da aproximação proposta por FONSECA e FLEMING (1993) na maneira como classifica os vetores solução não dominados e na forma com que o método de compartilhamento é considerado (espaço dos parâmetros) e na garantia da diversidade da população. Os operadores genéticos são aplicados como nos AGs convencionais.

No *NSGA* o operador de seleção é aplicado em várias etapas. Em cada etapa, as soluções não dominadas constituem uma frente não dominada às quais, são atribuídos valores fictícios de aptidão a essas soluções pertencentes a cada frente. Esta avaliação fictícia é ajustada utilizando valores da técnica de compartilhamento (*sharing fitness*) nas frentes não dominadas. A classificação das soluções acontece por frentes, e para cada frente são calculados os respectivos compartilhamentos. Depois de atribuído o valor de aptidão fictício de cada solução pertencente a uma frente, passa-se para próxima frente não dominada e o processo se repete até que toda população seja classificada.

### **Niched Pareto Genetic Algorithm - NPGA**

HORN et al. (1994) propuseram uma combinação da seleção por torneio com o conceito de dominância Pareto. No processo, dois indivíduos são escolhidos aleatoriamente e comparados com um sub-conjunto da população (usualmente, 10% da população). Se um dos indivíduos competidores é dominado por algum membro do conjunto comparação, e o outro não é, então esse último é escolhido como sendo vencedor do torneio. Se ambos

os indivíduos são dominados ou não dominados, o resultado do torneio é decidido pela técnica de compartilhamento: o competidor que obtiver menor número de indivíduos em seu nicho é selecionado para reprodução.

Esse algoritmo é reportado na literatura internacional como *Niched Pareto Genetic Algorithm (NPGA)*. O nicho, na biologia, é definido por um grupo de indivíduos de mesma espécie com características comuns. Na otimização evolucionária faz-se uma analogia a esse processo. Vetores solução com valores de aptidão altos (indivíduos fortes) podem produzir várias cópias de seus vetores na próxima geração, fazendo com que a população perca diversidade através da eliminação dos outros vetores solução pelo processo estocástico. Com isso, diz-se que toda população é aglomerada em um nicho de indivíduos ou converge para uma única solução (CHEUNG, 2003).

## USO DE TÉCNICAS ELITISTAS BASEADAS NA TEORIA DE PARETO

### Pareto Archived Evolution Strategy - PAES

O *Pareto Archived Evolution Strategy (PAES)* é uma técnica que foi introduzido por KNOWLES e CORNE (2000), este método utiliza uma estratégia de evolução em conjunto com um arquivo externo que registra todos os vetores não dominados, previamente encontrados.

Esse algoritmo utiliza a codificação binária ao invés da codificação real para criar um novo vetor solução (filho) através da mutação. O processo resume-se na seguinte análise, se o vetor solução filho domina o vetor solução pai, o filho é aceito como próximo pai e as iterações continuam. Por outro lado, se o pai domina o filho, o filho é descartado e uma nova mutação é realizada para gerar um novo vetor solução (filho). No entanto, se o vetor solução pai e o vetor solução filho não apresentam relação de dominância, a escolha é realizada comparando os dois com uma lista de soluções boas armazenadas ao longo das gerações.

### Pareto Envelope based Selection Algorithm - PESA

O *Pareto Envelope based Selection Algorithm (PESA)* foi proposto por CORNE et al. (2000), apud CARRIJO (2004), esta técnica usa uma pequena população interna e uma grande população externa (ou secundária). O *PESA* utiliza a mesma divisão de

*hypergrid* do espaço da função objetivo adotada pelo *PAES* para manter a diversidade. No entanto, este mecanismo de seleção é baseado em uma medida de agrupamento usada pela *hypergrid* já mencionada. Esta mesma medida de agrupamento é utilizada para decidir quais soluções serão introduzidas na população externa, isto é, o arquivo de vetores não dominados encontrados no processo evolucionário.

### **Strength Pareto Evolutionary Algorithm - SPEA**

O *Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA)* apresenta um novo enfoque evolutivo para a otimização multiobjetivo. Foi proposto por ZITZLER e THIELE (1998) com o objetivo de introduzir o elitismo nos algoritmos evolucionários multiobjetivo.

Esse algoritmo tem como característica fundamental a manutenção de uma população externa ao longo das iterações de forma a armazenar todas as soluções não dominadas encontradas desde a população inicial. Essa população participa de todas as operações evolutivas. Em cada iteração uma população combinada, entre as populações externa e corrente, é construída. Todas as soluções não dominadas da população combinada são avaliadas e recebem um valor de aptidão baseado no número de soluções que estas soluções dominam. Já as soluções dominadas recebem um valor de aptidão pior que o pior valor de aptidão das soluções classificadas como não dominadas. Esse procedimento garante que a busca seja direcionada para espaço das soluções não dominadas. Para manter a diversidade das soluções não dominadas é aplicada uma técnica de agrupamento.

De acordo com CHEUNG (2003), em certos problemas, à medida que o processo evolui, o número de soluções contidas no conjunto Pareto pode ser muito grande, incluso infinito. Desde o ponto de vista do decisor, receber todas as soluções não dominadas encontradas é pouco útil quando o número de elas excede os limites razoáveis, pois, o tamanho do conjunto externo não dominado influencia o comportamento do *SPEA*. Visando restringir o aumento exagerado das soluções não dominadas na população externa, uma dimensão (*PEP*) é fixada. Assim, quando a dimensão do conjunto externo é menor que *PEP*, toda a população elite é encontrada no conjunto. Entretanto, quando uma dimensão excede *PEP*, nem toda a população elite pode estar na população. Para reduzir o número de soluções do conjunto externo, se utiliza um procedimento denominado *clustering algorithm* (algoritmo de agrupamento).

## Non Dominated Sorting Genetic Algorithm - NSGA II

DEB et al. (2002) propuseram uma versão melhorada do *Non Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA)*, denominado *NSGA II*, que é mais eficiente (computacionalmente falando), usa o elitismo e um operador de comparação de vários indivíduos que fornece diversidade sem especificação de parâmetros adicionais.

O *NSGA II* trabalha com dois conjuntos simultâneos em cada iteração, denominados população pai e população filha. Na primeira iteração gera-se um conjunto inicial como nos AGs convencionais e ordena-se esse conjunto considerando o níveis de não dominância. Por exemplo, soluções com nível 1 são as melhores soluções do conjunto, soluções com nível 2 correspondem ao segundo melhor grupo, e assim por diante. Cada solução recebe um valor de aptidão igual a seu nível de dominação (frentes). São aplicados então os operadores de seleção (torneio), recombinação e mutação, sucessivamente, para se obter a população filha. As duas populações têm a mesma dimensão. Após isso, ambas as populações são unidas em um único conjunto temporário (dimensão  $2N$ ). Realiza-se um ordenamento por não dominância desse conjunto temporário de forma a identificar os novos níveis de dominação. Dado que apenas  $N$  soluções podem estar contidas no próximo conjunto, então as  $N$  piores soluções são descartadas, de acordo com um critério de seleção que considera uma técnica de compartilhamento para garantir a diversidade da próxima população (CHEUNG, 2003).

# 5 Metodologia

## 5.1 Considerações gerais

Os sistemas de abastecimento e distribuição de água tratada são peças fundamentais da infraestrutura urbana e são essenciais para o bem estar da população, pois o fornecimento adequado de água para satisfazer a demanda está estreitamente ligado com o desenvolvimento econômico, social e ambiental da população atingida.

A operação desses sistemas é uma tarefa complexa de executar, tal complexidade deve-se ao fato das partes constituintes (captação, adução, reservação e redes de distribuição) serem interligadas. Assim, qualquer medida tomada em uma das partes afeta o funcionamento de outras, o que conduz a que a operação deva ser feita de forma integrada (SOUSA et al., 2006). Segundo CARRIJO (2004), a operação é a seqüência de manobras exercidas sobre os elementos ativos do sistema, como válvulas e bombas.

De acordo com KO et al. (1997), o objetivo de uma efetiva operação de sistemas de abastecimento de água é minimizar os custos operacionais, mantendo a operação das bombas de forma estável, além de garantir uma alta confiabilidade do sistema, através da manutenção dos níveis de água nos reservatórios próximos dos máximos. A redução nos custos de energia elétrica pode ser obtida com uma maior utilização dos conjuntos elevatórios no período fora de ponta, mas isto vai depender de uma complicada correlação entre demanda horária de água e a estrutura tarifária de energia elétrica.

Assim, o equilíbrio entre a demanda de água, a capacidade de produção e o volume disponível para reservação, é considerado como um dos maiores problemas para qualquer trabalho que visa à economia de energia. Pressões excessivas podem causar importantes perdas de água na rede de distribuição, ocasionando um consumo de energia além do previsto. Com isso, as elevatórias trabalham por mais tempo, consumindo, obviamente,

mais energia. O reservatório deve oscilar entre seus níveis máximo e mínimo, de modo a otimizar a potência instalada das elevatórias. Eventualmente, quando se trata de elevatórias acima de uma certa potência instalada, em que se torna possível optar pela tarifação horo-sazonal, vale a pena estudar alternativas que aumentam a capacidade de reservação, de modo a poder fazer uso dessa alternativa dada pelas concessionárias de energia elétrica (MONACHESI, 2005).

Como o sistema de adução de água tratada, aqui estudado, é usualmente composto de estações elevatórias e reservatórios, o procedimento básico de operação deve considerar o controle das vazões e cargas, o número de bombas em operação, a estrutura tarifária de energia elétrica vigente e o nível de água disponível nos reservatórios, de forma a garantir o atendimento independente da variação diária das demandas.

Neste cenário, muitas técnicas de otimização multiobjetivo vêm sendo utilizadas para a operação ótima dos sistemas de abastecimento de água, visando minimizar custos e maximizar benefícios hidráulicos. Destacam-se, entre essas técnicas, os algoritmos evolucionários, os quais apresentam facilidades de aplicação, principalmente, em problemas complexos nos quais os métodos convencionais tornam-se desvantajosos.

No capítulo anterior foram explicados os métodos de otimização multiobjetivo convencionais e não convencionais, e devido as vantagens apresentadas pelos métodos não convencionais, o modelo proposto neste trabalho, foi concebido sob a ótica dos Algoritmos Evolucionários Multiobjetivo (AEMO) que são técnicas mais recentes encontradas na literatura e que se têm mostrado eficientes para tratar este tipo de problema.

Analisar a operação de sistemas de abastecimento de água consiste em identificar e formular objetivos promissores, avaliar esses objetivos através de técnicas de otimização, gerar planos ótimos de operação e selecionar as intervenções (planos) a serem implementadas nos sistemas de forma a melhorar o desempenho do sistema (CHEUNG, 2003).

O modelo computacional para análise proposto neste trabalho, é desenvolvido sob três fases. A primeira fase, que envolve a busca de informações do sistema, tais como dados cadastrais, de topologia e de operação, possibilitando a elaboração de um modelo adequado e que as simulações hidráulicas reproduzam uma melhor aproximação do comportamento real do sistema estudado. Neste trabalho será utilizado o simulador hidráulico *EPANET 2.0* pela versatilidade que apresenta, por ser um programa de domínio público e amplamente testado pela comunidade científica.

A segunda fase, denominada de etapa de avaliação, identifica soluções ótimas através dos algoritmos evolucionários multiobjetivo, os quais avaliaram duas funções objetivo simultaneamente: maximização da eficiência energética e da confiabilidade hidráulica. O programa de otimização multiobjetivo desenvolvido deverá interagir com o simulador hidráulico *EPANET 2.0* na busca pelas melhores soluções possíveis.

Finalmente, a terceira fase do modelo, denominada etapa de decisão, tem como objetivo apresentar as soluções ótimas, identificadas na etapa de avaliação e transformá-las em planos alternativos de operação.

A metodologia proposta neste trabalho visa otimizar a operação de um sistema de adução encontrando uma programação ótima das bombas, de modo a reduzir os custos operacionais, mas, sem reduzir o consumo demandado e sem violar as restrições operacionais do sistema.

## 5.2 Definição do Problema

Um sistema de adução simples, ilustrado na Figura 5.1, é usualmente constituído por um reservatório a montante, uma estação elevatória, uma adutora e um reservatório jusante.

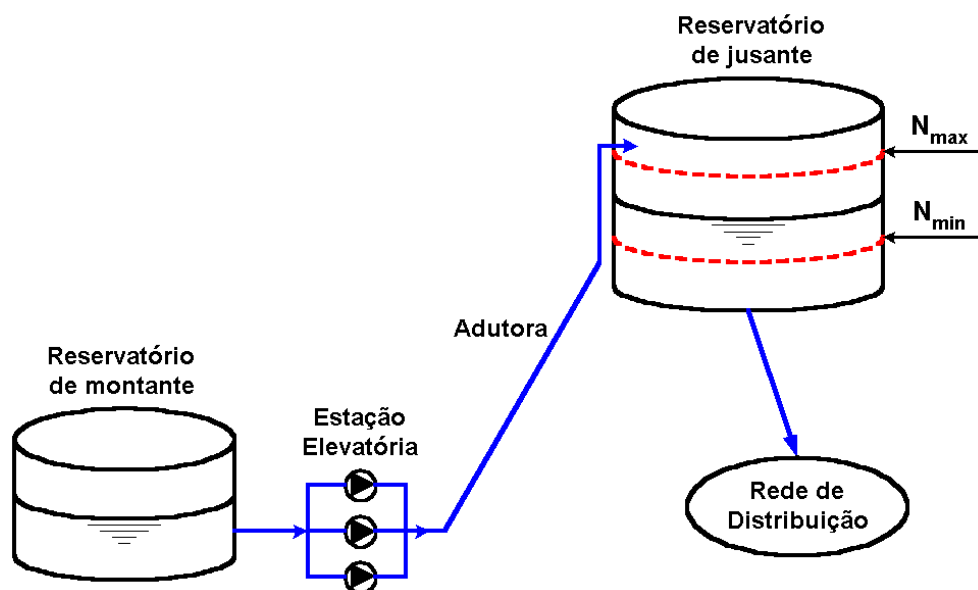


Figura 5.1 - Sistema de Adução Simples

O reservatório de montante pode representar uma captação, um reservatório inter-

meio do sistema de adução ou um reservatório à saída de uma estação de tratamento. A estação elevatória é o local onde estão instaladas as bombas, essa instalação pode compreender uma ou várias bombas que funcionam isoladamente ou associadas em série ou em paralelo para bombear água a um ou mais reservatórios. Quanto o reservatório de jusante poderá ser um reservatório intermeio do sistema de adução, um reservatório de distribuição ou até executar as duas funções.

A demanda de água em uma população é variável no tempo, portanto, a quantidade de água para satisfazer essa demanda deverá também, ser variável no tempo. Em geral, uma estação elevatória deverá bombear a quantidade de água necessária para atender essa demanda e as restrições do sistema, assim, dependendo do momento algumas bombas serão ligadas e outras desligadas (BARÁN et al., 2005).

As técnicas de otimização vêm sendo utilizadas na busca de soluções ótimas para problemas operacionais específicos. Se o objetivo for, por exemplo, o mínimo custo operacional, a função custo estará associada à tarifa de energia elétrica, ao rendimento das bombas, às perdas de carga nas instalações etc. Por outro lado, há restrições impostas pelo próprio sistema, tais como, níveis máximos e mínimos dos reservatórios, limites de pressão e de potência e quantidade de água disponível (CARRIJO, 2004).

Neste estudo, a otimização multiobjetivo da operação do sistema de adução de água tratada é um complexo processo de objetivos múltiplos, que envolvem uma negociação (*trade off*) entre os custos operacionais e os benefícios hidráulicos, associado às restrições operacionais do sistema. O problema de otimização é definido a seguir, através do estabelecimento das variáveis do problema e das funções objetivo.

As variáveis do problema podem ser divididas em variáveis de estado e variáveis de decisão. As variáveis de estado são os níveis de água no reservatório de jusante, as vazões nos tubos e as cargas nos nós, que assumem valores contínuos. As variáveis de decisão, que representam os elementos de controle, são as variáveis binárias que definem o funcionamento das bombas e assumem valores discretos (SOUSA et al., 2006).

As funções objetivo estudadas serão: **(a) maximização da eficiência energética**, onde são considerados o custo de fornecimento de energia elétrica (ativa e reativa) e **(b) maximização da confiabilidade hidráulica**, que considera os níveis adequados de água nos reservatórios, para um período de otimização de um dia.

O período de otimização foi dividido em 24 intervalos de 1 hora. Assume-se que

as bombas podem ser ligadas ou desligadas só ao início de cada intervalo. Intervalos de menos duração podem ser considerados quando requeridos, a pesar de que resulta usual a utilização de intervalos de 1 hora (BARÁN et al., 2006).

A consideração de vários objetivos em um projeto ou plano garante melhorias ao processo de tomada de decisão. Essas melhorias são: um conjunto de soluções ótimas é identificado quando uma metodologia multiobjetivo é empregada; a consideração de objetivos múltiplos promove regras próprias aos participantes do processo de planejamento e tomada de decisão, por exemplo, o analista ou o modelador tem a função de gerar soluções alternativas e apresentá-las ao tomador de decisão que utiliza essas soluções geradas para escolha; se objetivos múltiplos forem considerados, o modelo tornar-se-á mais real (CHEUNG, 2003).

### 5.2.1 Hipóteses do Problema

Para reproduzir o comportamento de um sistema macro de abastecimento de água, pode-se utilizar modelos hidráulicos computacionais que por definição são um conjunto de equações diferenciais que quando resolvidas fornecem pressão nos nós e vazões nos trechos. Como em qualquer modelo matemático, algumas hipóteses são assumidas de forma que a complexidade seja reduzida.

O modelo hidráulico simplificado considera:

- Uma fonte de água inesgotável: o reservatório de água potável. Supõe-se que a fonte de abastecimento proporciona toda a água necessária em qualquer momento, sem custos adicionais, assim como que as condições de pressão máxima e mínima nas tubulações são satisfeitas qualquer seja o nível no reservatório.
- Uma estação de bombeamento de água potável composta por  $n_b$  bombas utilizadas para bombear água desde a fonte até o reservatório elevado. As capacidades das bombas se supõem constantes em cada intervalo de tempo. Portanto, para cada intervalo de uma hora, cada combinação de bombas têm valores fixos de descarga, consumo de energia elétrica e demanda de potência. Assim, as não-linearidades na combinação das bombas se consideram utilizando uma tabela com as características de cada combinação de bombas (BARÁN et al., 2005).

- Uma tubulação adutora que será utilizada para levar água desde a estação de bombeamento até o reservatório elevado.
- Um reservatório elevado, o qual atende a demanda de água da população por gravidade.

### 5.3 Funções Objetivo

Para a otimização da programação da operação do sistema macro de abastecimento de água, nas seguintes seções se apresentam os distintos objetivos a ser otimizados, após será apresentada uma definição formal do problema sob a ótica de otimização multiobjetivo.

Neste trabalho, busca-se o equilíbrio entre os objetivos, considerando simultaneamente: **a eficiência energética** (o custo de fornecimento da energia elétrica) **e a confiabilidade hidráulica** (os níveis adequados de água nos reservatórios). Se fosse considerada apenas a eficiência energética, certamente a solução seria aquela com menor tempo de bombeamento e com isso menores níveis de pressão. Por outro lado, a confiabilidade hidráulica tende a apresentar soluções com maior pressão, de forma que, se ocorrer uma falha, o sistema tem pressão suficiente para suprir a demanda.

#### 5.3.1 Eficiência Energética ( $FO_1$ )

Como apresentado no Capítulo 2, a eficiência energética aumenta quando se consegue realizar um serviço e/ou produzir um bem com uma quantidade de energia inferior à que era usualmente consumida. Baseados nesse conceito, o presente estudo busca maximizar a eficiência energética mediante a redução dos custos de fornecimento de energia elétrica

A função objetivo considerada é representada pela equação 5.1:

$$FO_1 = Min[f_1] \quad (5.1)$$

onde:

$FO_1$  : eficiência energética

$f_1$  : custo de fornecimento de energia elétrica ( $C_{FE}$ )

## CUSTO DE FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA $C_{FE}$

Segundo SAVIC et al. (1996), o consumo de energia representa o custo total devido ao consumo de energia elétrica por parte de todas as bombas que compõem a estação de bombeamento e que são utilizadas durante o período de otimização considerado.

Diversas pesquisas desenvolvidas no passado mostraram que, de todos os parâmetros que se relacionam aos custos operacionais, o mais relevante é o custo do consumo de energia elétrica em estações de bombeamento da água (CARRIJO et al., 2004).

Uma importante consideração que deve ser tomada é o Sistema Tarifário de Energia Elétrica Brasileiro vigente e o grupo em que a empresa de abastecimento de água se enquadra. Como já foi apresentado no Capítulo 2, dependendo da tarifa aplicada, o custo da energia elétrica varia durante as horas do dia e durante os meses do ano. Também, a Demanda de Ultrapassagem varia segundo o sub - grupo atendido.

Neste trabalho, será avaliada a tarifa horo-sazonal azul, onde o custo de fornecimento de energia elétrica representa o somatório do custo devido ao consumo de energia elétrica, à demanda de potência contratada, ao consumo de energia reativa, à demanda de potência reativa, e à parcela de ultrapassagem se houver. Aliás, segundo o que estabelece a THS azul, como a avaliação é feita em um dia a diferença do custo relativo ao consumo de energia e à demanda terá diferenciação de preços segundo as horas do dia estabelecidas pela concessionária de energia.

A influência da estrutura tarifária variável na programação do funcionamento das bombas é importante. O custo da energia elétrica pode ser drasticamente reduzido se um plano de operação ótimo estabelecer o número mínimo de bombas ou as bombas de menor consumo elétrico, trabalhando durante o horário de ponta (MACKLE et al., 1995; SAVIC et al., 1996). Assim, a água armazenada nos reservatórios pode ser utilizada durante esse período de tempo para atender a demanda da população.

A expressão matemática do custo de fornecimento de energia elétrica  $C_{FE}$  baseada na Resolução ANEEL N° 456, para o cálculo da parcelas ativas e reativas do sistema, é dada pela equação 5.2:

$$f_1 = C_{FE} = C_{CE} + C_{DP} + C_{ER} + C_{DR} + C_{DU} \quad (5.2)$$

onde:

- $C_{FE}$ : custo total do fornecimento de energia elétrica
- $C_{CE}$ : custo do consumo de energia elétrica, considerando a diferença de horários que estabelece a THS azul (ponta e fora de ponta). Dada pela equação 5.3:

$$C_{CE} = \sum_{t=1}^{24} \sum_{b=1}^{n_b} TC_t \times \frac{Q_{(b,t)} \times H_{(b,t)} \times \gamma}{\eta_{(b,t)}} \times \Delta t \quad (5.3)$$

onde:  $t$  é a hora do dia;  $n_b$  é o número de bombas funcionando na elevatória;  $TC_t$  é a tarifa unitária de consumo de energia no período  $t$  ( $R\$/kWh$ );  $Q_{(b,t)}$  é a vazão bombeada por  $b$  bombas no tempo  $t$  ( $m^3/s$ );  $H_{(b,t)}$  é a carga hidráulica de bombeamento no período  $t$  (m);  $\eta_{(b,t)}$  é a eficiência do conjunto motor-bomba no período  $t$  (%);  $\gamma$  é o peso específico da água ( $\gamma = 9.81kN/m^3$ );  $\Delta t$  é a duração do período de tempo  $t$  (no caso  $\Delta t = 1h$ ).

- $C_{DP}$ : custo da demanda de potência contratada, considerando a diferença de horários que estabelece a THS azul. Dada pela equação 5.4:

$$C_{DP} = TD_t \times DMax_{(b,t)} \quad (5.4)$$

onde:  $t$  é a hora do dia;  $TD_t$  é a tarifa unitária de demanda de potência no período de tempo  $t$  ( $R\$/kW$ );  $DMax_{(b,t)}$  é a demanda máxima de potência para  $b$  bombas funcionando no período  $t$  (kW);  $DC$  é a demanda de potência contratada (kW) sendo que  $DMax \leq 1.1DC$ .

- $C_{DU}$ : custo da demanda de ultrapassagem de potência. Dada pela equação 5.5:

$$C_{DU} = TU_t \times (DMax_{(b,t)} - DC_t) \quad (5.5)$$

onde:  $t$  é a hora do dia;  $TU_t$  é a tarifa unitária de ultrapassagem de demanda de potência no período de tempo  $t$  ( $R\$/kW$ );  $DMax_{(b,t)}$  é a demanda máxima de potência para  $b$  bombas funcionando no período  $t$  (kW);  $DC_t$  é a demanda de potência contratada no período  $t$  (kW) sendo que  $DMax > 1.1DC$ .

- $C_{ER}$ : custo do consumo de energia reativa, considerando a diferença de horários que

estabelece a THS azul. Dada pela equação 5.6:

$$C_{ER} = \sum_{t=1}^n [CA_t \times (\frac{fr}{fp} - 1)] \times TC_t \quad (5.6)$$

onde:  $t$  é a hora do dia;  $TC_t$  é a tarifa unitária de consumo de energia no período  $t$  ( $R\$/kWh$ );  $CA_t$  é o consumo de energia ativa medida em cada intervalo de hora  $t$  durante o período de faturamento (kWh);  $fr$  é o fator de potência de referência igual a 0,92;  $fp$  é o fator de potência de cada unidade consumidora, calculado em cada intervalo  $t$  de uma hora, durante o período de faturamento;

- $C_{DR}$ : custo da demanda contratada de energia reativa, considerando a diferença de horários que estabelece a THS azul. Dada pela equação 5.7:

$$C_{DR} = [MAX_{t=1}^n (DA_t \times \frac{fr}{fp}) - DC_t] \times TD_t \quad (5.7)$$

onde:  $t$  é a hora do dia;  $TD_t$  é a tarifa unitária de demanda de potência no período de tempo  $t$  ( $R\$/kW$ );  $DA_t$  é a demanda medida no intervalo de integralização de uma hora  $t$ , durante o período de faturamento (kW);  $fr$  é o fator de potência de referência igual a 0,92;  $fp$  é o fator de potência de cada unidade consumidora, calculado em cada intervalo  $t$  de uma hora, durante o período de faturamento;  $DC_t$  é a demanda de potência contratada (kW).

### 5.3.2 Confiabilidade Hidráulica ( $FO_2$ )

A confiabilidade hidráulica é um conceito que se utiliza para medir o desempenho hidráulico ou mecânico de um sistema. Do ponto de vista hidráulico, tal conceito pode ser formulado através da minimização das ocorrências inadequadas de vazões e pressões, para um ou mais pontos do sistema (trechos ou nós).

Conceitualmente, a confiabilidade hidráulica é a capacidade que o sistema tem de atender as demandas dos usuários com um nível aceitável de interrupção, independente das condições anormais que possam ocorrer. O parâmetro hidráulico a ser avaliado para a confiabilidade serão os níveis nos reservatórios de distribuição.

Baseado em estudos desenvolvidos por GARGANO e PIANESE (2000), decidiu-se adotar neste trabalho a avaliação dos benefícios hidráulicos através da adoção de coefi-

cientes ou índices de desempenho. A qualidade da água e a confiabilidade mecânica não foram consideradas, embora sua importância na otimização operacional do sistema fosse reconhecida. Os benefícios referem-se à melhoria do nível de serviço prestado aos consumidores, combinados com uma medida de decréscimo dos custos associados à operação e manutenção dos sistemas de distribuição de água.

A função objetivo considerada é representada pela equação 5.8:

$$FO_2 = Max[f_2] \quad (5.8)$$

onde:

$FO_2$  : confiabilidade hidráulica

$f_2$  : variação dos níveis nos reservatórios ( $NR$ )

## NÍVEIS NOS RESERVATÓRIOS ( $NR$ )

Segundo BARÁN et al. (2005) existem três níveis de água diferentes a ser considerados nos reservatórios:

- *nível mínimo*: nível que deve ser mantido por segurança, para a previsão de eventos imprevistos, como incêndios, que podem consumir grandes quantidades de água em um intervalo de tempo pequeno.
- *nível máximo*: nível que deve ser compatível com as dimensões do reservatório de forma a evitar perdas na tubulação.
- *nível inicial*: nível que deve ser recuperado ao final do período de otimização a fim de manter uma programação periódica se as condições nos dias consecutivos não mudarem de maneira abrupta.

Para a avaliação dos benefícios hidráulicos relativos aos níveis de água nos reservatórios, geralmente considera-se o coeficiente denominado de benefício dos níveis adequados de água nos reservatórios  $\Psi_{bn}$ , como utilizado por CARRIJO et. al (2004), no qual é dado

pela seguinte equação:

$$\Psi_{bn(j,t)} = \left[ \frac{N_{at(j,t)} - N_{min(j)}}{N_{req(j,t)} - N_{min(j)}} \right]^{1/2} \text{ se } N_{min} \leq N_{at(j,t)} \leq N_{req(j,t)} \quad (5.9)$$

$$\Psi_{bn(j,t)} = 0 \text{ se } N_{at(j,t)} < N_{min} \text{ ou } N_{at(j,t)} > N_{req(j,t)} \quad (5.10)$$

onde  $N_{at(j,t)}$  é o nível de água no reservatório  $j$  no tempo  $t$  (fornecido pelo simulador EPANET);  $N_{min(j)}$  é o nível de água no reservatório  $j$ ; e  $N_{req(j,t)}$  é o nível de água requerido no reservatório  $j$  no tempo  $t$ .

Assim, o benefício hidráulico relativo à adequação dos níveis de água nos reservatórios ( $BH_{NR}$ ) poder ser representado pela equação 5.11:

$$BH_{NR} = f_3 = \sum_{t=1}^{24} \sum_{j=1}^{nr} \Psi_{(j,t)} \quad (5.11)$$

### 5.3.3 Problema de otimização multiobjetivo

A maximização de  $FO_1$  e a maximização de  $FO_2$ , de acordo com as equações 5.1 e 5.8, apresentadas anteriormente representam um problema de otimização multiobjetivo, no qual os objetivos são conflitantes. Portanto, não existe uma única solução ótima, mas um conjunto de soluções ótimas designadas soluções não dominadas ou não inferiores que não podem ser melhoradas simultaneamente, sem sacrificar pelo menos um objetivo (CARRIJO, 2004). Assim, o conjunto de soluções ótimas com bons compromissos (*trade-off*), denominada de frente ótima Pareto devem ser identificadas usando os algoritmos genéticos multiobjetivos, os quais têm se mostrado muito efetivos, nesses casos.

As funções objetivo adotadas neste trabalho serão:

$$FO_{TOTAL} = F_1 + F_2 \quad (5.12)$$

$$F_1 = MaxFO_1 = Min[f_1] \quad (5.13)$$

$$F_2 = MaxFO_2 = Max[f_2] \quad (5.14)$$

Onde:

$FO_1$  : eficiência energética

$F0_2$  : confiabilidade hidráulica

$f_1$  : custo de fornecimento de energia elétrica ( $C_{FE}$ ), ver eq. 5.2

$f_2$  : variação dos níveis nos reservatórios ( $BH_{NR}$ ), ver eq. 5.11

### 5.3.4 Codificação

Para representar a programação das bombas será utilizada a codificação binária. Cada bomba, em todos os intervalos de tempo, é representada por um bit numa *string* ou vetor. Em esse vetor, o zero (0) representa a bomba que não está trabalhando (*off*) em um intervalo particular de tempo, enquanto, que o um (1) representa a bomba que está trabalhando (*on*). Desta forma,  $n$  bits são necessitados para representar cada combinação de bombas possível em um intervalo de tempo dado  $t$ , sendo  $n$  o número de bombas na estação de bombeamento. Considera-se um período de otimização de um dia dividido em 24 intervalos de uma hora. Para este modelo, as bombas só podem ser ligadas (*turned on*) ou desligadas (*turned off*) no início de cada intervalo de tempo (BARÁN et al., 2005).

| hora        | 1     |       |     |       | ... | 24    |       |     |       |
|-------------|-------|-------|-----|-------|-----|-------|-------|-----|-------|
| bomba       | $B_1$ | $B_2$ | ... | $B_N$ | ... | $B_1$ | $B_2$ | ... | $B_N$ |
| bit         | 0     | 1     | ... | 0     | ... | 1     | 0     | ... | 1     |
| significado | off   | on    | ... | off   | ... | on    | off   | ... | on    |

Figura 5.2 - Codificação do problema de otimização da programação das bombas

## 5.4 Modelo Computacional Proposto

O modelo proposto neste trabalho é resolvido mediante uma aplicação computacional que interliga um otimizador, baseado em algoritmos evolucionários multiobjetivo (*SPEA*), e um simulador hidráulico que se baseia no código original do *EPANET2* (ROSSMAN, 2001), acoplado ao C++.

A interface entre o modelo de simulação hidráulica e o modelo de otimização deve ser cuidadosamente elaborada no sentido de dar transparência ao modelo, de forma a facilitar o seu uso e, ao mesmo tempo, permitir a análise de problemas complexos envolvendo múltiplos objetivos (CARRIJO, 2004). Essa interface é ilustrado na Figura 5.3.

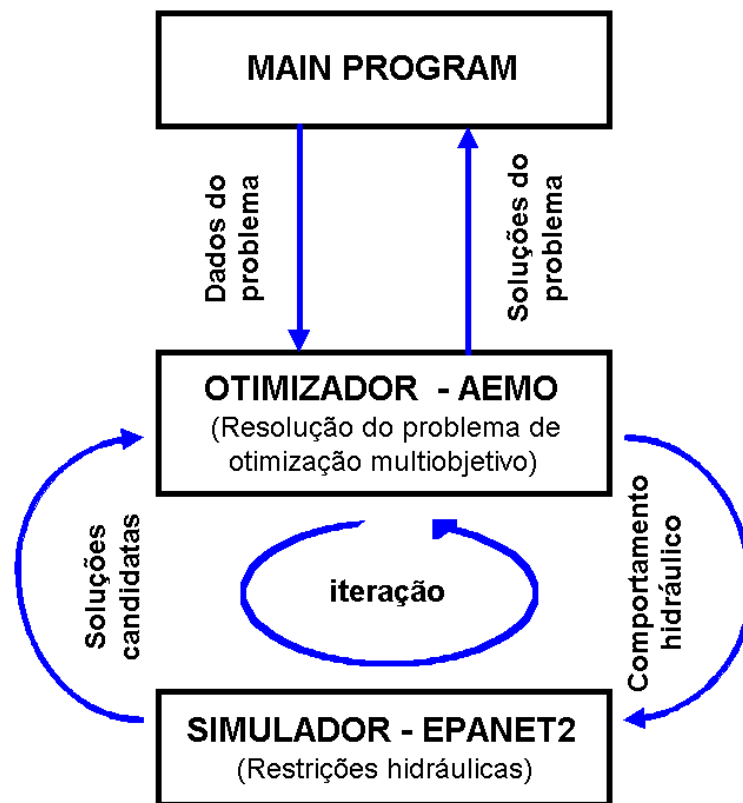


Figura 5.3 - Interface do modelo proposto

De acordo com CHEUNG (2003), as avaliações hidráulicas constituem parte essencial no cômputo dos valores das funções objetivo. Há portanto, necessidade de incorporar um simulador hidráulico à rotina computacional que quantifica os objetivos estabelecidos. O simulador deve desempenhar o papel de avaliador das variáveis de estado (pressões e vazões) do sistema.

#### 5.4.1 Simulação Hidráulica

O modelo de simulação hidráulica *EPANET* pode ser utilizado na análise de planos estratégicos de desenvolvimento como a modificação do funcionamento operacional de grupos elevatórios e reservatórios para minimização de custos energéticos e tempos de percurso; para planejar e melhorar o desempenho hidráulico de um sistema, seja no projeto, na operação diária ou no estudo de cenários de emergência; na modelação de bombas de velocidade constante ou variável; no cálculo da energia de bombeamento e do respectivo custo; na modelação de dispositivos para os quais a vazão dependa da pressão no nó; na configuração das condições de operação do sistema em controles simples,

dependentes de uma só condição (p.ex., período do dia, altura de água num reservatório de nível variável) ou em controles com condições múltiplas (p.ex., desligar/ligar a bomba e abrir/fechar a tubagem de by-pass, quando a altura de água no reservatório de nível variável está acima/abaixo de um determinado valor especificado (BORGES, 2004).

O *EPANET2* (ROSSMAN, 2001) é um programa de domínio público desenvolvido pela *Environmental Protection Agency (EPA)* para analisar redes de distribuição de água em regime permanente. Esse pacote computacional é distribuído gratuitamente sob duas formas: executável e código fonte (Toolkit). A forma executável é recomendável para estudos que envolvam apenas as simulações hidráulicas. O *EPANET* possui o código-fonte do aplicativo aberto à leitura e alterações conforme às necessidades dos interessados. A forma de código fonte é recomendável para estudos que envolvem o acoplamento de outros modelos (calibração, operação, vazamentos, demanda variável, dentre outros) com o *EPANET2*.

A Toolkit é uma biblioteca de vínculo dinâmico (DLL) que contém funções que permitem aos programadores o desenvolvimento de aplicações específicas. Essas funções podem ser incorporadas em aplicações Windows escritas em: C/C++, Pascal (Delphi), Visual Basic ou outras linguagens de programação que possibilitam chamar funções através de DLLs. Além disso, essa biblioteca permite abrir e fechar um arquivo que descreve a rede (.INP), ler e modificar os vários parâmetros de projeto e operação, simular períodos extensivos acessando resultados a cada passo e escrever os resultados das simulações nos arquivos de saída (.RPT). Além de possibilitar o desenvolvimento de modelos específicos (calibração, projeto e operação), a Toolkit também oferece uma certa flexibilidade para acoplar e integrar plataformas CAD e GIS, que auxiliam na modelação de redes de distribuição de água.

#### 5.4.2 Otimização Multiobjetivo

A maioria dos problemas na engenharia de recursos hídricos envolve decisões complexas devido à existência dos objetivos múltiplos e conflitantes. Como já explicado no Capítulo 4, enquanto que otimização de objetivo único busca a melhor solução, que corresponde o valor mínimo ou máximo de uma determinada função objetivo; na otimização multiobjetivo não existe uma única solução ótima, mas sim várias soluções que correspondem a atribuição de prioridades diferentes aos objetivos do problema, fornecendo assim

um conjunto de soluções de compromisso, denominadas *trade-off*, soluções não dominadas, soluções não inferiores ou soluções ótimas Pareto.

A otimização de sistemas de abastecimento de água é uma das áreas de pesquisa mais complexas e promissoras. A literatura reporta vários estudos sobre o estado da arte dos modelos de otimização desses sistemas (CHEUNG, 2003). No entanto, tais modelos não são aplicadas pelos usuários nas companhias de saneamento, devido à dificuldade de definir objetivos e restrições quando comparados aos sistemas reais, onde as demandas nos nós variam, o sistema é construído aos poucos, e existe a tendência de reduzir diâmetros e até mesmo eliminar tubulações (WALSKI, 2001).

Os Algoritmos Evolucionários (AEs) são técnicas que imitam matematicamente os processos encontrados na natureza (evolução natural) e mostram características adequadas para a otimização multiobjetivo, em particular, pela flexibilidade de se explorar a similaridade das soluções através da busca paralela (conjunto de soluções simultaneamente) e, dessa forma, identificar um conjunto de soluções ótimas em uma única simulação.

No entanto, para adequar os AEs à otimização multiobjetivo foram necessárias modificações no módulo de avaliação desses algoritmos, pois ao invés de selecionar uma única solução, os AEs deveria incorporar o critério de dominância para selecionar várias soluções (solução não dominadas) a cada iteração. Após essas modificações surgiu uma nova classe de algoritmos voltados ao problema multiobjetivo, tais algoritmos são denominados Algoritmos Evolucionários Multiobjetivo (AEMO)(CHEUNG, 2003).

### **Strength Pareto Evolutionary Algorithm - SPEA**

*O Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA)* proposto por ZITZLER e THIELE (1998) é o algoritmo escolhido para realizar a otimização multiobjetivo, devido às comparações de desempenho realizadas por ZITZLER (1999).

Autores que utilizaram algoritmos evolucionários multiobjetivo na programação operacional de sistemas elevatórios reportam que o *SPEA* tem se mostrado superior às outras técnicas evolucionárias multiobjetivo ao ser implementado tanto em problemas teste quanto em aplicações reais em termos de tempo computacional e acurácia nas soluções obtidas (BARÁN et al., 2005; CARRIJO et al., 2004).

A seguir se descreve a implementação das etapas do procedimento iterativo do *SPEA*

baseadas nos estudos feitos por CHEUNG (2003) e se ilustra na Figura 5.4 o fluxograma do procedimento geral do *SPEA*.

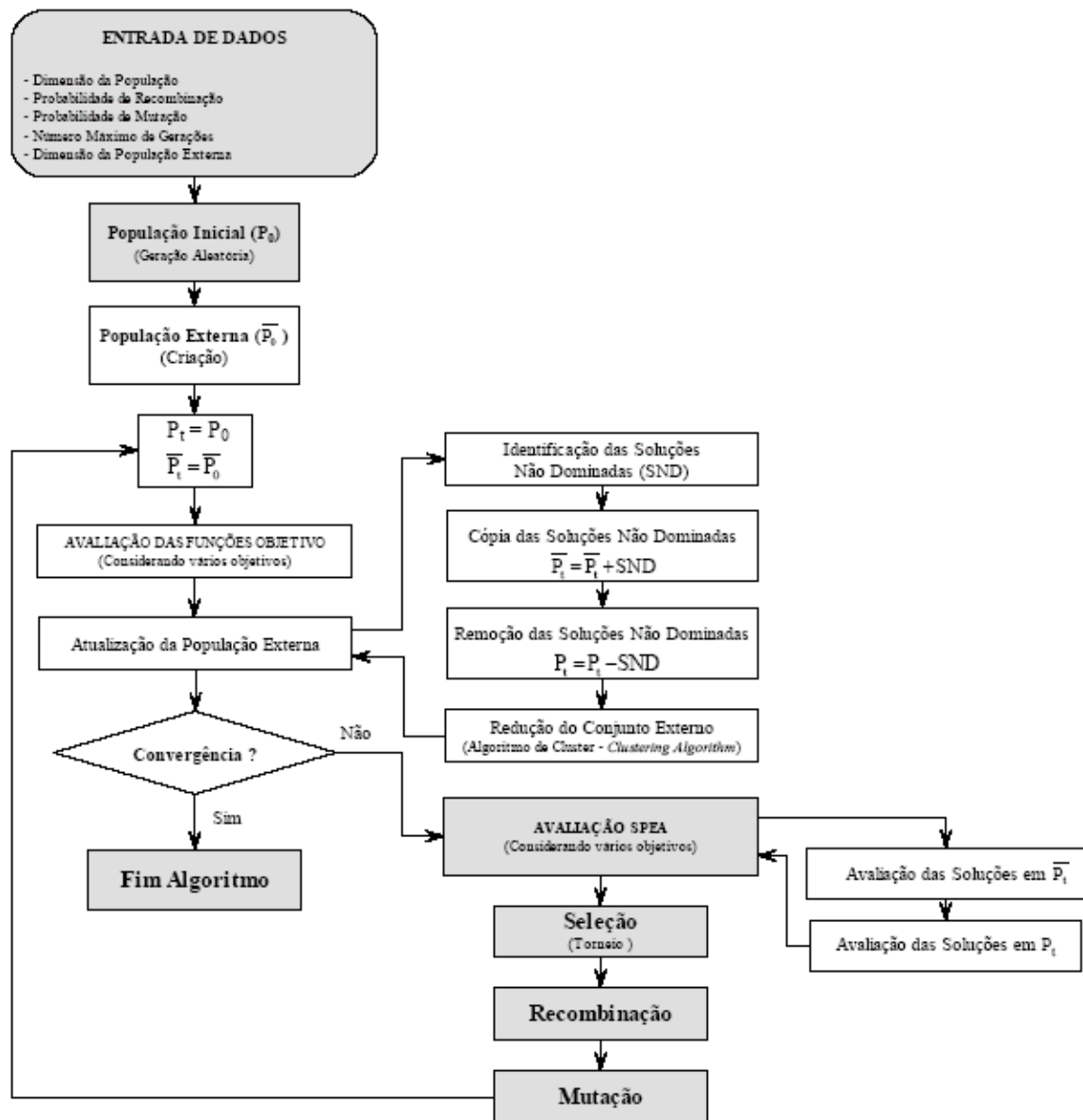


Figura 5.4 - Procedimento geral do SPEA (CHEUNG, 2003)

**Dados de Entrada:** dimensão da população ( $POP$ ); probabilidade de recombinação ( $Pr$ ); probabilidade de mutação ( $Pm$ ); dimensão da população externa ( $\overline{POP}$ ) e número máximo de gerações ( $GER$ ).

**Etapa 1: População inicial** Geração da população inicial aleatória  $P_t$  considerando o parâmetro de entrada  $POP$ .

**Etapa 2: População externa** Criação da população externa  $\overline{P}_t$  vazia de dimensão  $\overline{POP}$  (parâmetro de entrada).

**Etapa 3: Avaliação das funções objetivo** Cada vetor solução pertencente à população inicial  $P_t$  é avaliado de acordo com as funções objetivo consideradas. Esta etapa é denominada avaliação das funções de avaliação ou aptidão considerando objetivos múltiplos.

**Etapa 4: Atualização da população externa** Mediante os seguintes passos: identificação das soluções não dominadas da população  $P_t$ ; cópia das soluções não dominadas encontradas em  $P_t$  para a população  $\overline{P}_t$ ; remoção das soluções não dominadas de  $P_t$ ; adequação do conjunto externo, conforme dimensão da população externa  $\overline{POP}$ , através do algoritmo de cluster o qual reduz a dimensão da população externa corrente ( $\overline{POP}_{corrente}$ ) para a dimensão limite ( $\overline{POP}$ ), fornecida nos dados de entrada (sendo  $\overline{POP}_{corrente} > \overline{POP}$ ).

**Etapa 5: Convergência** Nessa etapa o algoritmo verificará seu critério de convergência. Em geral, adota-se o número máximo de iterações para essa verificação. Se tal critério for satisfeito o algoritmo segue para a etapa 11 e o processo é finalizado, caso contrário, o algoritmo segue para a etapa 6.

**Etapa 6: Avaliação SPEA** O módulo de avaliação tem objetivo de atribuir valores de aptidão às soluções como forma de prepará-las para o operador seleção. No SPEA, esse procedimento é realizado sob duas etapas. Primeiro todos os vetores solução  $i$  pertencentes à população externa ( $\overline{P}_t$ ) são classificados e recebem um valor de aptidão  $S_i$  denominado na literatura internacional como *strength*. Esse valor de aptidão, para um dado vetor de solução  $i$ , é proporcional ao número de soluções dominadas pela solução  $i$  na população corrente. Posteriormente, calcula-se os valores de aptidão ( $F_j$ ) de todas as soluções  $j$  pertencentes à população corrente ( $P_t$ ). Esse valor de aptidão é calculado como sendo a soma de todos os valores de aptidão  $S_i$  das soluções externas  $i$  que dominam vetores  $j$  da população corrente.

**Etapa 7: Seleção** O SPEA utiliza a técnica de seleção por torneio. Após todas as soluções, pertencentes aos conjuntos externo e corrente, terem recebido seus respectivos valores de aptidão ( $F$ ), os conjuntos  $P_t$  e  $\overline{P}_t$  são unidos para ser aplicado o operador de seleção. A seleção por torneio no SPEA é desenvolvida da seguinte forma: cria-se

um conjunto temporário ( $P_{temp}$ ) de dimensão  $n_{populao}$ ; seleciona-se aleatoriamente duas soluções ( $i$  e  $j$ ) pertencentes a conjunto unificado ( $P_t \cup \overline{P_t}$ ); se  $F(i) < F(j)$  então  $i$  é incluso em  $P_{temp}$ , caso contrário  $j$  é incluso em  $P_{temp}$ , onde a melhor solução é a que apresenta menor valor de aptidão ( $F$ ).

**Etapa 8: Recombinação** Nessa etapa o SPEA se assemelham aos AEs simples. A recombinação é denominada operador de variação. Esse operador é aplicado como na estrutura geral dos AGs convencionais simples, apresentado na Figura 4.1.

**Etapa 9: Mutação** O operador de mutação também faz parte do processo de variação e é responsável pela introdução de diversidade na população, que muitas vezes é perdida ao longo das iterações, em outras palavras pode-se dizer que esse operador é responsável pela introdução de material genético na população. Em geral, esse operador é aplicado como na estrutura dos AGs convencionais apresentada pela Figura 4.1.

**Etapa 10: Nova População** Uma nova população é formada devido à aplicação dos operadores de recombinação e mutação. Assim é necessário que uma nova avaliação seja realizada para cada vetor solução pertencente a essa nova população, portanto volta-se a etapa 3.

**Etapa 11: Resultados** Nessa etapa o algoritmo apresenta as soluções ótimas Pareto.

### 5.4.3 Ferramentas e Linguagens de Programação

A ferramenta utilizada para o desenvolvimento do presente trabalho será um microcomputador *Pentium IV*, com processador de 2,0 GHz e 512 Mb de memória *RAM* proporcionado pelo Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento - LENHS.

A linguagem de programação que será utilizada como compilador é o C++ Builder 5 e a biblioteca GAlib C++, e o programa do simulador hidráulico *EPANET 2* (ROSSMAN, 2001).

## 6 Estudo do caso

O objetivo do presente trabalho é desenvolver uma ferramenta flexível e prática que forneça um conjunto eficiente de estratégias operacionais para a otimização energética na programação do funcionamento das bombas de um sistema adutor. Além do objetivo principal, também serão avaliadas duas estratégias para redução do custo de energia no sistema adutor, essas são: reenquadramento tarifário e correção do fator de potência. Para análise do modelo proposto e avaliação dos resultados, foi utilizado uma parte do sistema adutor de água tratada da cidade de Campo Grande, capital do estado de Mato Grosso do Sul, localizado na Região Centro-Oeste do Brasil.

### 6.1 Sistema de Abastecimento de água de Campo Grande

O sistema de abastecimento de água da cidade de Campo Grande-MS feito pela Empresa de Saneamento Águas Guariroba S.A. possui dois tipos de captações: superficiais e subterrâneas. Este sistema é dividido em 20 setores operacionais, responsáveis pelo abastecimento de cerca de oitocentos mil habitantes.

As três captações superficiais são: Guariroba, Lageado e Desbarrancado. Elas são responsáveis por 60% do abastecimento, sendo o Guariroba a principal delas. A bacia do Guariroba ocupa uma área de  $389 \text{ km}^2$ . O lago da represa do Guariroba possui um volume de 3,7 milhões  $\text{m}^3$  e tem uma área de aproximadamente  $850.000 \text{ m}^2$ .

As captações subterrâneas (poços) são responsáveis por 40% do total da água que abastece o município. Atualmente existem cerca de 95 poços em operação, sendo que 11 exploram o aquífero Guarani. Após o tratamento a água segue para a reservação. Nesta etapa os reservatórios tem com principal função operar como reguladores da distribuição da água. Campo Grande tem atualmente 98 reservatórios e o volume total de reservação

é de 82.050 metros cúbicos.

A energia elétrica é uma das principais matérias primas usadas na produção de água potável. Os sistemas de abastecimento de água tratada e de esgotamento sanitário de Campo Grande contam com 160 unidades consumidoras de energia elétrica e representam um grande percentual nos custos da Aguas Guariroba.

### 6.1.1 Sistema ETA Guariroba

O Sistema ETA Guariroba ou centro de reservação RI-2 é composto por 4 reservatórios semi-enterrados com capacidade de 3000  $m^3$  cada. O sistema aduz água para quatro sistemas: bairro Coronel Antonino, RB/TC, bairro Maria Aparecida Pedrossian e serve como reforço para a ETA Lageado. Inicialmente, esse sistema foi projetado para abastecer por gravidade os sub-sistemas. No entanto, devido ao aumento de demanda optou-se pela instalação de uma bomba em linha (booster) para atender as necessidades operacionais, o booster foi instalado para reforçar, primeiramente o reservatório Coronel Antonino e posteriormente, criou-se um sistema que possibilitou uma manobra para que o sistema Lageado também fosse beneficiado com a elevação mecânica do booster. O sistema ainda é composto de canalizações de diâmetros de 500, 600 e 700mm de ferro fundido ao longo dos trechos que recalcam água até os reservatórios, os quais estão na entrada dos sistemas Lageado e Coronel Antonino (MARTINS et al., 2006).

Também faz parte do sistema, um dispositivo de válvulas e registros que possibilitam a manobra de recalque, que hora abastece o sistema Lageado, e hora o bairro Coronel Antonino, nunca beneficiando os dois sistemas simultaneamente. Os outros dois sistemas abastecidos pela ETA Guariroba, Maria Aparecida Pedrossian e RB/TC, não foram levados em consideração neste estudo, pois são abastecidos por gravidade, não fazendo assim, uso do booster. A Figura 6.1 ilustra melhor o sistema do qual é constituído a ETA Guariroba.

Os dados dos reservatórios e do booster foram proporcionados pela empresa de saneamento e são apresentados nas Tabelas 6.1 e 6.2.

O sistema está enquadrado mediante contrato com a concessionária de energia ENERSUL na Tarifa Horo-sazonal Verde e o horário de ponta estabelecido é das 17h30 às 20h30. Tal como foi explicado no Capítulo 2 a THS verde distingue os preços de consumo

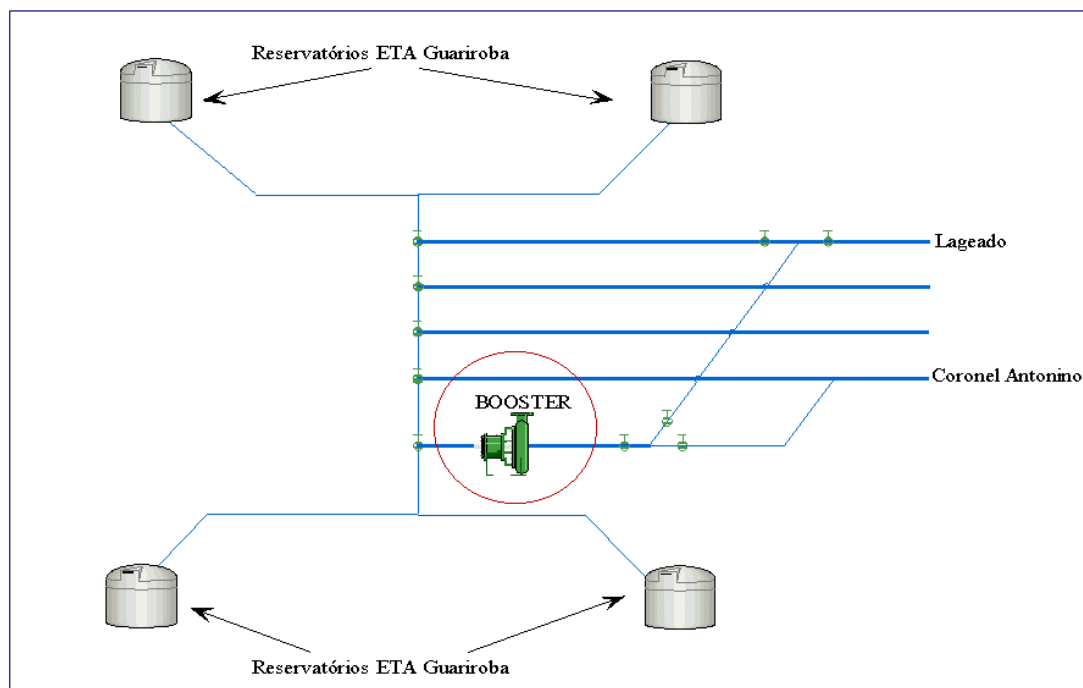


Figura 6.1 - Concepção geral do sistema ETA Guariroba (MARTINS et al., 2006)

Tabela 6.1 - Dados dos reservatórios

| Dados dos reservatórios |               |         |           |               |               |
|-------------------------|---------------|---------|-----------|---------------|---------------|
| ID                      | Reservatórios | Cota(m) | Diam. (m) | Niv. Max. (m) | Niv. Min. (m) |
| 42                      | Cel. Antonino | 642.66  | 50.5      | 4.14          | 1.5           |
| 52                      | Lageado       | 617.09  | 67.28     | 4.98          | 1.5           |

Tabela 6.2 - Dados das bombas

| Dados do booster |         |     |           |             |
|------------------|---------|-----|-----------|-------------|
| ID               | Bomba   | CV  | Carga (m) | Vazão (l/s) |
| 12               | Booster | 550 | 33.5      | 977.11      |

de energia em horário de ponta e fora de ponta, assim como nos períodos do ano, entanto que a demanda tem preço único.

### 6.1.2 Demanda de Consumo

A demanda de consumo é um dado de entrada do problema, a mesma deve ser obtida a priori de fontes confiáveis, pois a qualidade e aplicabilidade dos resultado obtidos pelo modelo dependem de quão reais sejam as previsões da demanda. A demanda é obtida através do estudo estatístico do comportamento da população abastecida pelo reservatório durante vários anos, por isso, uma condição necessária é ter delimitada a área de influência do reservatório.

Os gráficos da distribuição horária das demandas para as áreas de atendimento de cada reservatório são apresentados na Figura 6.2. Estas curvas de demanda foram fornecidas pela Empresa de Saneamento Águas Guariroba S.A.

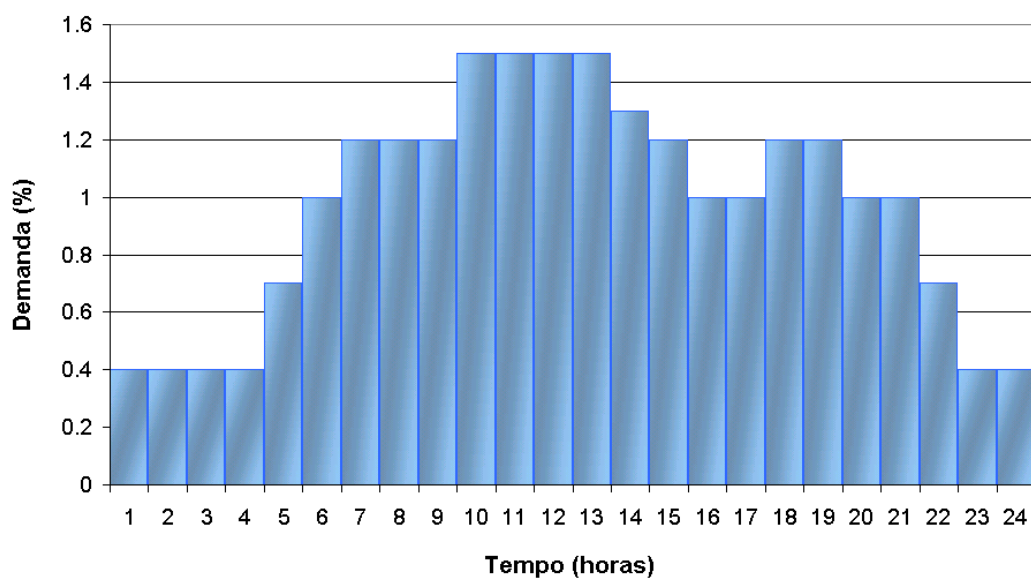


Figura 6.2 - Curvas das Demandas horárias

As curvas de Figura 6.3 representam a quantidade de água medida na saída dos reservatórios, incluindo, portanto, o consumo e as perdas na rede de distribuição.

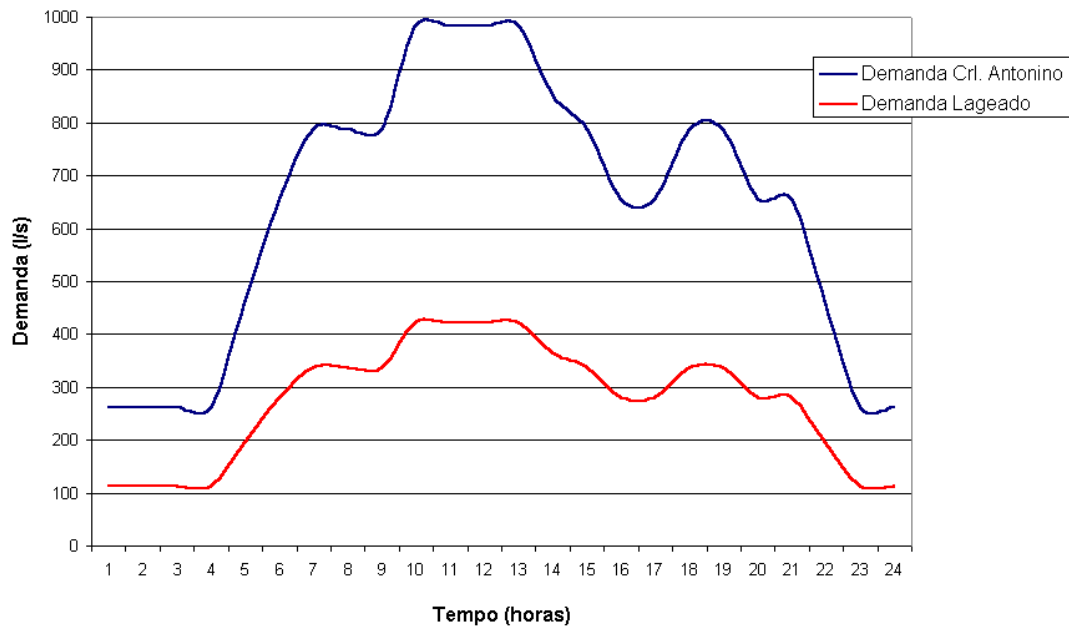


Figura 6.3 - Curvas das Demandas horárias por reservatório

## 6.2 Implementação do Modelo Computacional proposto

O modelo computacional proposto interliga um otimizador baseado em AEMO (*SPEA*) e um simulador hidráulico baseado no *EPANET2*, utilizando como compilador o *C++ Builder5*, tal como foi explicado no Capítulo 5 desta dissertação. O modelo será implementado e testado no estudo do caso do sistema adutor da ETA Guariroba.

### 6.2.1 Simulação Hidráulica

O modelo hidráulico simulado em *EPANET2* é apresentado na Figura 6.4 e o sistema mais detalhado de funcionamento do booster é ilustrado na Figura 6.5.

Cabe ressaltar que quando o booster está em operação, só pode alimentar um sistema por vez, é dizer, quando o booster recalca água para um bairro, o outro bairro é alimentado por gravidade. Razão pela qual ao realizar a modelagem, esse booster em particular, será analisado como se fosse duas bombas em série de iguais características e que não podem trabalhar simultaneamente.

Como todas as unidades do sistema são interligadas, considerou-se o atendimento da demanda máxima horária em cada área de influência dos reservatórios e os níveis mínimos

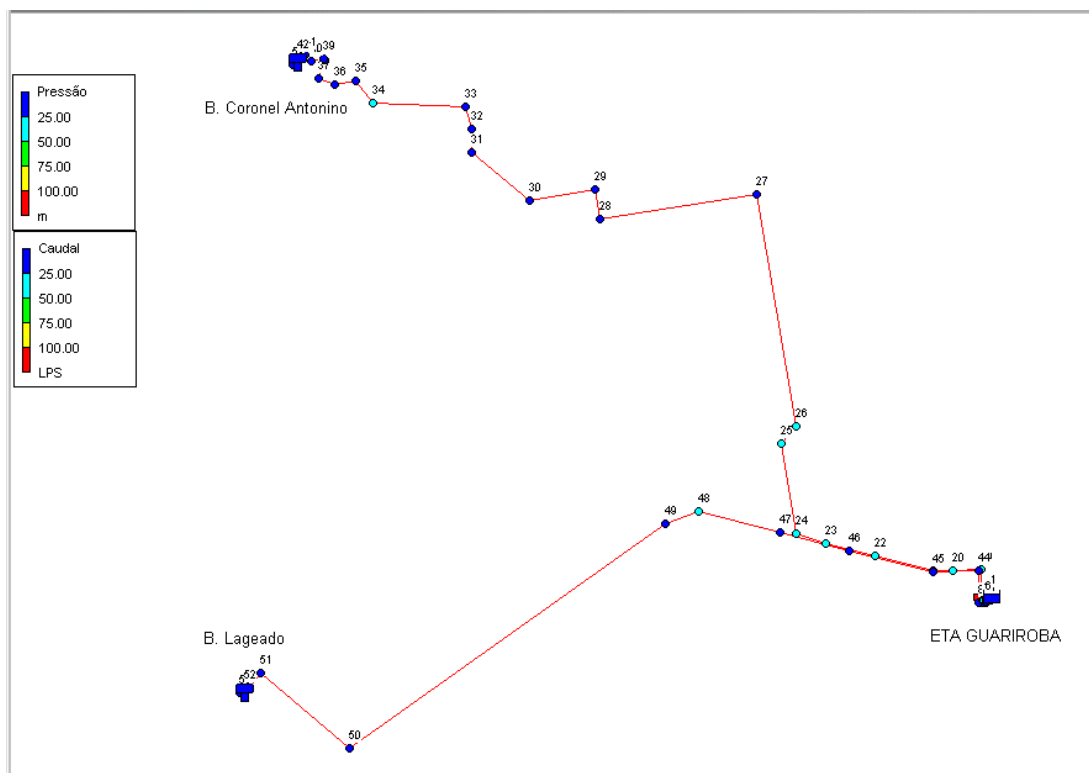


Figura 6.4 - Modelo Hidráulico em *EPANET2*

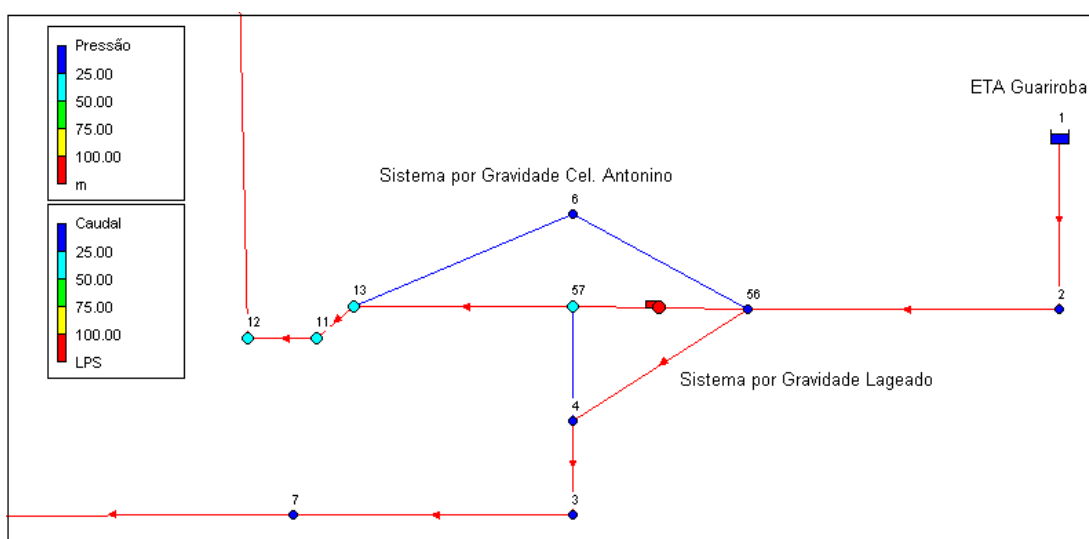


Figura 6.5 - Sistema de trabalho do booster em *EPANET2*

e máximos nos reservatórios para o estabelecimento de regras operacionais.

### 6.2.2 Otimização multiobjetivo

O *Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA)* será utilizado para a otimização multiobjetivo do sistema adutor. A continuação serão definidos os operadores genéticos.

#### Definição da dimensão da população e do critério de parada

Para a definição da dimensão da população e do critério de parada foram feitas várias simulações do modelo computacional utilizando 3 diferentes dimensões de populações iniciais e 3 diferentes números de gerações. Sendo necessário ressaltar que o número de gerações é o parâmetro adotado como critério de parada para o *SPEA*.

Na análise para obter a população inicial mais adequada foram feitas várias simulações com os parâmetros apresentados na Tabela 6.3. Nas simulações se manteve constante o número de gerações, entanto que foram avaliados 3 diferentes dimensões da populações (100, 300 e 500). As Frentes Pareto e as Frentes Pareto não dominadas obtidas nas simulações são apresentadas nas figuras 6.6 e 6.7.

Tabela 6.3 - Parâmetros para obter a população inicial

| Parâmetros                             | Valor          |
|----------------------------------------|----------------|
| Número de funções objetivos            | 2              |
| Objetivo 1 - Custos Energéticos        | Minimizar      |
| Objetivo 2 - Confiabilidade Hidráulica | Maximizar      |
| Tamanho da população para testar       | 100, 300 e 500 |
| Técnica de Seleção                     | Torneio        |
| Probabilidade de mutação               | 0.01           |
| Probabilidade de recombinação          | 0.9            |
| Número gerações                        | 1000           |
| Horizonte de trabalho                  | 24 horas       |

Analisando os resultados relativos para diferentes dimensões de populações, percebe-se que a simulação com dimensão de população de 500 apresenta as melhores Frentes Pareto e Frentes Pareto não dominadas quando comparadas às simulações com população de 100 e 300 e com um tempo computacional razoável.

Na análise para estabelecer o critério de parada, definido como o número de gerações mais adequado foram feitas várias simulações com os parâmetros apresentados na Tabela

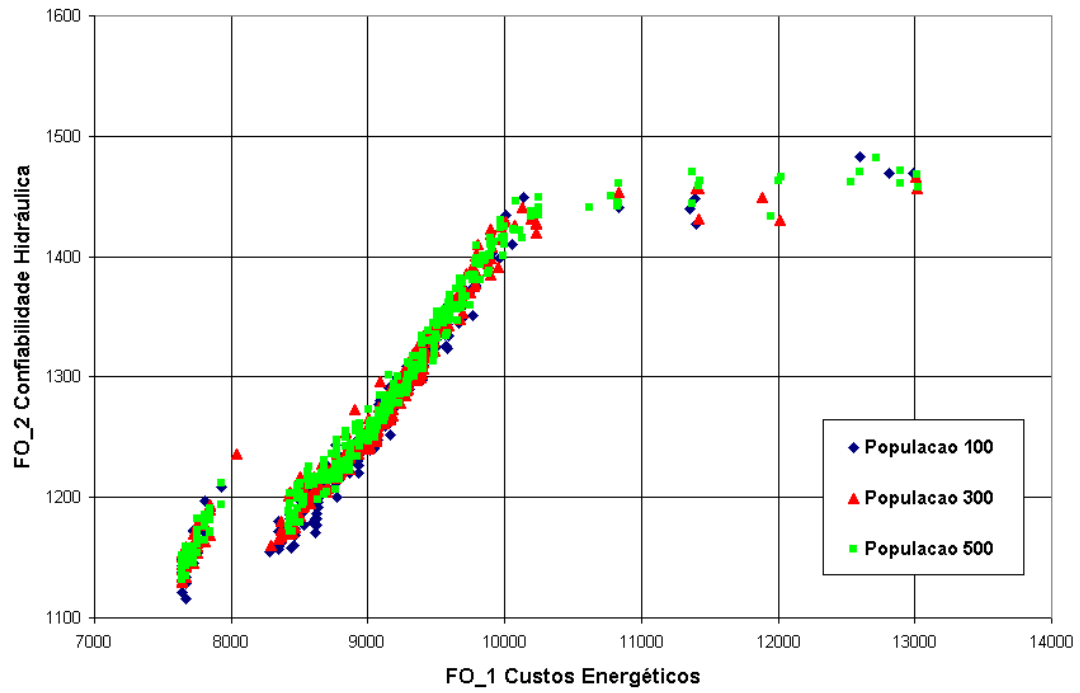


Figura 6.6 - Frentes Pareto para diferentes dimensões de populações

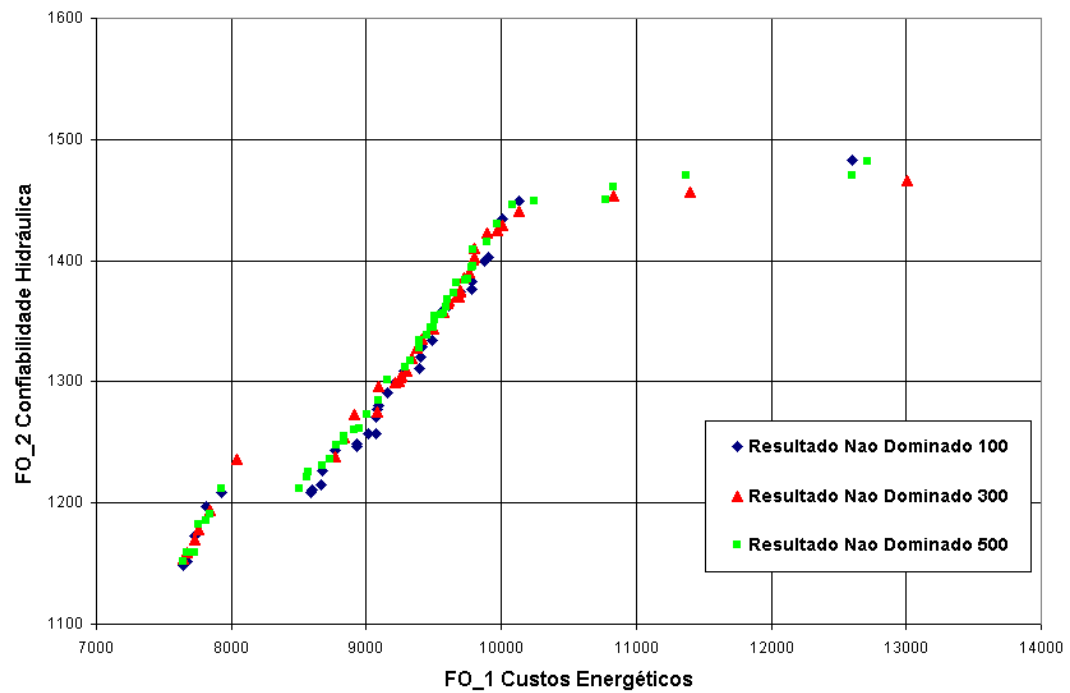


Figura 6.7 - Frentes Pareto não dominadas para diferentes dimensões de populações

6.4. Nas simulações se manteve constante a dimensão da população em 500 indivíduos, entanto que foram avaliados 3 diferentes números de gerações (500, 1000 e 1500). As Frentes Pareto e as Frente Pareto não dominadas obtidas nas simulações são apresentadas nas figuras 6.8 e 6.9.

Tabela 6.4 - Parâmetros para obter o número de gerações

| Parâmetros                             | Valor            |
|----------------------------------------|------------------|
| Número de funções objetivos            | 2                |
| Objetivo 1 - Custos Energéticos        | Minimizar        |
| Objetivo 2 - Confiabilidade Hidráulica | Maximizar        |
| Tamanho da população                   | 500              |
| Técnica de Seleção                     | Torneio          |
| Probabilidade de mutação               | 0.01             |
| Probabilidade de recombinação          | 0.9              |
| Número gerações para testar            | 500, 1000 e 1500 |
| Horizonte de trabalho                  | 24 horas         |

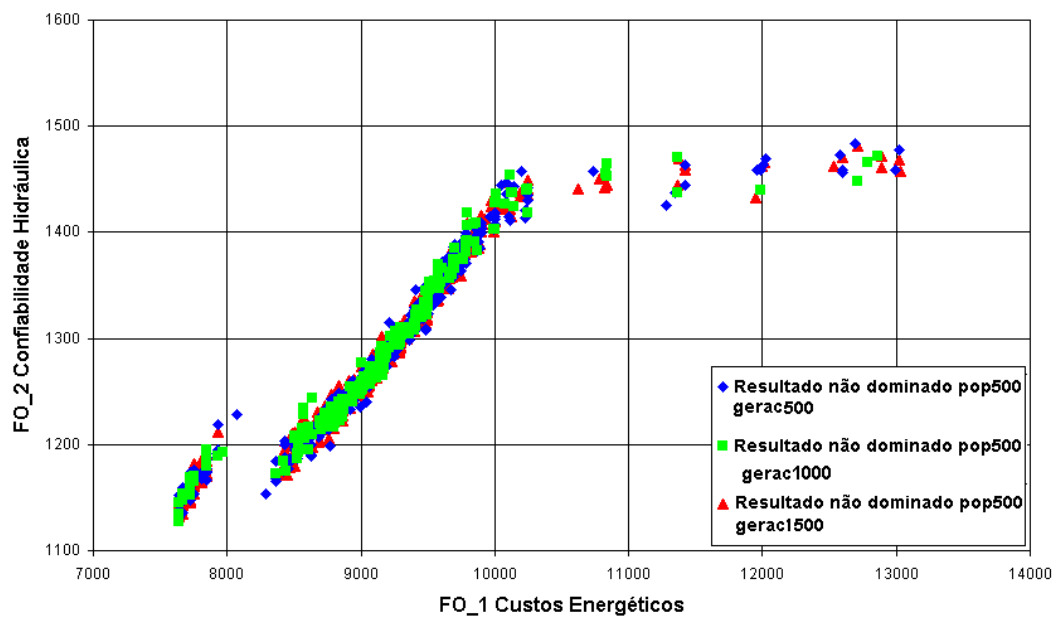


Figura 6.8 - Frentes Pareto para diferentes números de gerações

Analisando os resultados obtidos para o critério de parada do algoritmos, percebe-se que a simulação com número de gerações igual a 1000 apresenta as melhores Frentes Pareto e Frentes Pareto não dominadas quando comparadas às simulações 500 gerações e similares soluções, mas com um menor tempo computacional, quando comparadas ao modelo com 1500 gerações.

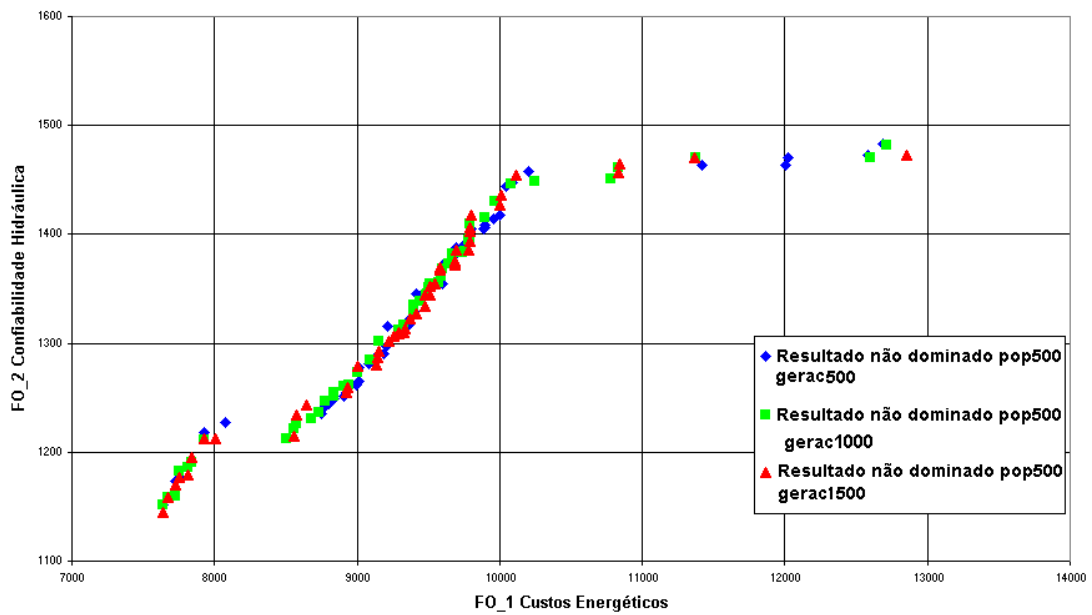


Figura 6.9 - Frentes Pareto não dominadas para diferentes números de gerações

### 6.2.3 Modelo Computacional

O modelo computacional foi implementado utilizando os parâmetros hidráulicos e computacionais para a simulação em *EPANET2* e a otimização multiobjetivo utilizando o *SPEA*.

A Tabela 6.5 apresenta os parâmetros utilizados no modelo de simulação hidráulica e na otimização *SPEA* proposto:

Tabela 6.5 - Parâmetros para otimização

| Parâmetros                             | Valor     |
|----------------------------------------|-----------|
| Número de funções objetivos            | 2         |
| Objetivo 1 - Custos Energéticos        | Minimizar |
| Objetivo 2 - Confiabilidade Hidráulica | Maximizar |
| Número de reservatórios                | 2         |
| Níveis iniciais nos reservatórios      | Máximos   |
| Níveis mínimos nos reservatórios       | 1.5 m     |
| Tamanho da população                   | 500       |
| Técnica de Seleção                     | Torneio   |
| Probabilidade de mutação               | 0.01      |
| Probabilidade de recombinação          | 0.9       |
| Número gerações                        | 1000      |
| Horizonte de trabalho                  | 24 horas  |

## 6.3 Resultados experimentais e Análises

Com o objetivo de avaliar a metodologia proposta neste trabalho para obter planos ótimos de operação para as bombas com custos mínimos de energia e alta confiabilidade hidráulica em um horizonte de 24 horas, foram analisados três situações diferentes.

A primeira, a situação atual do sistema, trabalhando na THS Verde; a segunda, mudando o enquadramento tarifário do sistema para a THS Azul; e a última situação mantendo o sistema original mas simulando a correção do fator de potencia mediante a instalação de um banco de capacitores.

O problema de bombeamento no sistema adutor será considerado como se duas bombas estivessem trabalhando em série, a bomba *B1* para abastecer ao Bairro Coronel Antonino e a bomba *B2* para o Bairro Lageado, as mesmas que só podem ser ligadas ou desligadas ao início de cada hora, e as capacidades de bombeamento são consideradas constantes durante os intervalos de tempo.

Ao conjunto de soluções Pareto obtidos durante a diferentes simulações do modelo proposto foi aplicado um programa computacional que identifica as soluções não dominadas, o qual calcula métricas de performance em relação ao cobertura da Frente Pareto e em relação a diversidade da Frente Pareto, obtendo as melhores soluções de cada Frente Pareto.

O modelo estudado trabalha em regime dinâmico e foi previamente calibrado. Os parâmetros para a simulação hidráulica e pelo *SPEA*, avaliados no item anterior, são os apresentados na Tabela 6.5 e serão utilizados em todos os cenários avaliados.

### 6.3.1 Análise Energético e Hidráulico do sistema adutor original

O Sistema adutor que se encontra atualmente trabalhando foi descrito no item 6.1.1. Os parâmetros utilizados para a avaliação dos custos energéticos neste cenário, são apresentados na Tabela 6.6.

Aplicando a metodologia proposta, com os dados fornecidos pelas Tabelas 6.5 e 6.6, foram gerados o conjunto de soluções das Frentes Paretos mostrada na Figura 6.10. A figura apresenta 364 soluções factíveis.

Aplicando o programa para selecionar o conjunto de soluções não dominadas, se

Tabela 6.6 - Parâmetros para avaliação energética do sistema original

| <b>Parâmetros</b>                 | <b>Valor</b>   |
|-----------------------------------|----------------|
| Grupo de consumidor               | A4             |
| Tarifa Horo-sazonal               | Verde          |
| Início da Hora Ponta              | 18:00          |
| Fim da Hora Ponta                 | 21:00          |
| Demanda Contratada                | 500 kW         |
| Potência da motor elétrico        | 550 CV         |
| Tensão Nominal                    | 440 V          |
| Corrente Nominal                  | 720 A          |
| Rendimento motor elétrico         | 78%            |
| Rendimento da bomba               | 86%            |
| Fator de potência medido (fp)     | 0.86           |
| Fator de potência referencia (fr) | 0.92           |
| Custo do consumo energia na hp    | 10 x TC na hfp |
| Custo da Demanda na hp            | 1 x TD na hfp  |
| Custo da Ultrapassagem na hp      | 3 x TD na hfp  |

obtem 49 soluções ótimas, as que são ilustradas na Figura 6.11, essas soluções representam as melhores estratégias operacionais para o sistema adutor estudado. No entanto, o presente trabalho tem como objetivo fornecer um conjunto menor de regras operacionais para reduzir a operação baseada só na experiência do operador.

Para escolher algumas soluções factíveis, serão avaliados o números de mudanças no estado de funcionamento das bombas (liga/desliga), pois as excessivas mudanças reduz a vida útil do equipamento. LANSEY e AWUMAH (1994) propõe o conceito de número de ligações como uma forma alternativa de medir o custo da manutenção das bombas. Esse conceito é apoiado na hipótese que o tempo de vida útil de uma bomba pode ser medido de forma indireta a partir do número de vezes que a bomba é ligada.

Aplicando esse conceito, serão escolhidos a partir da Figura 6.11 e dos dados obtidos as estratégias operacionais mais favoráveis, com custos energéticos mínimos, alta confiabilidade hidráulica e mínimo número de ligações quando comparados as outras soluções. As melhores soluções são apresentadas na Figura 6.12

Os valores das melhores soluções achadas são apresentados na Figura 6.13 e os planos ótimos de programação de funcionamento do booster são apresentados na Figura 6.14. A análise realizada mostra que o booster deve ser utilizado só para abastecer o Sistema Coronel Antonino, pois para o Sistema Lageado não é necessário a utilização do booster, pois o abastecimento por gravidade é suficiente para cobrir as demandas, evitando assim

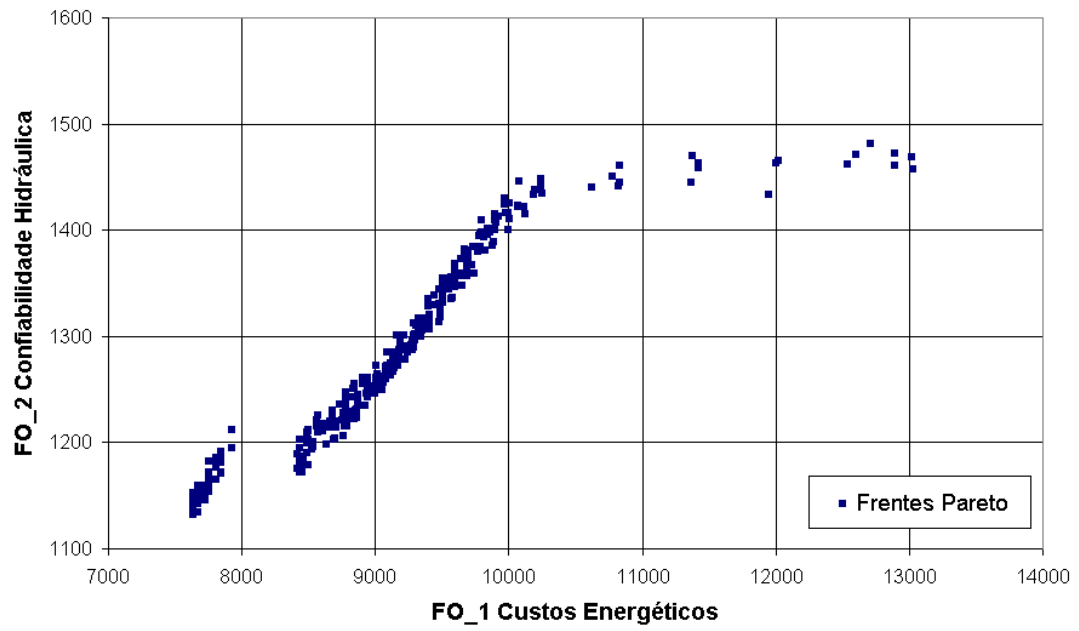


Figura 6.10 - Frentes Pareto para o sistema original em THS Verde

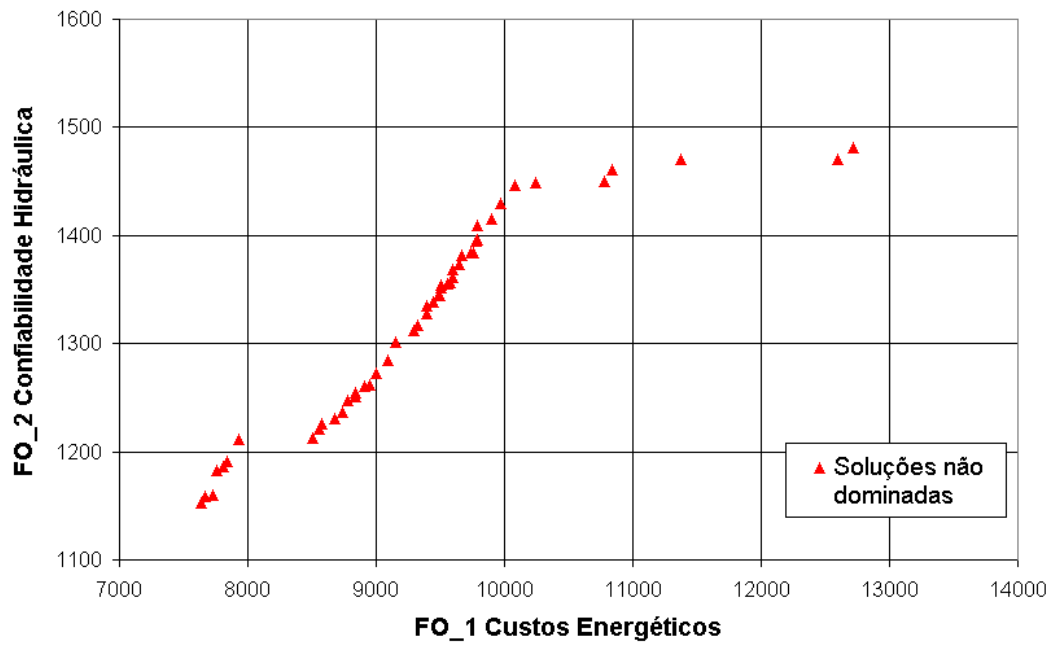


Figura 6.11 - Frentes Pareto não dominadas para o sistema original

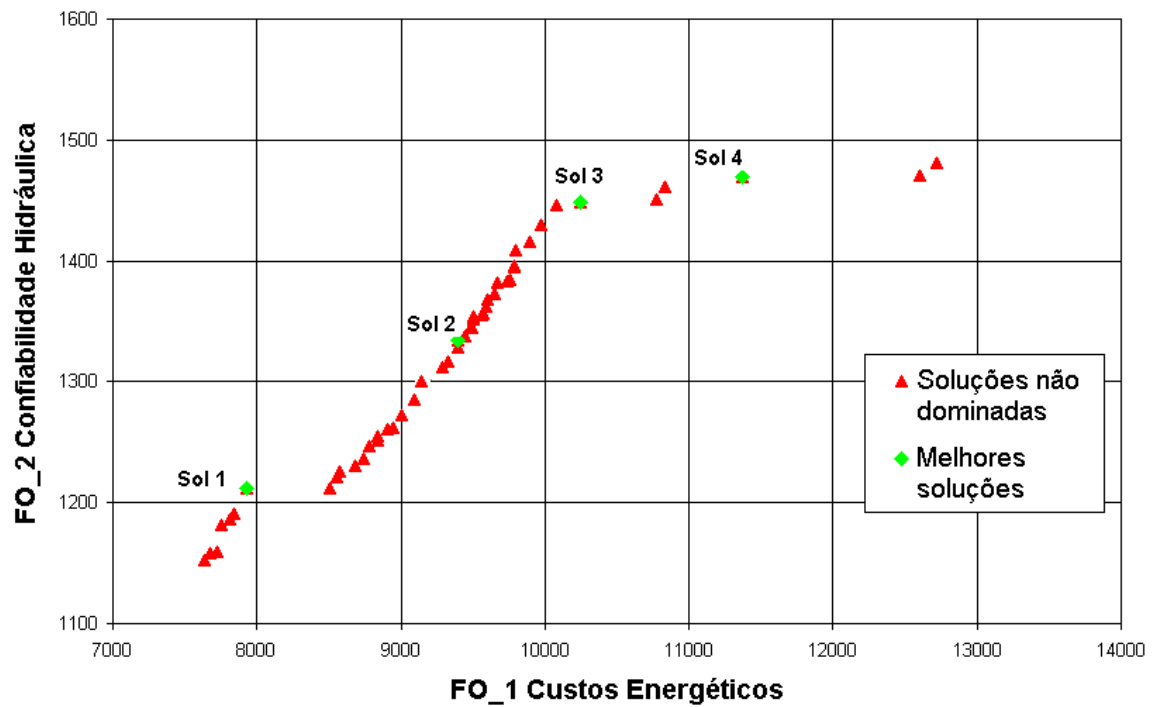


Figura 6.12 - Frente Pareto não dominadas e melhores soluções

custos energéticos.

| Hora      | 1  |    | 2  |    | 3  |    | ... | 22 |    | 23 |    | 24 |    | FO_1    | FO_2    |
|-----------|----|----|----|----|----|----|-----|----|----|----|----|----|----|---------|---------|
| Bomba     | B1 | B2 | B1 | B2 | B1 | B2 | ... | B1 | B2 | B1 | B2 | B1 | B2 |         |         |
| Solução 1 | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | ... | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 7927.39 | 1211.6  |
| Solução 2 | 1  | 0  | 1  | 0  | 1  | 0  | ... | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 9397.38 | 1334.65 |
| Solução 3 | 1  | 0  | 1  | 0  | 1  | 0  | ... | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 10244.9 | 1448.66 |
| Solução 4 | 1  | 0  | 1  | 0  | 1  | 0  | ... | 1  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 11373.1 | 1469.91 |

Figura 6.13 - Melhores soluções para o sistema original

### 6.3.2 Análise Energético e Hidráulico do sistema adutor mudando de tarifa

O sistema adutor original atualmente está enquadrado na THS Verde, assim, com o fim de avaliar uma estratégia para reduzir custos com energia elétrica, será simulado o sistema atual trabalhando em THS Azul, para analisar os benefícios de uma mudança tarifária. Os parâmetros utilizados para a avaliação dos custos energéticos neste cenário de Tarifa Horo-sazonal Azul, são apresentados na Tabela 6.7.

Aplicando a metodologia proposta e simulando o modelo computacional com os

| Hora   | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | CE      | CH     |
|--------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---------|--------|
| Sol. 1 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 7927.39 | 1211.6 |
| Sol. 2 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 9397.38 | 1334.7 |
| Sol. 3 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 10244.9 | 1448.7 |
| Sol. 4 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 11373.1 | 1469.9 |

Figura 6.14 - Planos ótimos de programação do booster

Tabela 6.7 - Parâmetros para avaliação energética com THS Azul

| Parâmetros                        | Valor         |
|-----------------------------------|---------------|
| Grupo de consumidor               | A4            |
| Tarifa Horo-sazonal               | Azul          |
| Início da Hora Ponta              | 18:00         |
| Fim da Hora Ponta                 | 21:00         |
| Demanda Contratada                | 500 kW        |
| Potência da motor elétrico        | 550 CV        |
| Tensão Nominal                    | 440 V         |
| Corrente Nominal                  | 720 A         |
| Rendimento motor elétrico         | 78%           |
| Rendimento da bomba               | 86%           |
| Fator de potência medido (fp)     | 0.86          |
| Fator de potência referencia (fr) | 0.92          |
| Custo do consumo energia na hp    | 2 x TC na hfp |
| Custo da Demanda na hp            | 3 x TD na hfp |
| Custo da Ultrapassagem na hp      | 9 x TD na hfp |

dados fornecidos pelas Tabelas 6.5 e 6.7, foram gerados o conjunto de soluções das Frentes Paretos mostrada na Figura 6.15.

Depois de aplicar o programa para selecionar o conjunto de soluções não dominadas, se obtém as soluções ótimas, as que são ilustradas na Figura 6.16, essas soluções representam as melhores estratégias operacionais para o o enquadramento da THS Azul.

Na Figura 6.17 são comparados as soluções não dominadas do sistema original que está enquadrado na THS Verde e as soluções não dominadas obtidas para THS Azul. Pode-se notar que os custos energéticos obtidos para aa THS Azul são mais altos quando comparados com os custos da THS Verde, para quase os mesmos valores de confiabilidade hidráulica. Assim fica demonstrado que uma mudança tarifária seria prejudicial para a empresa de saneamento, pois elevaria os custos sem obter nenhum benefício hidráulico adicional nem de aumento da produção de água.

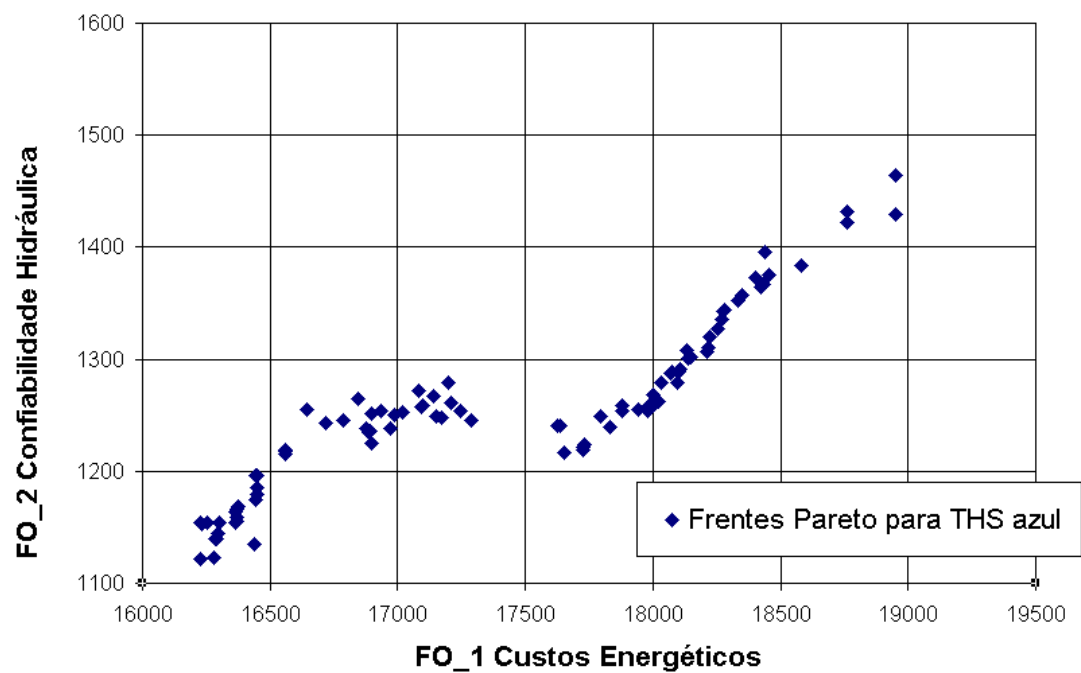


Figura 6.15 - Frentes Pareto para o sistema adutor em THS Azul

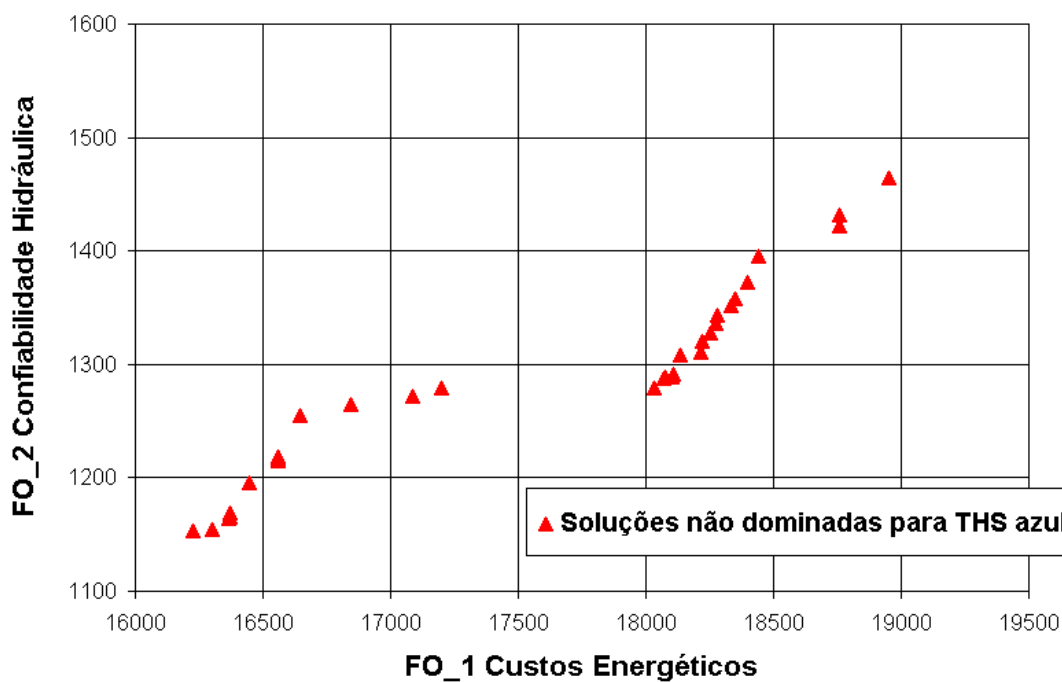


Figura 6.16 - Frentes Pareto não dominadas para THS Azul

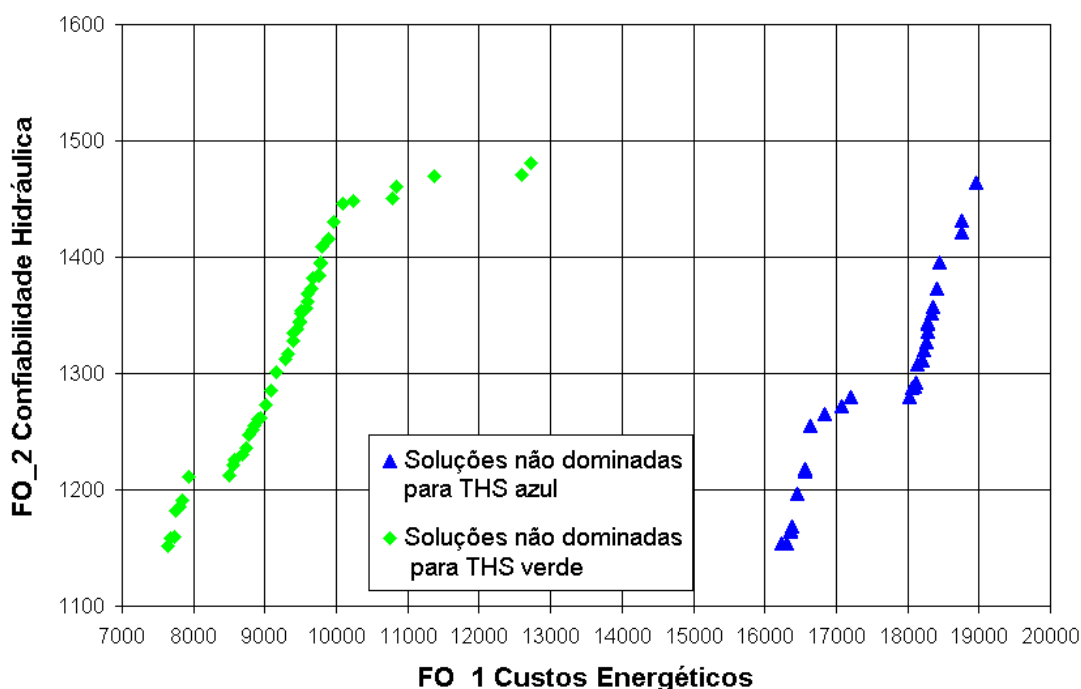


Figura 6.17 - Frentes Pareto não dominadas para THS Azul Vs. THS Verde

### 6.3.3 Análise Energético e Hidráulico do sistema adutor original mediante a correção do fp

Avaliando o sistema adutor original pode-se ressaltar o baixo fator de potência  $fp=0.86$ , sendo que o fator de potência de referência segundo a ANEEL N° 456 é 0,92, e por conseguinte se tem um alto consumo de energia reativa o que torna mais caro os custos energéticos.

O cenário proposto será a simulação do sistema original mas com a implementação de um banco de capacitores para corrigir o fator de potência de 0.86 a 0.92, podendo avaliar assim a variação com os custos de energia elétrica. Os bancos de capacitores atuam como geradores de corrente reativa e podem suprir as instalações elétricas com energia reativa contínua com o fim de manter o fator de potência em índices predeterminados e adequados, mesmo nas mais variadas oscilações de carga.

A Tabela 6.8 apresenta os parâmetros utilizados para a avaliação dos custos energéticos simulando a implementação de um banco de capacitores no sistema.

Aplicando o modelo computacional proposto e com os dados fornecidos pelas Tabelas 6.5 e 6.8, foram gerados o conjunto de soluções das Frentes Paretos mostrada na Figura

Tabela 6.8 - Parâmetros para avaliação energética de correção de fp

| <b>Parâmetros</b>                 | <b>Valor</b>   |
|-----------------------------------|----------------|
| Grupo de consumidor               | A4             |
| Tarifa Horo-sazonal               | Verde          |
| Início da Hora Ponta              | 18:00          |
| Fim da Hora Ponta                 | 21:00          |
| Demanda Contratada                | 500 kW         |
| Potência da motor elétrico        | 550 CV         |
| Tensão Nominal                    | 440 V          |
| Corrente Nominal                  | 720 A          |
| Rendimento motor elétrico         | 78%            |
| Rendimento da bomba               | 86%            |
| Fator de potência medido (fp)     | 0.92           |
| Fator de potência referencia (fr) | 0.92           |
| Custo do consumo energia na hp    | 10 x TC na hfp |
| Custo da Demanda na hp            | 1 x TD na hfp  |
| Custo da Ultrapassagem na hp      | 3 x TD na hfp  |

6.18.

O programa para selecionar o conjunto de soluções não dominadas foi aplicado, e se obteve as soluções ótimas, as que são ilustradas na Figura 6.19, essas soluções representam as melhores estratégias operacionais para o avaliar a correção do fator de potência no sistema original.

A Figura 6.20 apresenta as soluções não dominadas do sistema original que está enquadrado na THS Verde e as soluções não dominadas obtidas para o sistema original com o fator de potência corrigido. Pode-se notar que os custos energéticos com o  $fp=0.92$  são mais baratos que os do sistema original atual, observando-se também que a diminuição dos custos não influenciou na confiabilidade hidráulica no sistema, que continua com mesmos valores. Assim, que neste caso a implementação de um banco de capacitores para melhorar o fp seria benéfico para a empresa, pois teria uma redução nos custos energéticos e uma melhora no sistema elétrico.

As Frentes Pareto não dominadas de cada situação estudada do sistema adutor, são ilustradas na Figura 6.21. Pode-se observar del gráfico que a opção da THS verde com fp corrigido apresenta custos energéticos menores e confiabilidade hidráulica similar quando comparados com o sistema atual e o sistema em THS azul. Portanto, a empresa deve avaliar essa possibilidade na hora de implementação de programas de efficientização energética.

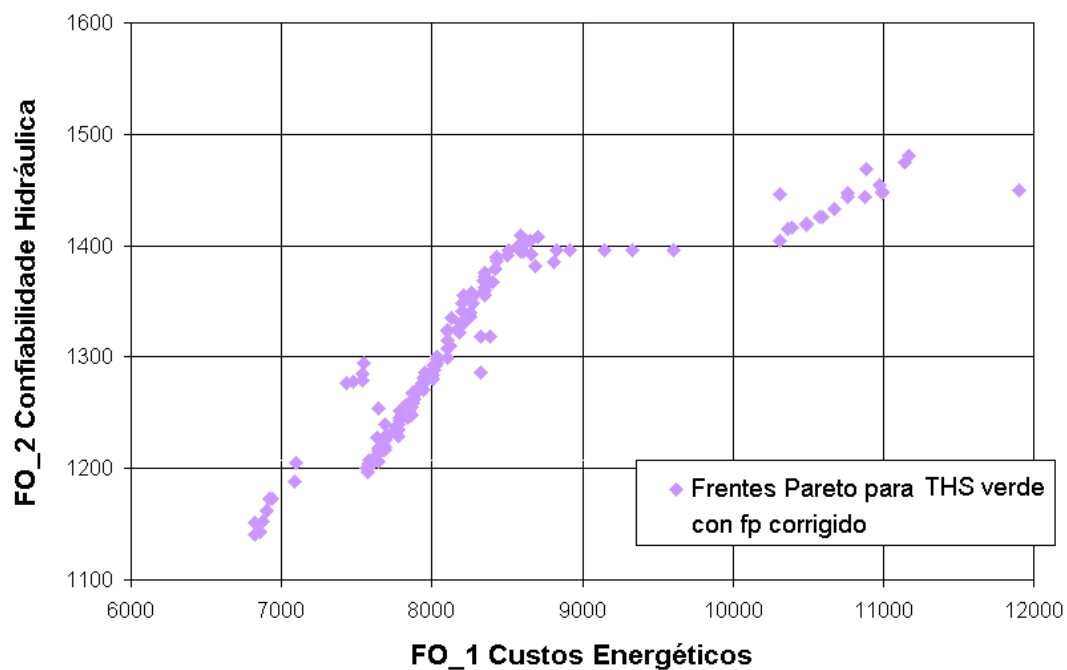


Figura 6.18 - Frentes Pareto para o sistema adutor com correção do fp

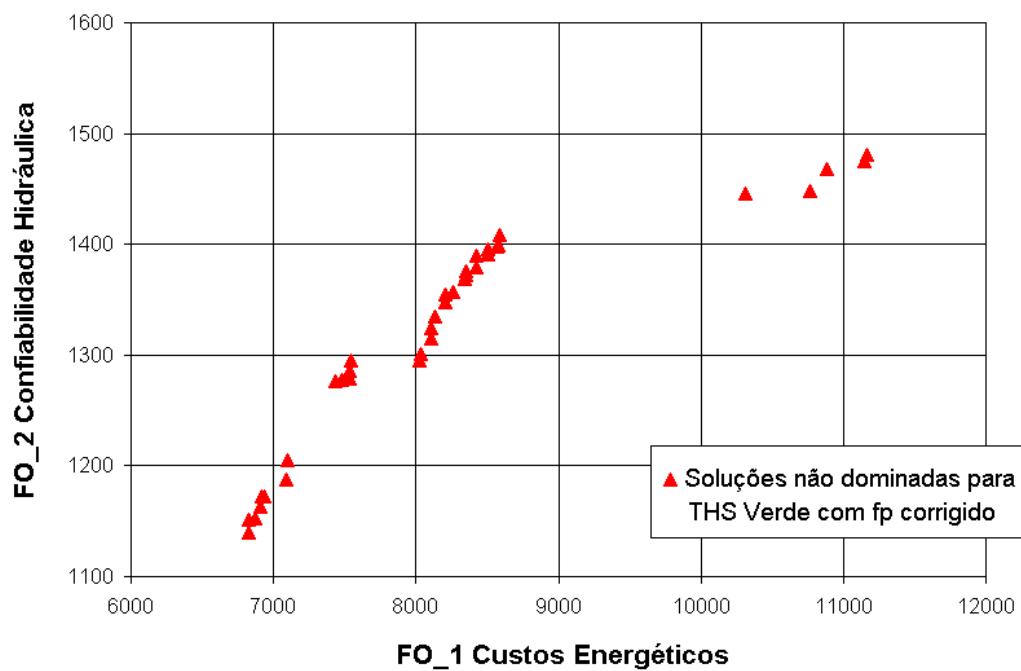


Figura 6.19 - Frentes Pareto não dominadas para o sistema com correção do fp

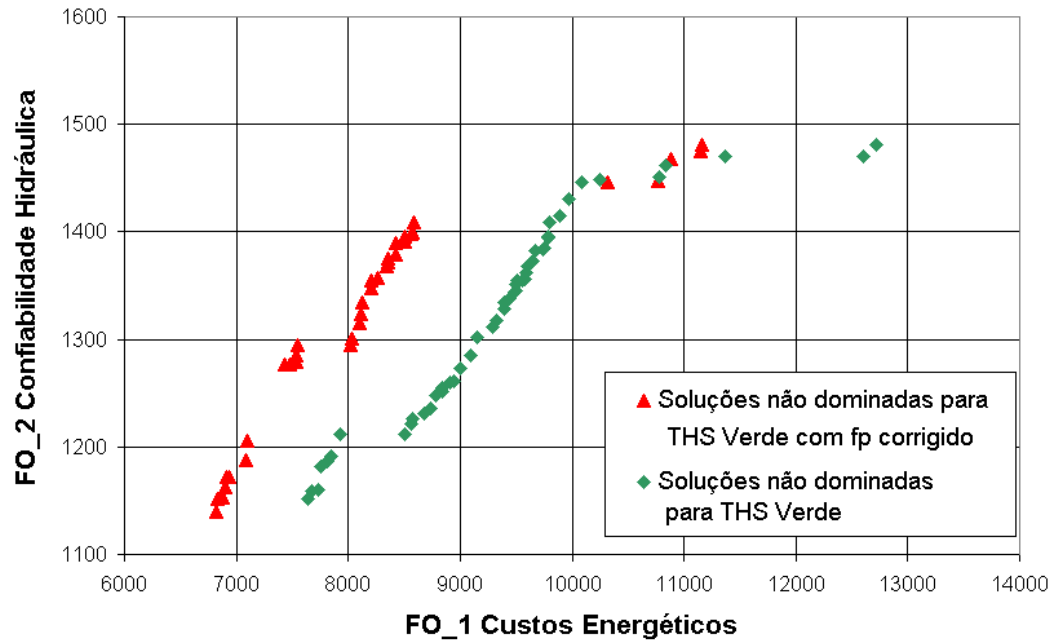


Figura 6.20 - Frentes Pareto não dominadas com correção do fp Vs. THS Verde

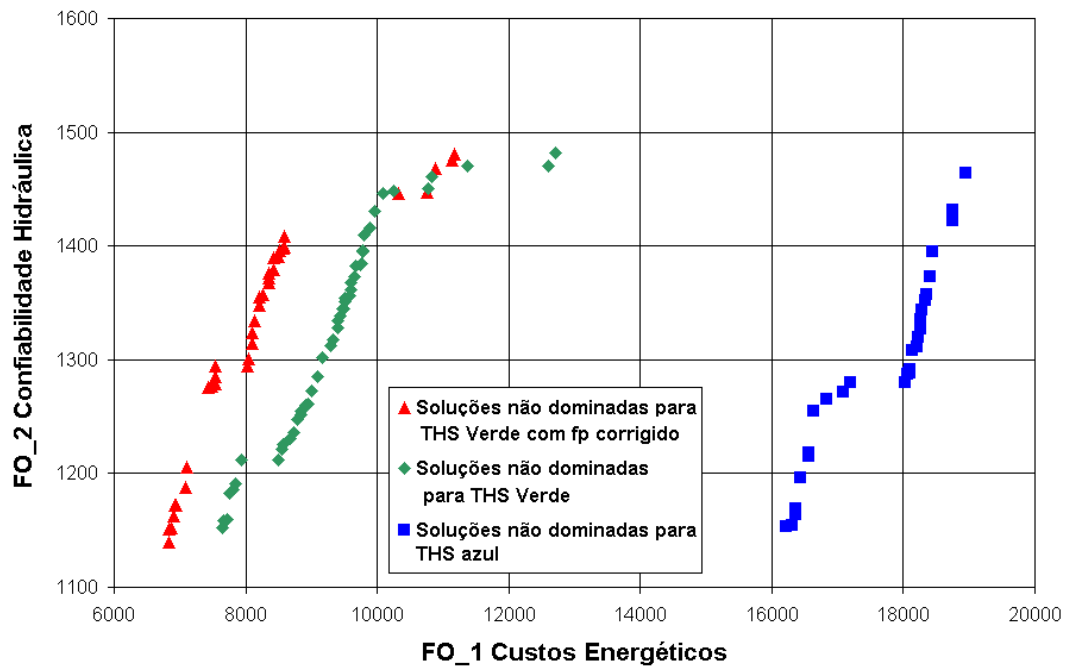


Figura 6.21 - Comparação das Frentes Pareto não dominadas das situações estudadas: THS Verde, THS Azul e THS verde com fp corrigido

# 7 Conclusões e Recomendações

## 7.1 Conclusões

O modelo computacional proposto nesta dissertação se apresenta como uma poderosa ferramenta para ser utilizado na solução do problema da otimização energética da programação operacional de sistemas de bombeamento de água. O modelo também se mostra como um novo caminho para a avaliação de projetos de efficientização de água e energia.

Os primeiros estudos realizados neste trabalho objetivaram o acoplamento do simulador hidráulico (*EPANET 2*) ao compilador *Borland Builder C++ 5.0*. Esse acoplamento foi realizado através da *Toolkit*, biblioteca de funções, que possibilita que as rotinas do (*EPANET 2*) possam ser chamadas através do compilador *C++*. O outro estudo realizado teve como objetivo desenvolver o acoplamento entre o módulo de otimização multiobjetivo e o simulador hidráulico (*EPANET 2*). A integração entre o módulo de otimização e o simulador hidráulico só foi possível porque ambos os pacotes foram escritos em linguagens compatíveis.

Segundo reporta a literatura o *SPEA* foi identificado como o método mais eficiente para o problema de otimização operacional de sistemas de abastecimento de água. Para encontrar os parâmetros genéticos mais adequados para a simulação do modelo foram realizadas análises comparativas. Assim, foram testados 3 diferentes valores para avaliar a dimensão da população e 3 para o número de gerações, sendo os valores achados de 500 e 1000 respectivamente, os quais apresentaram as melhores Frentes Pareto e bom tempo computacional ao ser comparado com os outros valores testados.

O conjunto de soluções das Frentes Pareto apresentadas pela otimização multiobjetivo comprovaram os conflitos existentes entre as duas funções objetivos estudadas (custos

energéticos e confiabilidade hidráulica). Depois de identificadas as soluções não dominadas da Frente Pareto, a complexidade do problema torna-se escolher a melhor solução dentre o conjunto de boas soluções achadas. Assim, neste trabalho, para escolher algumas soluções factíveis considerou-se o número mínimo de mudanças no estado de funcionamento das bombas (liga/desliga), pois as excessivas mudanças reduz a vida útil do equipamento. Esse conceito mostrou-se ser adequado ao problema pois os custos de manutenção das bombas pode ser tão importante, e inclusive maior, que o custo da energia elétrica, e ao minimizar o número de ligações se está prolongado o tempo de vida útil do conjunto motor-bomba.

Depois de identificado o método de otimização mais apropriado, os parâmetros genéticos e o simulador hidráulico mais realístico, a metodologia proposta foi aplicada a um sistema de abastecimento real. O sistema estudado foi um modelo simplificado de um sistema adutor da cidade de Campo Grande - MS. Neste sistema, foram avaliados tres cenários diferentes, no primeiro foi avaliado o cenário atual de funcionamento do sistema adutor e depois, duas estratégias para redução do custo de energia, as quais foram: mudança tarifário e correção do fator de potência. Ao ser simulados os diversos cenários de trabalho do sistema adutor a partir do sistema original, pode-se avaliar as vantagens e desvantagens de cada cenário e escolher a melhor alternativa para o sistema.

O caso estudado foi avaliado considerando a estrutura elétrica tarifária e a legislação vigente no Brasil, o qual é extremamente importante ao considerar os custos do fornecimento elétrico quando se definem as regras operacionais do sistema.

Depois de aplicar a metodologia proposta no sistema adutor original, primeira situação, conseguiu-se planos ótimos de programação para o funcionamento das bombas, com diminuição no consumo de energia elétrica, quando comparado com as faturas anteriores e alta confiabilidade hidráulica para o atendimento das demandas. O booster estudado passou a trabalhar um maior tempo em regime contínuo, reduzindo o número de ligações, e por tanto diminuindo os picos da corrente de partida, alongando a vida útil do sistema e evitando um desgaste prematuro do equipamento.

No segundo cenário, foi simulado uma mudança tarifária, e ao ser comparados os custos energéticos do sistema original em THS verde com a THS azul, obtém-se valores mais caros, pelo que é recomendável que o contrato com a concessionária elétrica continue em tarifa verde. A simulação da mudança de tarifa permite conhecer de maneira rápida se

é conveniente para a empresa estudar um reenquadramento tarifário quando comparado com os custos energéticos atuais.

No terceiro cenário, foi simulado a instalação de um banco de capacitores para reduzir o consumo de energia e potência reativa, e atingir o fator de potencia referencial  $\text{fr}=0.92$ , serve para avaliar a factibilidade da instalação deste dispositivo quando comparado aos custos energéticos atuais. A manutenção do  $\text{fp}$  igual ou acima do estabelecido pela legislação traz várias vantagens para o sistema elétrico, tais como: melhoria no nível de tensão; redução nas contas de energia elétrica, aumento na capacidade elétrica do sistema; diminuição de perdas físicas etc.

Desenvolver uma ferramenta útil para estabelecer regras de operacionais, com a utilização de qualquer modelo a priori, é sempre melhor do que uma operação baseada apenas na experiência dos operadores.

As possibilidades de conservação dos recursos, tanto água quanto energia, são significativas, além de economicamente viáveis, promovem o uso racional de recursos tão escassos atualmente. A implementação de programas de eficiência energética em sistemas de abastecimento de água tem grandes benefícios, tais como, a postergação de grandes investimentos na expansão do sistema elétrico, a redução dos gastos operacionais, a redução dos danos causados ao meio ambiente, entre outros.

## 7.2 Recomendações

Recomenda-se para trabalhos futuros:

- Utilizar o modelo computacional proposto em um sistema adutor composto de um número maior de bombas e de reservatórios.
- Analisar os custos energéticos em um horizonte de 30 dias para ser mais parecido com os valores reais das faturas pagas pelas empresas de saneamento.
- Inserir no modelo os custos de ciclo de vida do conjunto motor-bomba, assim como o desgaste proveniente do número de ligações e a confiabilidade mecânica do sistema.
- Avaliar diferentes estratégias para redução do custo de energia em SAA tais como: aumento no rendimento do conjunto motor-bomba e utilização de inversores de frequência.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução N° 456. Dispõe sobre as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica.** Brasília: Diário Oficial da União, 20.nov.2000.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Manual para a Elaboração do Programa de Eficiência Energética - Ciclo 2005/2006.** Disponível em: <[www.aneel.gov.br/cedoc/ren2005176manual.pdf](http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2005176manual.pdf)>, Acesso em: 19 abril 2005.
- BAHIA, S. R. **Eficiência Energética nos Sistemas de Saneamento.** Rio de Janeiro: IBAM, PROCEL/ELETROBRÁS, 1998.
- BARÁN, B.; VONLÜCKEN, C.; SOTELO, A. **Multi-objective pump scheduling optimisation using evolutionary strategies.** *Advances in Engineering Software*, v. 36, p. 39–47, 2005.
- BORGES, V. M. **Acoplamento de um modelo de previsão de demanda de água a um modelo simulador em tempo real, um estudo de caso: Sistema Adutor Metropolitano de São Paulo.** 206 p. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.
- BOULOS, P.; WU, Z.; ORR, C.; MOORE, M.; HSIUNG, P.; THOMAS, D. **Optimal Pump Operation of Water Distribution Systems using Genetic Algorithms.** In: *Proc. of AWWA DSS Conference.* Uberlândia - MG: <http://www.rbiconsulting.com/papers/genetic-algo.pdf>, 2001.
- BRASIL. **Lei N° 10.295. Dispõe sobre as Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia.** Brasília: Diário Oficial da União, 17.out.2001.

- BRION, L. M.; MAYS, L. W. **Methodology for Optimal Operation of Pumping Stations in Water Distribution Systems.** *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 117, n. 11, p. 1551–1569, 1991.
- CARRIJO, I. B. **Extração de regras operacionais ótimas de sistemas de distribuição de água através de algoritmos genéticos multiobjetivo e aprendizado de máquina.** Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2004.
- CARRIJO, I. B.; REIS, L. F. R.; SAVIC, D.; WALTERS, G. **Operational Optimization of Water Distribution Systems Based on Multiobjective Genetic Algorithms and Operational Extraction Rules Using Data Mining.** In: *World Water and Environmental Resources Congress*. Salt Lake City, USA: ASCE2004, 2004. p. 8.
- CHEUNG, P. B. **Análise de reabilitação de redes de distribuição de água para abastecimento via algoritmos genéticos multiobjetivo.** 268 p. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.
- COELLO, C. A. C. **An Empirical Study of Evolutionary Techniques for Multi-objective Optimization in Engineering Design.** 420 p. Tese (PhD Thesis) — Tulane University, USA, 1996.
- COMITÊ DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Tarifas horo-sazonais azul e verde: Manual de orientação ao consumidor.** Rio de Janeiro: CODI, 1994. 26 p.
- CORNE, D.; KNOWLES, J.; OATES, M. **The Pareto Envelope-Based Selection Algorithm for Multi-Objective Optimization.** In: *The Sixth International Conference on Parallel Problem Solving from Nature*. USA: PPSN-VI, 2000. p. 839–848.
- DARWIN, C. **El Origen de las Especies.** México: Editorial Planeta - De Agostini, 1992.
- DEB, K. **Multiobjective Using Evolutionary Algorithms.** Chichester, England: John Wiley and Sons Ltd, 2001.
- ELETROBRÁS; PROCEL; PROCEL SANEAR. **Plano de ação PROCEL SANEAR 2006/2007.** Rio de Janeiro, 2005.

- EUROPUMP; HYDRAULIC INSTITUTE. **Pump life cycle costs: a guide to LCC analysis for pumping systems**. New Jersey, USA: EXECUTIVE SUMMARY, 2001.
- FONSECA, C. M.; FLEMING, P. J. **Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization**. In: *Fifth International Conference on Genetic Algorithms*. California, USA: University of Illinois at Urbana, Morgan Kauffman Publishers, 1993. p. 416–423.
- FONSECA, C. M.; FLEMING, P. J. **An Overview of Evolutionary Algorithms in Multi-Objective optimization**. *Evolutionary Computation Journal*, v. 3, n. 1, p. 1–15, 1995.
- FRAGA, B. D.; GONZÁLEZ, E. F.; BRAVO, T. D. **Optimización**. Ciudad de La Habana - Cuba: Ed. ISPJAE, 1989. 453 p.
- GARGANO, R.; PIANESE, D. **Reliability as tool for Hydraulic Network Planning**. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 126, n. 5, p. 354–364, May 2000.
- GELLER, H. **O uso eficiente da eletricidade: Uma estratégia de desenvolvimento para o Brasil**. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Eficiência Energética, 1994.
- GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in search, optimization and machine learning**. Massachusetts: Addison Wesley Publishing Company, Reading, 1989.
- HADDAD, J.; MARTINS, A. R.; MARQUES, M. **Conservação da energia: eficiência energética de instalações e equipamentos**. Itajubá - MG: FUPAI, 2001.
- HORN, J.; NAFLIOTIS, N.; GOLDBERG, D. **A Niche Pareto Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization**. In: *Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation*. New Jersey: IEEE Service Center, 1994. v. 1, p. 82–87.
- INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. **A Eficiência Energética e o Novo Modelo do Setor Energético**. Rio de Janeiro: INEE, 2001.
- JAMES, K.; CAMPBELL, S. L.; GODLOVE, C. E. **Água e Energia: Aproveitando as oportunidades de eficientização de água e energia não exploradas nos sistemas municipais**. Washington D.C.: Alliance to Save Energy, 2002.

- JOWITT, P. W.; GERMANOPOULOS, G. **Optimal Pump Scheduling in Water Supply Networks**. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 118, n. 4, p. 416–422, 1992.
- KNOWLES, J. D.; CORNE, D. W. **Approximating the Non-Dominated Front using the Pareto Archived Evolution Strategy**. *Evolutionary Computation Journal*, v. 8, n. 2, p. 149–172, 2000.
- KO, S. K.; OH, M. H.; FONTANE, D. G. **Multiobjective Analysis of Service-Water Transmission Systems**. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 123, n. 2, p. 79–83, 1997.
- LACERDA, E. G.; CARVALHO, A. C. **Introdução aos algoritmos genéticos**. In: *Sistemas inteligentes: aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais*. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, 1999. cap. 3, p. 99–150.
- LANSEY, K. E.; AWUMAH, K. **Optimal Pump Operations Considering Pump Switches**. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 120, n. 1, p. 17–34, 1994.
- LANSEY, K. E.; MAYS, L. W. **Hydraulics of Water Distribution Systems**. In: *Water Distribution Systems Handbook*. New York: McGraw Hill, 2000.
- LEAL, L. A.; BARBOSA, P. S. **Programas de Eficientização Energética em sistemas de abastecimento de água**. In: *XVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*. Uberlândia, MG: Grupo XIV: Estudos de Conservação de Energia Elétrica, 2003. p. 6.
- LUVIZOTTO, E. J. **Controle Operacional de Redes de Abastecimento de Água Auxiliado por Computador**. 143 p. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1995.
- MACKLE, G.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. **Application of Genetic Algorithms to Pump Scheduling for Water Supply**. In: 95, G. (Ed.). *Conference Publication 4/4*. London, UK: Institute of Electrical Engineers, 1995. p. 400–405.

- MARQUES, T. P. **Apresentando o modelo life cycle cost (custo de propriedade) aplicado a sistemas de bombas.** *Revista Sanare*, v. 16, n. 16, p. 42–48, Julho a Dezembro 2001.
- MARTINS, V. A; PEREZ, A. M; BARDALES, K. N. et al. **Modelagem Computacional como ferramenta para estudos de eficiência energética no Saneamento.** In: *Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água*. João Pessoa, Paraíba: SEREA, 2006.
- MAYS, L. W. **Reliability Analysis of Water Distribution Systems.** New York: American Society of Civil Engineers, 1989. 510 p.
- MCCORMICK, G.; POWELL, R. S. **Optimal Pump Scheduling in Water Supply Systems with Maximum Demand Charges.** *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 129, n. 5, p. 372–379, 2003.
- MEDEIROS, S. de. **Medição de Energia Elétrica.** 4. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1997.
- MONACHESI, M. G. **Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento.** Rio de Janeiro: ELETROBRÁS/PROCEL, 2005.
- NITIVATTANANON, V.; SADOWAKI, E. C.; QUIMPO, R. G. **Optimization of Water Supply System Operation.** *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 122, n. 5, p. 374–384, 1996.
- ORMSBEE, L.; WALSKI, T.; CHASE, D. **Methodology for Improving Pump Operation Efficiency.** *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 115, n. 2, p. 148–164, 1989.
- ORMSBEE, L. E.; LANSEY, K. E. **Optimal Control of Water Supply Pumping Systems.** *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 120, n. 2, p. 237–252, 1994.
- PESSIS-PASTERNAK, G. **Do Caos à Inteligência Artificial.** São Paulo: Editora da Universidade Estadual Paulista, 1993.
- PEZESHK, S.; HELWEG, O. J. **Adaptive Search Optimization in Reducing Pump Operating Costs.** *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 122, n. 1, p. 57–63, 1996.

- PINHEIRO, M. G. et al. **O Programa PROCEL SANEAR-Eficiência Energética no Saneamento Ambiental: Porque água é energia.** In: *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*. Curitiba - Paraná: XVIII SNPTEE, 2005. Grupo XIV GCE-09, p. 7.
- PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Manual de tarifação da energia elétrica.** 1 ed. Brasília: ELETROBRÁS/PROCEL, 2001.
- ROSSMAN, L. A. **EPANET 2 Users Manual.** Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency, 2001.
- SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. **Evolving Sustainable Water Networks.** *Hydrological Sciences Journal*, v. 42, n. 4, p. 549–564, 1997.
- SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A.; SCHWAB, M. **Multiobjective Genetic Algorithms for Pump Scheduling in Water Supply.** United Kingdom, 1996.
- SCHAFFER, J. D. **Some Experiments in Machine Learning using Vector Evaluated Genetic Algorithms.** Tese (PhD Teses) — Vanderbilt University, Nashville, TN, 1984.
- SOUSA, J.; CUNHA, M. C.; MARQUES, A. S. **A Simulated Annealing Algorithm for the Optimal Operation of Water Distribution Networks.** In: *Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering*. Montreal, Canada: Computing in water Distribution Management, 2006. p. 3060–3069.
- SRINIVAS, N.; DEB, K. **Multiobjective Optimization using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms.** *Evolutionary Computation*, Massachusetts - Institute of Technology, v. 2, n. 3, p. 221–248, 1994.
- TODINI, E.; PILATI, S. **A gradient algorithm for the analysis of pipe networks.** In: *International Conference Of Computer Applications For Water Supply And Distribution*. Leicester, United Kingdom: Setembro, 1987.
- TSUTIYA, M. T. **Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água.** São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental - ABES, 2001.

- TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água**. 2da. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.
- VELDHUIZEN, D. A. V. **Multiobjective Evolutionary Algorithm: Classifications, Analyses and New Inovations**. 270 p. Tese (PhD Thesis) — Air Force Institute Technology, Wright-Patterson AFB, Ohio, 1999.
- WALSKI, T. **Tecniq ue for Calibration Network Models**. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 109, n. 4, p. 360–372, 1983.
- WALSKI, T. **Tips for Saving Energy in Pumping Operations**. *Journal AWWA Management and Operations*, p. 49–53, 1993.
- WALSKI, T. **The Wrong Paradigm: Why Water Distribution Optimization Doesn't Work**. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 122, n. 4, p. 203–205, 2001.
- WEG. **Catálogo geral de motores elétricos: características, especificação, instalação e manutenção**. Jaraguá do Sul, SC, 2004.
- ZAHED, K. F. **Previsão da Demanda de Consumo em Tempo Real no Desenvolvimento Operacional de Sistemas de Distribuição de água**. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1990.
- ZITZLER, E. **Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization: Methods and Applications**. Tese (PhD Thesis) — Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland, 1999.
- ZITZLER, E.; THIELE, L. **An Evolutionary Algorithm for Multiobjective Optimization: The Strength Pareto Approach**. Technical Report 43. Computer Engineering and Communication Networks Laboratory. Zürich, Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology, 1998.