

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

**UM MODELO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS
ADUTORES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA COM
VISTAS A MINIMIZAÇÃO DOS CUSTOS ENERGÉTICOS**

Laudelino de Araújo Pedrosa Filho

Tese de Doutorado

PROGRAMA INSTITUCIONAL DE DOUTORADO TEMÁTICO EM
RECURSOS NATURAIS

Campina Grande - Paraíba
2006

**UM MODELO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS
ADUTORES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA COM
VISTAS A MINIMIZAÇÃO DOS CUSTOS ENERGÉTICOS**

Laudelino de Araújo Pedrosa Filho

Tese apresentada ao Programa Institucional de
Doutorado Temático – Doutorado em Recursos
Naturais da Universidade Federal de Campina
Grande para obtenção do grau de Doutor.

Orientador:

Prof. Dr. Heber Pimentel Gomes

Campina Grande - Paraíba
2006

As mulheres da minha vida:
Sára, mulher que amo, por ter tornado minha vida mais feliz.
Laura, Laís e Ana Luiza por tornarem nossas vidas mais alegres.
Minha dívida com vocês é inesgotável.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pelo projeto divino, onde cada etapa aconteceu no momento exato, como somente Ele o faria.

Ao professor Heber Pimentel Gomes da UFPB, pelo voto de confiança em mim depositado e pelo permanente incentivo na orientação e desenvolvimento do trabalho.

Ao professor Pedro Iglesias Rey da UPV - Espanha, que mesmo geograficamente distante, serviu de ícone de sabedoria para que o trabalho seguisse o melhor caminho. Sua competência e contribuição emprestada ao trabalho, nas horas mais difíceis, serão sempre reconhecidas e lembradas. Um agradecimento muito especial.

Ao professor Carlos Galvão da UFCG, pelos conhecimentos transmitidos durante o curso e pela prestimosa colaboração na escolha do tema da pesquisa.

A Companhia de Água e Esgotos da Paraíba - CAGEPA e ao seu corpo técnico pelo valioso apoio ao trabalho.

Aos meus pais Laudelino e Ana Pedrosa (*in memoriam*), de raízes humildes, símbolos de luta, persistência e busca dos ideais.

A minha esposa Sára de Paiva pelo estímulo e incansável compreensão, não poupando esforços para que esse momento acontecesse.

As minhas filhas Laura, Laís e Ana Luiza que puderam entender os momentos de ausência, ou mesmo, quando presente diante da fria máquina do computador, não pude dar-lhes muita atenção. Perdoem à cara amarrada.

Ao amigo, engenheiro Abel Bezerra Júnior da CAGEPA, que me abasteceu todo o tempo de informações sobre o sistema investigado.

Ao jovem amigo Márcio Abrantes que me socorreu com sua simplicidade e sabedoria no auxílio do desenvolvimento da interface computacional.

Aos colegas de pós-graduação Gustavo, Andréa, Vieira, Waldenísia e Araújo pelo prazer de uma alegre convivência durante esses anos.

Ao talentoso Saulo Bezerra pela preciosa colaboração na formatação do texto.

A Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES-PICDT) pela bolsa de estudos concedida ao autor.

RESUMO

De uma maneira geral, nos médios e grandes sistemas adutores de abastecimento o transporte da água desde os centros de produção até os centros de distribuição se dá com a intervenção de um grande número de grupos elevatórios e válvulas de controle. Os inúmeros estados que esses componentes podem assumir, a cada hora, aumenta consideravelmente a gama de combinações possíveis de regras operacionais, tornando a gestão do sistema uma tarefa bastante complexa para os tomadores de decisão. Na maioria dos casos, adotam-se políticas operacionais predominantemente heurísticas, desconsiderando-se os critérios relativos à otimização global do sistema, fato que acarreta grande desperdício de energia elétrica. Neste trabalho desenvolve-se um modelo computacional de apoio à tomada de decisão com vistas à definição da melhor estratégia diária dos estados das bombas e válvulas de um sistema adutor, de forma que resulte na minimização dos gastos com energia elétrica (consumo e demanda) e que seja operacionalmente viável. A metodologia empregada na busca do ótimo operacional ao longo de 24 horas, fundamenta-se na técnica estocástica dos Algoritmos Genéticos Simples acoplada ao simulador hidráulico EPANET2, responsável pela avaliação da performance hidráulica das soluções propostas. A minimização da função mono-objetivo, representada pelos custos de bombeamento, é tratada pelo Método de Penalidades considerando as restrições inerentes ao sistema estudado. A aplicabilidade da metodologia proposta foi avaliada por meio de simulações realizadas no Sistema Adutor Marés, responsável pelo abastecimento de grande parte da cidade de João Pessoa – Paraíba, considerando diferentes estruturas tarifárias de energia elétrica. O trabalho apresenta resultados que comprovam a eficácia do modelo proposto em encontrar estratégias de operação viáveis de serem aplicadas a um sistema adutor real com múltiplas estações de bombeamento e reservatórios, mesmo sem atender a totalidade das restrições físicas e operacionais inerentes ao sistema. A redução do consumo elétrico alcançada, evidencia a importância do modelo como instrumento para melhorar a eficiência energética do sistema.

ABSTRACT

In a general way, in the medium and large systems of supplying, the transport of the water since the production centers until the distribution centers feels with the intervention of a great number of station pumps and control valves. The innumerable states that those components can assume, every hour, increases the range of possible combinations of operational rules considerably, turning the administration of the system a quite complex task for the decision-makers. In most of the cases, predominantly heuristic operational politics are adopted, being disrespected the relative criteria to the global optimization of the system, fact that causes great electric power waste. In this work, a computational model to support the taking decision process in order to define the best daily strategy of the bomb and valve stages of a pipeline system, so that it results in the minimization of the expenses with electric power (consumption and demand) and that it is operationally viable as well. The used methodology in the search of operational optimum in 24 hours is based on the stochastic technique of the Simple Genetic Algorithms interlinked to the hydraulic simulator EPANET2, which is responsible for the evaluation of the hydraulic performance of the proposed solutions. The minimization of the mono-objective function, represented by the pumping costs, is treated by the Method of Penalties considering the inherent restrictions of the studied system. The applicability of the proposed methodology was evaluated through simulations applied to the water pipelines system of Marés, which supplies a great part of João Pessoa city in Paraíba State, Brazil, considering several tariff structures of electric power. The work presents results that prove the effectiveness of the model proposed in finding viable operation strategies to be applied to a water pipeline system with multiple stations and reservoirs, even without attending the totality of the physical and operational restrictions which are present in the system. The reduction of the electric consumption reached, it evidences the importance of the model as instrument to improve the energy efficiency of the system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Subsídios aplicados às tarifas de energia elétrica – Estado de São Paulo.....	3
Figura 2.1- Distribuição percentual dos gastos com energia elétrica na CAGEPA.....	6
Figura 3.1 - Ciclo Básico do Algoritmo Genético Simples.....	23
Figura 3.2 – Esquema gráfico do cruzamento de um ponto.....	25
Figura 3.3 – Esquema gráfico do cruzamento de dois pontos.....	25
Figura 3.4 – Esquema gráfico do cruzamento uniforme.....	26
Figura 3.5 – Esquema gráfico de mutação simples.....	26
Figura 3.6 - Performance de um AG ao longo de cada geração.....	28
Figura 3.7 – Exemplo de codificação binária.....	29
Figura 3.8 – Exemplo de codificação real.....	30
Figura 4.1 – Esquema de um sistema adutor.....	31
Figura 4.2 - Estrutura computacional do modelo.....	36
Figura 4.3 – Esquema das demandas de energia num conjunto bomba-motor.....	39
Figura 4.4 – Curva do sistema para diferentes cargas.....	40
Figura 4.5 – Fluxograma da simulação hidráulica no EPANET2.....	59
Figura 4.6 - Componentes de uma rede hidráulica no EPANET2.....	61
Figura 4.7 – Exemplos de janelas de propriedades do EPANET2.....	69
Figura 4.8 – Modelo do sistema adutor Marés no simulador EPANET2.....	71
Figura 4.9 – Diagrama de fluxo da ferramenta computacional OTIMIZE.....	72
Figura 5.1 – Caminhamento da linha adutora até os centros de distribuição.....	77
Figura 5.2 – Esquema geral do sistema adutor Marés.....	78
Figura 5.3 – Vista interior da elevatória Marés.....	79
Figura 5.4 – Esquema geral do sistema distribuidor R1.....	82
Figura 5.5 – Elevatória do Centro de Distribuição, R1.....	83
Figura 5.6 – Reservatório elevado (RE) do sub-sistema R1.....	84
Figura 5.7 – Centro de reservação e distribuição R2.....	85
Figura 5.8 – Vista do sistema de reservação e distribuição R2.....	87
Figura 5.9 – Área de influência dos reservatórios R1 e R2.....	88
Figura 5.10 – Topologia do sistema adutor Marés.....	92

Figura 5.11 – Padrão de demanda horária dos Centros R1 e R2.....	95
Figura 5.12 – Coeficientes de perdas de carga em válvulas de gaveta.....	96
Figura 5.13 - Níveis de água observado e simulado no reservatório AR1.....	98
Figura 5.14 - Níveis de água observado e simulado no reservatório BR1.....	98
Figura 5.15 - Níveis de água observado e simulado no reservatório elevado RE.....	99
Figura 5.16 - Níveis de água observado e simulado no reservatório AR2.....	99
Figura 5.17 - Níveis de água observado e simulado no reservatório BR2.....	99
Figura 5.18 - Janela de Configuração de parâmetros do OTIMIZE.....	103
Figura 5.19 - Influência do tamanho da população na função de aptidão.....	107
Figura 5.20 – Influência do tipo de reprodução na convergência do AG.....	108
Figura 5.21 – Comparação entre estratégias de Cruzamento.....	108
Figura 5.22 - Sensibilidade da Probabilidade de Cruzamento.....	109
Figura 5.23 – Sensibilidade da Probabilidade de Mutação.....	111
Figura 5.24 – Registrador de pressão e vazão no TAP.....	112
Figura 5.25 - Esquema de recalque com ponto de controle	113
Figura 5.26 – Metodologia usada para traçado da curva característica das bombas.....	114
Figura 6.1 – Formulário para apresentação da melhor regra operacional.....	118
Figura 6.2 – Exemplo de resultado das grandezas elétricas calculadas.....	119
Figura 6.3 – Regra da Alternativa Operacional 1.....	120
Figura 6.4 – Regra da Alternativa Operacional 2.....	121
Figura 6.5 – Regra da Alternativa Operacional 3.....	121
Figura 6.6 – Comportamento da carga hidráulica no reservatório RE.....	123
Figura 6.7 – Comportamento da carga hidráulica no reservatório BR1.....	123
Figura 6.8 – Comportamento da carga hidráulica no reservatório AR2.....	124
Figura 6.9 – Comportamento da carga hidráulica no reservatório BR2.....	124
Figura 6.10 – Comportamento da carga hidráulica no reservatório AR1.....	125
Figura 6.11 – Nível de água no RE para operação tradicional e otimizada.....	125
Figura 6.12 – Alternativa Operacional 3: Sentido do fluxo na rede .entre 1 e 3 horas.....	129
Figura 6.13 – Distribuição de pressão no nó Rede_R1.....	131
Figura 6.14 – Distribuição de pressão no nó Rede_R2.....	132
Figura 6.15 – Regra operacional da Alternativa Operacional mais econômica.....	134
Figura 6.16 – Consumo e de demanda da Alternativa Operacional mais econômica...	135
Figura 6.17 – Evolução da função de aptidão da melhor solução.....	136
Figura 6.18 - Regra operacional para o Cenário A.....	141

Figura 6.19 – Regra operacional para o Cenário B.....142

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Relação dos códigos de verificação das condições de funcionamento da rede hidráulica.....	46
Tabela 4.2 - Diferença de pressão no estágio inicial e final da simulação nos nós da rede.....	52
Tabela 5.1 - Distribuição quantitativa das unidades do sistema Marés.....	78
Tabela 5.2 - Dados dos conjuntos elevatórios de Marés.....	80
Tabela 5.3 - Dados dos conjuntos elevatórios da região R1.....	84
Tabela 5.4 - Dados do conjunto elevatório submerso da região R2.....	86
Tabela 5.5 - Volumes aduzidos aos centros de distribuição.....	89
Tabela 5.6 - Lista das variáveis de decisão do problema.....	101
Tabela 5.7 - Tarifa horo-sazonal azul e verde para o Sub-grupo A4.....	103
Tabela 5.8 - Tarifa convencional para o Sub-grupo A4.....	104
Tabela 5.9 - Tarifa convencional para o Sub-grupo B3.....	104
Tabela 5.10 - Sistema brasileiro de tarifação de energia elétrica.....	105
Tabela 5.11 - Valores de função de aptidão para vários valores de mutação.....	110
Tabela 5.12 - Valores dos parâmetros genéticos escolhidos para o AG.....	111
Tabela 5.13 - Relação de pontos para construção das curvas características.....	115
Tabela 5.14 - Equações características e de rendimento das bombas do centro Marés.....	115
Tabela 5.15 - Equações características e de rendimento das bombas do centro R1.....	116
Tabela 5.16 - Equações características e de rendimento das bombas do centro R2.....	116
Tabela 6.1 - Informações técnicas produzidas pelas simulações.....	122
Tabela 6.2 - Número de acionamentos das bombas no horizonte operacional.....	127
Tabela 6.3 - Pressão inicial e final nos nós de partida da rede.....	130
Tabela 6.4 - Valores de custo de bombeamento para vários arranjos tarifários.....	133
Tabela 6.5 - Tempo de operação mensal das bombas do Centro Marés.....	136
Tabela 6.6 - Estimativa do consumo diário das bombas do Centro Marés.....	137
Tabela 6.7 - Percentual de redução de consumo elétrico para o Centro Marés.....	137
Tabela 6.8 - Valores do consumo de energia medido no Centro R1.....	138
Tabela 6.9 - Variação de consumo de energia para o Centro R1.....	138
Tabela 6.10 - Valores do consumo de energia medido no Centro R2.....	139

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AG	Algoritmo Genético
AGPs	Algoritmos Genéticos Paralelos
AGs	Algoritmos Genéticos
AGS	Algoritmo Genético Simples ou Padrão
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AR1	Reservatório A do Centro R1
ASCE	American Society of Civil Engineers
BR1	Reservatório B do Centro R1
CR1	Reservatório C do Centro R1
AR2	Reservatório A do Centro R2
BR2	Reservatório B do Centro R2
B3MARÉS	Bomba 3 do Centro Marés
B4MARÉS	Bomba 4 do Centro Marés
B5MARÉS	Bomba 5 do Centro Marés
B1R1	Bomba 1 do Centro R1
B2R1	Bomba 2 do Centro R1
B3R1	Bomba 3 do Centro R1
B4R1	Bomba 4 do Centro R1
BPOÇO	Bomba do Poço
C	Comprimento do Cromossomo
CAGEPA	Companhia de Água e Esgotos da Paraíba
CESP	Companhia Energética de São Paulo
C/C++	Linguagens de Programação
CCO	Centro de Controle Operacional
CV	Válvula de Retenção
DELPHI PASCAL	Linguagem de Programação
DLL	Dynamic Link Library
DD	Divisões do Dia (Horário de Ponta e Fora de Ponta)
DP	Programação Dinâmica
ELETROBRÁS	Centrais Elétricas Brasileiras S.A.

ENVOLVER	Aplicativo Computacional (modelo de otimização)
EPA	Environmental Protection Agency
EPANET2	Aplicativo Computacional (modelo de simulação)
ETA	Estação de Tratamento de Água
FCV	Válvula Controladora de Fluxo
FO	Função Objetivo
GRG	Gradiente Reduzido Generalizado (modelo de otimização)
H ₂ ONET	Aplicativo Computacional (modelo de simulação)
ID	Identificador de Objetos
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MATLAB	Aplicativo Computacional
MIKE NET	Aplicativo Computacional (modelo de simulação)
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MPO	Ministério de Planejamento e Orçamento
MOP	Multiobjective Optimization Problem
MOEAs	Multi-Objective Evolutionary Algorithms
NA	Número de acionamentos de uma bomba
NB	Número de bombas
NE	Número de Elevatórias
NG	Número de Gerações
NT	Número de Intervalos de Tempo
OPTIGA	Aplicativo Computacional (modelo de otimização)
PB	Estado da Parafba
PD	Programação Dinâmica
PE	Potência de Eixo
PH	Potência Hidráulica
PL	Programação Linear
PLANASA	Plano Nacional de Saneamento
PM	Potência Motriz
PMSS	Programa de Modernização do Setor de Saneamento
P-NB	Projeto de Norma Brasileira
PNL	Programação Não-Linear
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
KYPIPE	Aplicativo Computacional (modelo de simulação)

RE	Reservatório Elevado
RNV	Reservatório de Nível Variado
RNF	Reservatório de Nível Fixo
SAELPA	Sociedade Anônima de Eletrificação da Paraíba
SANEAR	Eficiência Energética no Saneamento Ambiental
SARA	Aplicativo Computacional (modelo de simulação)
SP	Estado de São Paulo
SPEA	Strenght Pareto Evolucionary Algorithm
TAP	Registro de Derivação
TCV	Válvula Controladora de Perda de Carga
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
USA	United States of America
VISUAL BASIC	Linguagem de Programação
WADISO	Aplicativo Computacional (modelo de simulação)
WATERCAD	Aplicativo Computacional (modelo de simulação)
WINDOWS	Aplicativo Computacional (sistema operacional)

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área da base do reservatório
C_b	custo energético total
Cont_passo	variável controladora do tempo de processo
E_b	energia transferida ao líquido por uma bomba hidráulica
K_S	coeficiente de perda de carga localizada da válvula
h_f	perda de energia (carga) distribuída numa canalização
D_f	déficit de volume de água no reservatório
D_i	diâmetro de canalização
e	constante matemática neperiana (2,7182818)
f	coeficiente de atrito (coeficiente de Darcy-Weisbach)
g	aceleração da gravidade (9,81 m/s ²)
J	perda de carga unitária
L	comprimento de conduto
Re	número de Reynolds
ν	viscosidade cinemática do líquido
ε	rugosidade absoluta da tubulação
\sum	somatório
γ	peso específico do líquido
θ	grau de abertura das válvulas
log	logaritmo
π	constante (3,141593)
λ	parâmetro de penalidade que multiplica funções de restrição
η_b	rendimento hidráulico da bomba
η_m	rendimento do motor elétrico
η	rendimento do conjunto moto-bomba
h_{ini}	nível de água inicial no reservatório
h_{fin}	nível de água final no reservatório
$h_j(\min)$	nível de água mínimo no reservatório
$h_j(\max)$	nível de água máximo no reservatório
$h_j(t)$	nível de água no reservatório no instante, t

H_m	altura manométrica total da bomba
N	rotação nominal da bomba
p	pressão dinâmica
P	população
p_c	probabilidade de cruzamento
p_m	probabilidade de mutação
Q	vazão
Q_{ij}	vazão no elemento que conecta i a j
R	número de reservatórios no sistema
z	cota topográfica
TC	custo unitário da tarifa de consumo
TD	custo unitário da tarifa de demanda
t	hora do dia
tr	tempo entre a ocorrência de pressão negativa e o horizonte operacional
∇t	intervalo de tempo
V	velocidade média de escoamento

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	1
1.1 Introdução.....	1
1.1.1. Busca da eficiência energética.....	3
1.2. Objetivos da pesquisa.....	4
1.2.1. Objetivo Geral.....	4
1.3. Estrutura do trabalho de tese.....	5
CAPÍTULO 2 – FORMALIZAÇÃO DO PROBLEMA E REVISÃO DE LITERATURA.....	6
2.1. Problemas operacionais: gastos energéticos.....	6
2.2. Estratégias para redução do consumo.....	7
2.3. Técnicas de otimização.....	8
2.4. Revisão de trabalhos anteriores.....	10
2.4.1. Estudos aplicados a projetos de redes de distribuição.....	10
2.4.2. Estudos aplicados a operação de redes.....	11
2.4.3. Trabalhos com enfoque sobre eficiência energética	13
CAPÍTULO 3 – ALGORITMOS GENÉTICOS.....	20
3.1. Algoritmo genético simples (AGS)	21
3.2. Estrutura básica de um algoritmo genético.....	22
3.3. Avaliação da função de aptidão.....	27
3.4. Tipos de algoritmos genéticos.....	28
3.5. Critérios de parada.....	28
3.6. Representação cromossômica.....	29
3.7. Soluções híbridas e alternativas.....	30

CAPÍTULO 4 – MODELAGEM DO PROBLEMA.....	31
4.1. Pesquisa proposta	32
4.2. Uso de modelos em abastecimento de água.....	33
4.2.1. Modelos de otimização.....	34
4.2.1.1. Modelagem proposta.....	35
4.2.2. Definição das variáveis.....	37
4.2.3. Definição da função objetivo.....	38
4.2.4. Definição da função de aptidão.....	41
4.2.4.1. Construção das funções de penalidades.....	43
4.2.4.2. Método de penalidades.....	48
4.2.4.3. Metodologia empregada.....	50
4.2.4.4. Ajuste dos coeficientes de penalidades.....	50
4.2.5. Programa de otimização: OptiGA.....	52
4.3. Simulação hidráulica.....	56
4.3.1. Equilíbrio hidráulico.....	57
4.3.2. Módulo de simulação hidráulica: EPANET2.....	59
4.3.2.1. Representação do modelo de rede.....	61
4.3.2.2. Uso da extensão <i>Toolkit</i> na interface computacional OTIMIZE.....	65
4.4. Etapas da construção do modelo digital.....	68
4.4.1. Procedimentos da concepção do modelo.....	72
CAPÍTULO 5 – APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO.....	76
5.1. Estudo de caso.....	77
5.1.1. Descrição do sistema estudado.....	77
5.1.1.1. Centro de produção Marés.....	79
5.1.1.2. Centro de distribuição R1.....	81
5.1.1.3. Centro de distribuição R2.....	85
5.1.2. Definição da vazões aduzidas.....	89
5.1.3. Levantamento do sistema estudado.....	89
5.1.3.1. Calibração.....	92
5.2. Codificação do problema.....	100
5.3. Tarifação da energia elétrica.....	101
5.3.1. Medições de consumo de energia.....	104

5.4. Operadores genéticos.....	106
5.5. Política ótima de operação.....	111
5.6. Curvas características das bombas.....	112
CAPÍTULO 6 – RESULTADOS E ANÁLISES.....	117
6.1. Formulário de dados.....	117
6.2. Teste de validade do modelo.....	120
6.2.1. Apresentação da regras de operação.....	120
6.2.2. Resultados das simulações hidráulicas.....	122
6.2.3. Análise dos resultados.....	126
6.2.1.1. Condições de extravasamento.....	131
6.3. Pesquisa da melhor estrutura tarifária.....	132
6.3.1. Estimativa da redução do consumo elétrico.....	136
6.3.1.1. Para o centro Marés.....	136
6.3.1.2. Para o centro R1.....	138
6.3.1.3. Para o centro R2.....	139
6.4. Formas práticas de aplicação da rotina OTIMIZE.....	140
CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	145
7.1. Conclusões.....	145
7.2. Recomendações.....	147
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	148
Anexo A.1	154
Anexo A.2	155
Anexo A.3	156
Anexo A.4	157
Apêndice	158

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1- Introdução

A crescente urbanização das cidades trás em conseqüência o aumento das demandas de água para abastecimento. Os mananciais de água para esse atendimento estão cada vez menos disponíveis para uso humano e cada vez mais distantes das zonas urbanas. É comum ter-se mananciais a dezenas de quilômetros dos centros de reservação e distribuição. Essa ocorrência impõe a construção de uma maior quantidade de estações de bombeamento para efetuar a pressurização da água a ser transportada até o consumidor final. Essa circunstância eleva sobremaneira os custos operacionais das companhias gestoras de abastecimento de água, especialmente com o item energia elétrica, como decorrência do funcionamento simultâneo de muitos motores de médio e grande porte instalados nas casas de bombas. Por conta disso, é imprescindível que os grupos elevatórios tenham um funcionamento otimizado, de forma a não interferir negativamente nos resultados financeiros das empresas, como conseqüência do desperdício de energia.

Segundo dados do PROCEL SANEAR (2005), na estrutura de consumo elétrico brasileiro, os motores são responsáveis por aproximadamente 49% do consumo de energia elétrica do setor industrial, sendo que desse percentual, cerca de 2,3%, é creditada aos serviços de água e esgoto do Setor de Saneamento Básico. Nos Estados Unidos, segundo Brailey e Jacobs (1980), o percentual de energia elétrica no setor de saneamento alcança o patamar de 7% do total consumido no país, dos quais cerca de 90% referem-se ao tratamento e ao bombeamento de água.

Dentre os fatores que contribuem para esse elevado índice de consumo de energia, destaca-se: ausência de medição e monitoramento dos principais parâmetros que regulam o sistema; falta de um melhor compartilhamento dos dados entre várias gerências da companhia; equipamentos antigos e ultrapassados; envelhecimento das tubulações; elevado desperdício de água utilizável; falta de uma política de manutenção e substituição; complexidade das redes de condutos e má política de gerenciamento operacional dos grupos elevatórios e falta de investimentos na área operacional.

Além destes fatores, o grande número de elementos passíveis de terem seus estados alterados a cada hora, torna complexa a tarefa dos operadores desses sistemas em definir, num determinado instante, qual a melhor combinação do estado operacional das bombas e grau de abertura das válvulas, de forma a tornar o sistema mais eficiente em termos energéticos. Devido a esta elevada complexidade, a busca da decisão mais adequada em termos de política operacional só pode ser feita com o auxílio de processos otimizados a serem obtidos mediante rotinas computacionais apropriadas. Sem um planejamento otimizado, os sistemas de produção de água para abastecimento continuam desperdiçando uma parcela razoável de energia elétrica.

Um grande campo de pesquisas se abre na busca da melhoria da eficiência energética das estações de bombeamento, envolvendo parâmetros como confiabilidade operacional e satisfação quanto ao atendimento das demandas. Nas últimas duas décadas, com o acelerado desenvolvimento dos recursos computacionais, aliados a sua facilidade de aplicação, a modelagem matemática de problemas complexos vem ganhando qualidade e eficiência, fazendo com que a pesquisa operacional venha ser explorada com mais intensidade na área de recursos hídricos, especialmente no setor de sistemas públicos de abastecimento de água, ao promover investigações teóricas e práticas na busca de projetos e operações mais eficientes.

1.1.1 – Busca da Eficiência Energética

As tomadas de decisão implementadas pelas concessionárias em sistemas adutores de abastecimento de água são, via de regra, balizadas apenas nos limites operacionais de água nos reservatórios do sistema, com o fim de garantir o atendimento da vazão demandada pela rede de distribuição. Os procedimentos de controle operacional diário têm um forte componente heurístico em que a qualidade das decisões fica vinculada a experiência dos operadores e raramente se faz um acompanhamento da eficiência energética da política operacional implementada.

Alguns fatores vêm despertando, nas companhias, práticas visam efetuar serviços de distribuição de água a necessidade de procurar oportunidades de conservação de energia a partir da implementação de programas variados, compatíveis com o nível organizacional da empresa. Dentre os fatores mais relevantes, cita-se:

- ✓ A crise energética vivenciada pelo Brasil em 2001;
- ✓ A preocupação com a redução gradativa do subsídio governamental dado as tarifas de energia para o setor de saneamento, hoje situada no patamar de 15% (Figura 1.1), mas com tendência a extinção;
- ✓ O crescimento de consumo de energia pela expansão do atendimento com serviços de saneamento. As ações que vêm sendo levadas a com um custo otimizado, enquanto minimiza o uso de água e energia.

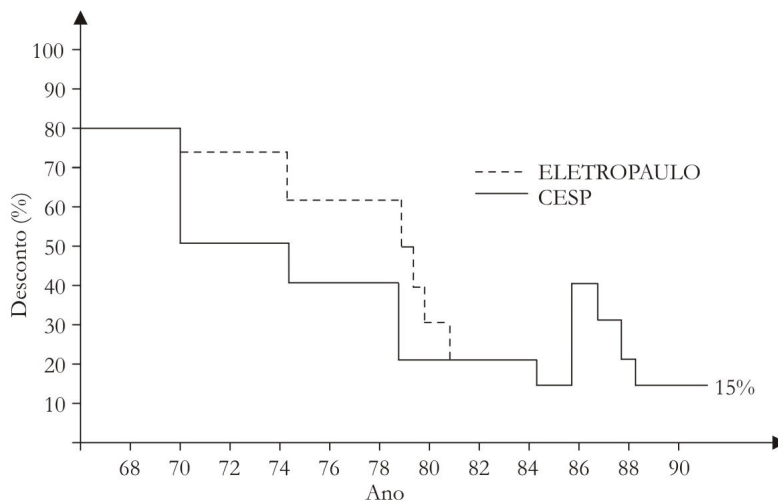


Figura 1.1 – Subsídios aplicados às tarifas de energia elétrica – Estado de São Paulo
(Fonte: Tsutiya, 1992)

Segundo Righetto (2001) é imprescindível a aplicação de modernas tecnologias a esses sistemas, como forma de melhor viabilizar seu funcionamento. Dentre essas melhorias, sugere a sua automação para aquisição de dados em tempo real e a implantação conjunta de métodos numéricos e simuladores hidráulicos de forma a que se possa obter a efficientização de água e energia do sistema de abastecimento. Essa problemática poderia ser reduzida pela simples ação de mudanças nos procedimentos de controles operacionais, sem necessidade de investimento na aquisição de novos equipamentos eletro-mecânicos ou aumento da capacidade de armazenamento.

1.2- Objetivos da Pesquisa

1.2.1 – Objetivo Geral

O objetivo geral da pesquisa é o desenvolvimento de uma ferramenta computacional que possa auxiliar os tomadores de decisão das companhias de abastecimento de água, a definir regras de operação ótimas, aplicadas a sistemas de adução compostas de múltiplas elevatórias e vários reservatórios de acumulação e distribuição. Para tanto, formula-se uma função objetivo que trata o estado das bombas e válvulas como variáveis de decisão e que resulte num custo mínimo de bombeamento para padrões de demanda conhecidos.

A metodologia aplicada deve apresentar soluções com confiabilidade operacional quando testada em um modelo hidráulico representativo de um modelo físico escolhido.

Pretende-se demonstrar a oportunidade de redução do consumo de energia pela implantação de medidas de fácil execução sem a necessidade de investimentos para alcançar essa racionalização.

A interface computacional proposta, denominada de OTIMIZE, foi escrita na linguagem Visual Basic 6 com a finalidade de promover a integração de um módulo otimizador (*solver*) representado pelo método estocástico dos Algoritmos Genéticos Simples - AGS, e um módulo de simulação hidráulica representado pelo programa EPANET2 (Rossman, 2000), responsável pela avaliação das restrições hidráulicas impostas à rede.

O programa apresenta, a intervalos regulares, a melhor programação a ser seguida referente ao estado das válvulas (aberta, fechada ou parcialmente aberta) e estado das bombas (ligada, desligada) para um horizonte diário de operação. Dessa forma, as decisões de efetuar manobras passam a ser orientadas a partir da pesquisa de milhares de combinações possíveis, sendo escolhida, a cada hora, aquela que apresentar o menor valor da função objetivo.

Espera-se que com esse eficiente planejamento haja a garantia de um nível de viabilidade operacional adequado, refletida em diversas simulações dinâmicas sobre o sistema, comprovando a aplicabilidade do Algoritmo Genético Simples na solução desse tipo de problema. A comprovação de viabilidade poderá vir contribuir para melhoria do nível de serviços de engenharia nos sistemas complexos de bombeamento

pela apresentação de soluções econômicas, de boa qualidade e obtidas com um tempo computacional adequado às necessidades de tomada de decisão dos gestores do sistema.

Para auxiliar no desenvolvimento da metodologia proposta, o Sistema Adutor Marés que abastece parte da cidade de João Pessoa – Paraíba, foi tomado como modelo para servir de instrumento de verificação da aplicabilidade da ferramenta desenvolvida a um sistema real.

A principal contribuição desta pesquisa está em apresentar uma metodologia para definição de regras operacionais com base em fundamentos matemáticos como uma tentativa de substituir as técnicas atualmente empregadas que toma por base, apenas, os níveis dos reservatórios nos vários centros de distribuição de água.

1.3- Estrutura do trabalho de tese

Esse trabalho foi estruturado e está sendo apresentado com a seguinte organização:

Capítulo 1 - nele é feita uma apresentação do problema a ser resolvido, realçando-se seus inconvenientes e dá-se conhecimento dos objetivos do trabalho;

Capítulo 2 - contém uma descrição da relação entre operação de sistemas adutores com gastos energéticos, e uma revisão bibliográfica dos principais modelos matemáticos utilizados na otimização da operação de sistemas de abastecimento de água com ênfase para os modelos estocásticos;

Capítulo 3 - apresenta um tutorial básico sobre Algoritmos Genéticos;

Capítulo 4 - contém uma descrição da construção da interface computacional proposta, mostrando os fundamentos da integração dos módulos de otimização e de simulação hidráulica;

Capítulo 5 - trata da apresentação do modelo físico estudado e implementação da interface computacional desenvolvida;

Capítulo 6 - apresentação dos resultados obtidos e análises;

Capítulo 7 - exposição das conclusões do trabalho e são recomendados estudos futuros.

Referências Bibliográficas

Anexos

Apêndice.

CAPÍTULO 2

FORMALIZAÇÃO DO PROBLEMA E REVISÃO DE LITERATURA

2.1 - Problemas operacionais: gastos energéticos

No Brasil, a alocação dos recursos financeiros no setor de saneamento é priorizada para as áreas de projeto e expansão de sistemas, deixando em segundo plano as ações direcionadas à modernização da gestão operacional, razão agrava a administração dos sistemas de abastecimento de água, tornando-a numa tarefa complicada, de baixa eficiência e na maioria das vezes, utilizando a mesma tecnologia adotada antes da grande expansão da oferta de água, a partir da década de 70 com a implantação do PLANASA.

De uma maneira geral, as companhias de abastecimento desembolsam mensalmente elevadas quantias com a operação dos seus sistemas, sendo que o fator energia elétrica representa entre 6,5% e 23,8% das despesas totais de exploração, ficando atrás apenas das despesas com pessoal, segundo dados do Plano de Ação do PROCEL SANEAR (2005).

De acordo com relatório publicado pela CAGEPA (Leite, 2003) da fatura mensal de energia elétrica paga pela empresa, constata-se que em média 93% devem-se aos gastos com as elevatórias de água, sendo o restante atribuído às elevatórias de esgotos e atividades administrativas, conforme ilustra a Figura 2.1. As estratégias ultrapassadas de funcionamento de bombas são responsáveis por uma parcela considerável daquele percentual.

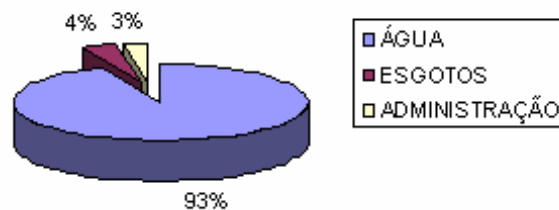


Figura 2.1 - Distribuição percentual dos gastos com energia elétrica na CAGEPA

O sucesso e a garantia de medidas mais profundas a serem implementadas para melhorar esse panorama passam, obrigatoriamente, por um processo de reestruturação do setor operacional das empresas de saneamento, visando sua modernização, automação e otimização. Considerando apenas o item otimização da operação, pode-se afirmar que a maioria das empresas opera seus sistemas sem uma metodologia adequada para acompanhamento e monitoramento de seus processos.

Numa tentativa de melhorar o processo do sistema de produção de água e gerenciar tantas variáveis de controle com um mínimo de racionalidade, as empresas de saneamento criaram internamente os Centros de Controle Operacional - CCO, para receber informações a intervalos regulares do estado das bombas (ligada/desligada), percentual de abertura das válvulas e valor da lâmina de água dos reservatórios do sistema. Com base nesses dados o operador tem uma visão por inteiro do comportamento do sistema e, apoiado na sua experiência profissional, põe em prática certa regra operacional e a mantém invariável até que vislumbre a necessidade de reformular seu planejamento a partir de novas informações recebidas ou alguma ocorrência acidental no sistema. A carência de um melhor embasamento teórico dos operadores aliada ao conservadorismo dos procedimentos implementados provocam gastos adicionais de energia com manobras desnecessárias ou impróprias.

Esse panorama de procedimentos para operação de sistemas adutores é histórico no Brasil e, apesar de toda evolução da área de informática, ainda resiste as transformações de ordem tecnológica. Contribui para esse quadro a ausência de ferramentas computacionais de fácil manuseio e que suportem com facilidade eventuais mudanças topológicas no sistema de produção.

Recentemente, como reflexo da privatização do setor elétrico nacional e a nova relação com o mercado fornecedor de energia, muitas empresas de saneamento estão sendo induzidas à adoção de medidas para melhorar o gerenciamento das suas contas de energia, buscando dispor de programas computacionais específicos para maior controle e avaliação dos seus gastos.

2.2 – Estratégias para redução do consumo

Tsutiya (2001) afirma que ações para redução do custo com energia elétrica devam ser implementadas considerando as características particulares de cada sistema e

discorre sobre uma série de medidas práticas que podem levar a redução de consumo, destacando-se dois grandes grupos:

1) Redução do Custo sem Diminuição do Consumo de Energia Elétrica

1.1) Sem investimentos (ações administrativas): a) adequação da demanda contratada; b) alteração da estrutura tarifária; c) detecção de desvios de consumo; d) erros de leitura.

1.2) Com investimentos (ações operacionais): a) alteração da tensão de alimentação; b) Melhoria do fator de carga; c) Correção do fator de potência.

2) Redução do Custo pela Diminuição do Consumo de Energia Elétrica

2.1) Redução da altura manométrica: redução das perdas de carga

2.2) Redução no volume de água distribuído: a) controle de perdas; b) uso racional da água.

2.3) Melhoria de rendimento dos conjuntos elevatórios: a) rendimento do motor; b) rendimento da bomba.

3) Redução do Custo pela Alteração do Sistema Operacional

a) Alteração do sistema bombeamento-reservação; b) utilização de variadores de rotação; c) alteração nos procedimentos operacionais.

Pode-se complementar essas alternativas apresentadas por Tsutiya (2001) citando:

4) Redução do Custo pela Automação do Sistema de Abastecimento de Água

5) Redução do Custo pela Geração de Energia Elétrica por Sistemas Independentes.

A investigação desse trabalho procura desenvolver uma metodologia de busca da melhoria da eficiência energética apenas com alteração do planejamento operacional das estações de bombeamento, sem necessidade de investimentos em novas instalações ou equipamentos, sendo por isso, alternativas de maior aceitação por parte das concessionárias de saneamento no Brasil.

2.3 - Técnicas de otimização

A engenharia de recursos hídricos já vem utilizando técnicas de otimização há mais de 35 anos para planejamento, projeto e gerenciamento de sistemas de grande

complexidade. Nos dias de hoje, devido à crescente competitividade em todos os campos de atividade, a busca pela otimização tem assumido um papel de relevo dentro do processo de melhorar o desempenho de ações, redução de custos, maximização da produção, etc.

Tradicionalmente os problemas de otimização até a década de 80 eram resolvidos usando técnicas clássicas como programação linear (LP), programação não-linear (LNP) e programação dinâmica (DP). Esses métodos determinísticos são constituídos por algoritmos que normalmente fazem uso do cálculo de derivadas da função objetivo para a determinação da direção de busca para a pesquisa do ponto solução. A procura da solução ótima usa a solução corrente como partida para a próxima iteração.

Segundo Wu e Simpson (2001) as principais desvantagens dos algoritmos determinísticos são: a necessidade de cálculo de derivadas; dificuldade de adaptação a projetos com variáveis discretas, e complexidade de implementação nos trabalhos práticos de engenharia. Por outro lado, alguns desses métodos possuem grande rapidez e precisão na procura do ponto solução.

Já os métodos estocásticos buscam o ponto solução a partir de regras de probabilidades. Dessa forma, a busca não é feita somente na vizinhança e, com isso, aumenta-se a chance de se encontrar um ponto ótimo global, porém, o número de avaliações da função objetivo, necessárias para se chegar à solução ótima, é normalmente superior ao número requerido pelos métodos determinísticos.

Dentre os métodos de otimização estocásticos, encontram-se os Algoritmos Genéticos, Goldberg (1989), que surgiram da analogia entre otimização e os mecanismos da genética e evolução natural das espécies, combinando os conceitos de adaptação seletiva, troca de material genético e sobrevivência dos indivíduos mais adaptados. Entre as principais vantagens dessa técnica está a sua capacidade para otimizar parâmetros contínuos ou discretos; não requer informação sobre o gradiente; as possíveis descontinuidades da função de adaptação têm pouco efeito na performance global e podem ser empregados para uma grande variedade de problemas. Algumas desvantagens desse método são listadas no Capítulo 3 deste trabalho.

2.4 - Revisão de trabalhos anteriores

A partir da década de 60, com o trabalho publicado por Karmeli et al.(1968), diversas pesquisas envolvendo procedimentos de otimização aplicados a sistemas de distribuição de água, vêm merecendo destaque da comunidade científica especializada. Passados quase 40 anos daquele primeiro trabalho, surgiram inúmeros modelos de otimização aplicados a sistemas de abastecimento de água, resultando uma vasta literatura sobre o tema. Simpson et al. (1994) realçam que a sofisticação dos modelos matemáticos propostos, somada a falta de uma interface amigável com o usuário, é o principal impedimento para o aproveitamento das suas potencialidades pelas companhias concessionárias de água, donde concluem que as investigações, até então, têm ficado restritas ao âmbito acadêmico.

2.4.1- Estudos aplicados a projetos de redes de distribuição

A despeito de um grande número de algoritmos convencionais terem sido propostos e testados, Lansey e Mayes (1989) observam que na área de sistemas de abastecimento de água, a atenção mais significativa dos pesquisadores está direcionada para os problemas voltados a otimização de projetos de redes de distribuição, especialmente nos aspectos relativos a dimensionamento de condutos, calibração e definição de traçados de redes. Um dos fatores que levam a esse maior interesse de investigação deve-se ao fato de que são as redes de distribuição que demandam o maior volume dos investimentos na implantação dos sistemas públicos de água. Uma revisão geral e comentários técnicos sobre os vários algoritmos aplicados na área de planejamento são apresentados nos trabalhos de Wood e Rayes (1981) e Goulter (1992).

Só a partir de 1987 com o trabalho de Goldberg e Kuo, as técnicas de otimização estocástica com algoritmos genéticos começaram a ser exploradas em sistemas de abastecimento de água. Dentro das técnicas evolucionárias, os algoritmos genéticos vêm merecendo uma especial atenção dos pesquisadores em face da sua comprovada eficiência na busca de soluções de problemas complexos, relativa facilidade de implementação e disponibilidade de rotinas computacionais comerciais ou de código aberto. Ormsbee e Lansey (1994) fazem uma revisão das numerosas tecnologias propostas com o objetivo único de minimizar os custos de energia, apresentando vantagens e desvantagens de cada uma delas.

A introdução dessa tecnologia nos sistemas de abastecimento de água tem sido qualificada como de grande utilidade para exploração de novas vertentes de problemas complexos, entretanto o foco da maioria dos trabalhos publicados continua sendo direcionado para otimização das variáveis relativas a projetos de redes, particularmente para as áreas de dimensionamento de condutos (Dandy et al., 1996; Lippai et al., 1999), calibração (Righetto, 2001), confiabilidade (Wu et al., 2001) e reabilitação de redes (Halhal et al., 1997; Wu, 2001). Em menor número estão os trabalhos com técnicas estocásticas voltados para a área de qualidade da água (Sakarya e Mays, 2000) e perdas físicas (Caliman et al., 2001).

Na área operacional os estudos começaram a ganhar mais dimensão a partir da necessidade das companhias concessionárias de água em reduzir os gastos com bombeamento, devido ao crescente aumento das tarifas de energia elétrica, redução gradativa dos subsídios governamentais e o colapso de energia vivenciado pelo Brasil em 2001.

2.4.2 - Estudos aplicados à operação de redes

De forma semelhante aos estudos pertinentes à otimização de projetos de redes, também nos problemas relacionados com a área de otimização operacional, as técnicas matemáticas clássicas vêm sendo regularmente empregadas com o objetivo de minimizar, principalmente, os custos de bombeamento. O trabalho de Wu e Simpson (2001) ressalta as principais limitações que envolvem a aplicação dessas técnicas clássicas para esse fim, destacando a facilidade de conduzir o processo de otimização para ótimos locais, a falta de flexibilidade para tratar com variáveis discretas e a complexidade de implementação e uso. Já Mackle et al. (1995) mencionam que essas técnicas apresentam em comum a limitação de se prestarem apenas para pequenos sistemas, encontrando grandes dificuldades para utilização em sistemas maiores. Esses fatores limitantes têm restringido seu uso na prática da engenharia.

Para contornar essas limitações, tem-se introduzido na área de abastecimento de água o método estocástico dos Algoritmos Evolucionários (AE) para, através de sua robustez, encontrar soluções de custo mínimo energético. Outros objetivos do problema, tais como, custos de manutenção e garantia de satisfação ao consumidor podem ser incorporados a função objetivo como penalidades. Essa técnica que lida com a Teoria da Evolução é classificada por Barcellos (2000) em três grandes ramificações: Algoritmos

Genéticos, Estratégias de Evolução e Programação Evolutiva. Dentre muitas vantagens dessa técnica, está a de permite abordar problemas com enfoques para otimização de uma só função objetivo ou de várias funções com objetivos diferentes (MOEAs).

Nos problemas em que se busca a solução que atenda, de forma simultânea, vários critérios de desempenho é usual que não se conheça a maneira ótima de combinar os vários objetivos considerados. Diz-se que é um Problema de Otimização Multi-Objetivo (*Multiobjective Optimization Problem* - MOP).

Lücken et al. (2004) afirmam que nos problemas reais, normalmente os objetivos são conflitantes e caracterizam-se por não apresentar uma única solução que otimiza o problema e sim um conjunto de soluções que representa os melhores compromissos entre os distintos critérios. O conjunto de soluções é chamado de Pareto-ótimo ou soluções não-dominadas e sua imagem no espaço de busca é chamada de Frente Pareto.

Um conjunto Pareto-ótimo é encontrado quando no espaço de busca não existe soluções que melhore simultaneamente todas as funções objetivo consideradas. A maior parte das técnicas multiobjetivo utilizadas para delimitação da Frente-Pareto utiliza o conceito de dominância, segundo o qual todas as soluções são comparadas duas a duas sendo verificada a dominância ou não de uma sobre a outra. Dentro do aspecto global do problema, é aceita uma solução proposta que seja quase ótima para alguns dos objetivos considerados.

Num sistema público de abastecimento de água é normal se pretender alcançar vários objetivos ao final de um ciclo de operação. Nestes casos, apresenta-se ao tomador de decisão uma série de boas soluções para que ele, subsequentemente, faça a escolha de uma delas para ser aplicada no trabalho real. A solução recomendada dará preferência por um dos objetivos em detrimento de outros.

Nos problemas que envolvem otimização mono-objetivo, apenas uma solução é apresentada para a única função considerada no processo de otimização (maximização ou minimização). Quando determinadas restrições devem ser respeitadas aplica-se o conceito de funções de penalidades, no qual se penaliza as soluções que excedam limites pré-definidos para a performance do sistema, isto é:

$$\text{Função de aptidão } (x) = f(x) + \text{ penalidades } (x) \quad (2.1)$$

onde, penalidade (x) é nula se não ocorre violação. Caso contrário ela será positiva.

As soluções que violam os limites de performance são fortemente penalizadas e consideradas pouco adaptadas dentro do processo de convergência para a solução ótima. O valor global da função de penalidade reflete a qualidade da solução proposta.

2.4.3 - Trabalhos com enfoque sobre eficiência energética

Numa revisão da literatura sobre o emprego do algoritmo genético nos processos operacionais, observa-se que as tentativas de redução dos custos de bombeamento de água para fins de abastecimento ficam, muitas vezes, restritas a estações elevatórias, tipo *booster*, instaladas em pontos estratégicos de redes de distribuição com objetivo definido. Essas pesquisas não contemplam, portanto, esquemas hidráulicos complexos, típicos de estações de bombeamento em sistemas públicos de abastecimento de água, citando-se, como exemplo: associação de bombas centrífugas e recalque para vários reservatórios.

Uma justificativa a essa carência de pesquisa aplicada aos sistemas produção de água é apresentada por Sotelo et al. (2004), ao afirmarem que dependendo do número de variáveis e de objetivos considerados, os problemas de otimização da estratégia operacional pode se tornar muito complexo, especialmente para grandes sistemas de abastecimento.

Outros fatores contribuem decisivamente para inibir uma maior exploração científica desse problema, destacando-se:

- espacialização das elevatórias, o que envolve grandes distâncias a serem percorridas e maior número de recurso humano;
- carência de dados cadastrais;
- catalogação deficiente dos equipamentos;
- dados imprecisos sobre o comportamento do sistema;
- investigação de caráter multidisciplinar;
- carência de equipamentos de medição;
- empecilhos burocráticos e
- custo elevado dos simuladores hidráulicos comerciais.

Quando a otimização do sistema de distribuição de água considera bombas, tipo *booster*, merece citação o trabalho de Righetto (2002), que apresentou uma metodologia baseada nos AGs para encontrar regras operacionais otimizadas, de forma a satisfazer cinco índices de desempenho operacional ao longo de um ciclo de 24 horas de simulação: índice de consumo de energia elétrica; índice de nível de água em reservatório; índice de atendimento de demanda; índice de adequação da pressão média e índice de mudança operativa. As variáveis de decisão consideradas foram: o número de bombas em operação em cada elevatória; a velocidade rotacional das bombas e a condição de abertura das válvulas de controle de vazão. Para implementação do método foi utilizado um modelo hidráulico baseado no Método das Características para simular as potenciais soluções oferecidas pelo AG. O modelo foi aplicado a uma rede hipotética simples com resultados satisfatórios.

Algumas investigações científicas tratam o problema pesquisando a influência dos volumes iniciais nos reservatórios nos gastos energéticos dos sistemas. Come este enfoque, Barbosa (2001) sem o emprego de técnicas avançadas, utilizou parte da adutora de Bodocongó (Campina Grande-PB), para desenvolver um estudo de verificação do melhor desempenho energético das estações de bombeamento para várias condições iniciais de nível de água nos reservatórios. Os gastos com energia elétrica para cada cenário pesquisado e também para diferentes tarifas de energia elétrica mostraram que as diferentes estratégias operacionais resultaram numa discrepância de até 26% entre o melhor e o pior cenário pesquisado. As simulações hidráulicas para um período estendido de 24 horas, foram feitas com auxílio do programa computacional WADISO.

Nessa mesma linha de pesquisa, Almeida e Barbosa (2002) pesquisaram a influência de percentuais iniciais de reservação no consumo de energia de uma bomba, tipo *booster*, de rotação variável, instalada numa rede de distribuição alimentada por dois reservatórios de montante. Na busca da melhor configuração operacional trataram o problema como de otimização determinística restrita, buscando a solução do modelo hidráulico através do software GAMS (*General Algebraic Modeling System*) associado ao *solver* CONOPT (*Continuous Optimizer*). Chegaram a conclusão que, para o estudo de caso explorado, as condições iniciais dos níveis de água podem conduzir a economias da ordem de 35,4% a 36% com relação a potência de eixo de um dia normal de operação.

Um dos trabalhos pioneiros utilizando técnicas evolucionárias foi o de Mackle et al. (1995) que tratou o problema como de otimização de um objetivo simples representado pelos custos de energia elétrica. Eles estudaram uma metodologia para programação diária de funcionamento de bombas, levando em conta uma estrutura tarifária definida e restrições de ordem operacional e física. O modelo empregado era composto de apenas quatro bombas e um reservatório que possibilitava 16 combinações de estado de bombas a cada intervalo de atuação. O período de um dia foi dividido em 24 intervalos de uma hora, nos quais as bombas poderiam estar ligadas ou desligadas, sempre com rotação constante. A técnica do Algoritmo Genético foi capaz de produzir maiores volumes de bombeamento nas horas de tarifa mais barata, reduzindo o número de bombas ligadas nos horários de tarifas mais caras. Tratando-se de um estudo teórico, com aplicação a um sistema fictício, não foi quantificada a economia com energia elétrica pela aplicação da metodologia proposta.

Wu e Simpson (2001) utilizaram uma técnica denominada Algoritmos Genéticos Competentes (*Messy*), para reduzir o tempo computacional de busca no AG convencional, possibilitando sua aplicação a grandes sistemas de abastecimento de água. Nessa metodologia as cadeias que representam possíveis soluções do problema têm comprimento variável, tanto ao longo das diversas gerações, como também numa mesma população. A performance dessa técnica, associada ao simulador hidráulico EPANET, foi testada em projetos de redes de abastecimento de água nas cidades de New York e Moroccan, demonstrando que a solução de custo mínimo foi encontrada com cerca de 1/3 do número de gerações do AG tradicional.

Muitos autores consideram que os AGs demandam um esforço computacional elevado e sofrem da falta de refinamento das soluções nas proximidades do ótimo. Desta forma, surgiram os algoritmos híbridos que utilizam os AGs como ponto de partida e os métodos de otimização tradicionais para refinamento das soluções, explorando o melhor de cada um.

Com esse propósito um sistema híbrido de gerenciamento de reservatórios de abastecimento de água foi desenvolvido por León et al. (2000) para supervisionar o sistema da cidade de Sevilha na Espanha. Os autores noticiam que a aplicação do modelo especialista de apoio à decisão denominado EXPLORE resultou numa redução de custos de energia da ordem de 25%. O modelo de controle do nível de água nos reservatórios funciona com base em regras heurísticas organizadas a partir do conhecimento físico do sistema, do histórico da variação de demandas, das tarifas de

energia elétrica e da experiência prática dos operadores. O estudo resultou num sistema inteligente de definição da melhor regra de operação, como função da vazão das bombas, das demandas instantâneas e do modelo de cálculo do comportamento da água nos reservatórios.

Um programa computacional semelhante, denominado PILOTE, foi estudado por Lannuzel e Ortolano (1989), para otimizar a operação de recalque a partir de dois reservatórios de armazenamento, utilizando dez bombas de capacidades variadas que abastecem um reservatório elevado localizado num subúrbio de Paris. O programa integra um modelo matemático, com regras heurísticas, que reduzem o número de estratégias de combinações possíveis, produzindo ótimos resultados para o problema num tempo considerado razoável. Com base no consumo horário calculado estatisticamente, o PILOTE define a seqüência de descargas das várias bombas existentes para produzir um custo mínimo.

Já Zyl et al. (2004) propuseram explorar o uso do AG na área inicial do processo de convergência, onde ele apresenta grande desempenho, complementando com o método de busca direta, *hillclimber*, na região onde o AG se apresenta mais lento no processo de convergência. Testes comparativos de eficiência foram feitos com o métodos de Fibonacci, e de Hooke e Jeeves. Aplicações do modelo criado foram comparadas com o desempenho do AG tradicional, demonstrando mais agilidade e apresentando respostas de melhor qualidade quando aplicado a uma rede hipotética e a uma rede complexa em Yorkshire, Inglaterra.

Segundo o raciocínio de que a operação de sistemas de distribuição de água afeta a qualidade do líquido, Sakarya e Mays (2000) incorporaram as funções de qualidade da água presentes no *Toolkit* do EPANET2 ao método de otimização do gradiente reduzido generalizado, GRG2, para encontrar uma combinação horária de uma bomba instalada numa rede hipotética que viesse minimizar três diferentes funções objetivo: 1) desvio dos valores de concentração das substâncias químicas presentes na água em relação a valores tolerados de concentração; 2) tempo de funcionamento das bombas; 3) custo total de energia elétrica. As restrições do problema foram tratadas pelo Método Langrangiano Aumentado dentro dos termos de penalidades da função objetivo. A eficiência e a tarifa de energia foram consideradas constantes no modelo. Com essa metodologia não só as restrições hidráulicas são levadas em consideração, mas também as restrições de qualidade da água reguladas pelos órgãos governamentais. Os resultados mostraram que a otimização foi alcançada para os objetivos propostos, entretanto a

custa de muitos acionamentos e desligamentos da bomba o que torna a metodologia pouco viável de implementação prática.

Nas cidades em que mananciais subterrâneos são explorados como fonte principal de suprimento de água potável, tem-se investigado as melhores condições de operação dos vários poços construídos com aquela finalidade. Um exemplo é o estudo desenvolvido por Ribeiro (2000) na cidade paulista de Araraquara que testou a técnica dos Algoritmos Genéticos como ferramenta para definir controles operacionais para uma bateria de poços existentes de forma a minimizar os custos de energia elétrica utilizada na produção da água subterrânea. Para tanto, testou a influência da vazão bombeada, períodos de operação, capacidade dos reservatórios e demandas de água no sistema, concluindo que o AG sinalizou com soluções que melhorariam a performance operacional do sistema especialmente reduzindo os custos com energia elétrica.

Um tratamento multicriterial aplicado a programação ótima de bombas foi dado por Sotelo et al. (2001) ao considerar a minimização simultânea de quatro objetivos através de dois métodos: SPEA e NSGA. O objetivo do trabalho era otimizar o custo de energia elétrica, o custo de manutenção de bombas, o custo de recuperação do nível inicial do reservatório e o custo da demanda de potência em uma rede teórica formada por 5 bombas e 1 reservatório. Através de métricas de comparação, aplicadas aos resultados de várias aplicações, chegaram a conclusão que o SPEA supera amplamente o NSGA e a solução manual de um especialista em problemas de bombeamento.

Um outro enfoque multiobjetivo foi dado por López-Ibáñez et al. (2005) ao considerar como primeiro objetivo a ser minimizado os custos elétricos de bombeamento e como segundo objetivo a maximização do tempo médio que uma bomba fica desligada. Foi introduzida uma nova representação dos indivíduos baseado num dispositivo disparador do tempo de funcionamento de uma bomba, onde o tempo em que cada bomba é ligada e desligada é representada na cadeia por um par de inteiros $\{ t^{liga}, t^{desliga} \}$. O EPANET2 foi utilizado como simulador para verificar as restrições hidráulicas da rede e o algoritmo evolucionário multiobjetivo SPEA2 foi empregado para otimizar o problema, utilizando critérios novos de dominância e operadores genéticos adaptados. Os autores aplicaram a metodologia a uma rede hipotética utilizada por Zyl et al. (2004) e demonstraram uma significativa melhora no atendimento da função objetivo quando comparada com a técnica do Algoritmo Genético Simples.

Mais recentemente, Carrijo (2004) utilizou uma parte do sistema de distribuição de água da cidade de Goiânia – Goiás para aplicar um estudo de otimização operacional desenvolvido com dois objetivos principais: minimização dos custos de energia elétrica e maximização dos benefícios hidráulicos (índice de atendimento da demanda; níveis adequados de água nos reservatórios e as pressões mínimas e máximas nos pontos de demanda). O modelo computacional tem como base um módulo simulador, que utiliza os códigos do EPANET2; um módulo otimizador que utiliza algoritmos genéticos multiobjetivo (NSGA, SPEA, NSGA II) e um módulo indutor de regras através do algoritmo de aprendizado de máquina. Mesmo com todas as dificuldades de ordem operacional, o autor chegou a resultados alentadores pela aplicação do método a um sistema real.

Os algoritmos evolucionários multiobjetivos (MOEAs) vêm experimentando avanços na tentativa de melhorar sua performance computacional e qualidade dos resultados. Nesse contexto, vem ganhando dimensão a nova técnica de paralelização que consiste em dividir o conjunto da população do AG em subconjuntos menores que serão analisadas paralelamente pelo algoritmo em máquinas diferentes, mas interligadas. A função de aptidão é calculada iterativamente para cada subpopulação, mas há uma intensa troca de indivíduos entre elas controlada por um operador genético adequado introduzido no AG com essa finalidade. Os conceitos de paralelismo, os principais métodos multiobjetivos e as dificuldades de sua implementação num sistema real são apresentados no trabalho de Van Veldhuizen et al. (2002).

Essa técnica de fracionar as operações é particularmente recomendada para grandes sistemas de distribuição, nos quais a resposta computacional pode demandar um tempo demasiado. Lücken et al. (2004) propuseram um modelo baseado no algoritmo evolucionário paralelo para minimizar quatro funções objetivo na otimização de programação de bombas. Para efeito comparativo, investigaram o SPEA como método multicriterial seqüencial, e cinco modelos de algoritmos paralelos diferentes (MOGA, NPGA, NSGA, NSGA-II e CNSGA-II), comprovando estatisticamente que essa técnica de paralelismo, especialmente com o CNSGA-II, oferece maior número de alternativas de melhor qualidade que a técnica seqüencial por razões de melhor explorar a região de domínio do problema através de uma população de maior tamanho. Os testes foram aplicados a estação de bombeamento principal da cidade de Assunção, capital do Paraguai.

Uma vertente nova sobre o uso dos AGs em sistemas de recalque foi abordada por Brasileiro (2005) ao investigar a aplicabilidade desta técnica nos complexos problemas de bombeamento de petróleo com o objetivo de reduzir os custos com energia elétrica sujeitos a um conjunto de severas restrições, garantindo os níveis de produção e segurança. A investigação sobre o melhor escalonamento de bombas foi feita em um modelo de rede simplificada formada por 5 grupos elevatórios, mas ao final da pesquisa o modelo deverá estar gerenciando cerca de 250 bombas. Devido a grande escala do problema, a redução do tempo de processamento do algoritmo é um fator buscado no trabalho para que o controle se dê em tempo real. No AG proposto, a autora promove alterações nos operadores genéticos, classifica as restrições por ordem de severidade em vez de usar o Método de Penalidades e utiliza a técnica *seeding* para melhorar a qualidade da população inicial, demonstrando sua eficiência na aceleração de soluções do problema.

O sucesso do método de otimização utilizando Algoritmos Genéticos tem conduzido pesquisadores a investigar a aplicação dessa técnica nas mais variadas áreas de conhecimento, especialmente abrangendo os mais variados aspectos relativos a sistemas de abastecimento de água, dentre os quais inclui-se a pesquisa desse trabalho que trata da busca de soluções factíveis e econômicas em sistemas completos de adução.

CAPÍTULO 3

ALGORITMOS GENÉTICOS

Os Algoritmos Genéticos têm emergido como um método probabilístico de grande potencial para resolver problemas que exigem uma grande combinação de soluções, particularmente aqueles que tratam com a otimização de sistemas de abastecimento de água, tanto nos estudos de elaboração de projetos, como na área operacional. É uma técnica de busca aleatória, mas que usa informações dinâmicas adicionais para guiar a pesquisa para o ponto ótimo, ou seja, exploram eficientemente informações históricas para encontrar novas soluções com expectativa de melhor performance.

Tratando-se de um método de Algoritmo Evolucionário, usa os princípios naturais de evolução para solucionar problemas. A forma de busca envolve várias gerações nas quais são melhoradas as características de potenciais soluções por meio de operações inspiradas na biologia. Sua aplicação prática só se tornou viável graças à evolução dos computadores uma vez que requer um grande número de análises do problema até que se alcance a solução desejada.

Lista-se a seguir algumas das características de um algoritmo genético:

- É um algoritmo estocástico;
- Trabalha simultaneamente com uma população de soluções;
- Não requer informações adicionais da função, como por exemplo, valores de gradiente;
- São fáceis de serem implementados em computador;
- São facilmente hibridizados com outras técnicas;
- Trabalham com parâmetros contínuos ou discretos.

A técnica tem o potencial de tratar problemas tanto de objetivo único, como aqueles compromissados com vários objetivos mesmo que conflitantes. A principal desvantagem dos AGs em relação aos métodos clássicos, reside no fato de que requer

um grande número de simulações hidráulicas, o que aumenta muito o tempo de processamento. Sua implementação demanda, também, a codificação das variáveis de decisão, escolha dos métodos a serem aplicados aos operadores genéticos e definição de parâmetros genéticos próprios do problema tratado.

3.1 - Algoritmo genético simples (AGS)

Os algoritmos genéticos são métodos computacionais de busca e otimização de problemas complexos, baseados numa analogia com os mecanismos de seleção genética natural, dentro do conceito de que os organismos vivos mais adaptados asseguram uma melhor performance na busca das suas sobrevivências, tomando por base os princípios da Teoria da Evolução proposta em 1859 por Charles Darwin.

- O indivíduo mais adaptado sobrevive por mais tempo;
- As características, codificadas nos genes são transmitidas para os filhos e tendem a se propagar nas novas gerações;
- Na reprodução sexual, os cromossomos dos filhos são uma mistura dos cromossomos de seus pais;
- As características dos filhos são herdadas parcialmente de seus pais e parcialmente do resultados de novos genes criados durante o processo de reprodução

O Algoritmo Genético (AG) foi desenvolvido em 1975 por John H. Holland na Universidade de Michigan e divulgado por Goldberg (1989) através do livro “*Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*”. Esse Algoritmo Genético proposto por Holland é chamado de AG Simples, AG Padrão ou AG Canônico (AGS), sendo o resultado de um estudo que objetivava estudar formalmente o fenômeno da adaptação como ocorre na natureza, e desenvolver modelos em que os mecanismos da adaptação natural pudessem ser importados para os sistemas computacionais.

No AGS cada solução candidata para o problema presente no espaço de busca é considerada como um indivíduo, representada por uma cadeia (*string*) de caracteres binários de comprimento fixo pré-definido. Essa cadeia é chamada de cromossomo e cada símbolo presente no cromossomo é chamado de gene.

O algoritmo tem como base uma população inicial de indivíduos gerada aleatoriamente, sobre a qual se aplica ciclicamente operadores estruturados, dando origem a novas gerações de indivíduos. A pressão seletiva, que na natureza é exercida pelo ambiente, é simulada pela aplicação de uma função objetivo, que avalia a aptidão de cada indivíduo da população para solução do problema. Aqueles com maior facilidade de adaptação ao seu ambiente têm melhores probabilidades de sobreviverem e transmitirem suas características para as próximas gerações.

Para resolver um problema usando algoritmos genéticos, três coisas devem ser implementadas: 1) definir uma população de indivíduos; 2) definir os operadores genéticos; 3) definir uma função objetivo.

Devido a sua robustez, esse método é indicado em problemas complexos de otimização: com as seguintes características que não encontram muita adaptação nos algoritmos clássicos:

- envolvam um grande número de variáveis;
- mal estruturados, com condições e restrições de serem modelados matematicamente, incluindo problemas em que a função objetivo é descontínua, não diferenciável, estocástica ou contenha alto grau de não-linearidade;
- grandes espaços de busca;
- objetivos múltiplos.

Essas características normalmente estão presentes nos problemas de abastecimento de água, motivos pelos quais essa técnica tem se tornado popular no tratamento daqueles problemas.

3.2 - Estrutura básica de um algoritmo genético

O ciclo básico do algoritmo genético simples apresenta no seu módulo inicial a geração aleatória de cadeias (*strings*) de *bits* que representam as variáveis de decisão de possíveis soluções do problema (população inicial).

Posteriormente, os indivíduos dessa população são avaliados, um a um, para qualificar aqueles mais adaptados ao problema, segundo critérios de uma função de aptidão (*fitness*) conhecida. As soluções melhores qualificadas são selecionadas para troca de códigos genéticos dando origem a novos indivíduos que representam nova

seqüência de possíveis soluções para o problema. Assim, em cada nova iteração são encontradas topologias de melhor qualidade. Esse processo é chamado de reprodução e é repetido até que um critério de convergência seja alcançado. A Figura 3.1 ilustra os passos de um algoritmo genético simples.

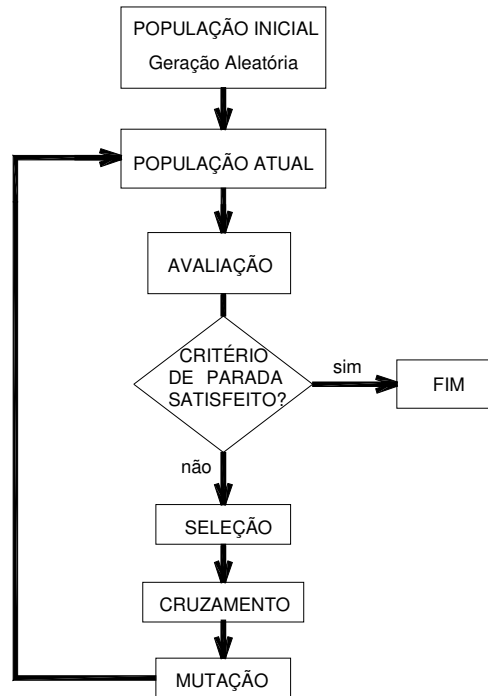


Figura 3.1 - Ciclo Básico do Algoritmo Genético Simples

O contínuo refinamento de cada solução se dá a partir da aplicação de operadores genéticos a população atual em cada geração garantindo a sua diversidade genética, pois altera aleatoriamente um ou mais componentes da estrutura escolhida. O algoritmo genético mais simples, que produz bons resultados para a maioria dos problemas práticos, é composto por três operadores que simulam a dinâmica de funcionamento dos cromossomos dos seres vivos: seleção (reprodução), cruzamento (recombinação) e mutação.

- **Seleção** - processo de escolha que favorece os membros da população mais adaptados ao meio ambiente de acordo com valores dados pela função de aptidão (*fitness*). Quanto mais adaptada uma seqüência de genes de um cromossomo maior sua chance de ser selecionada para participar da geração futura.

Os métodos de Seleção mais utilizados são:

✓ Método da Roleta, no qual indivíduos de uma geração são escolhidos para fazer parte da próxima geração, através de um sorteio de roleta. Os indivíduos são representados na roleta proporcionalmente ao seu índice de aptidão. A roleta é girada um determinado número de vezes, dependendo do tamanho da população, sendo escolhidos como indivíduos que participarão da próxima geração, aqueles sorteados na roleta.

✓ A seleção pela técnica de Torneio encontra o cromossomo melhor adaptado numa série de n elementos, comparando aleatoriamente pares desse subconjunto e escolhendo os melhores para serem cromossomos pais na próxima geração.

✓ Randômica é o método de seleção em que os cromossomos são escolhidos aleatoriamente dentro de um grupo e conduzidos para constituir a nova população.

O Elitismo é uma adição aos métodos de Seleção que força os AGs escolher os indivíduos com maior valor de aptidão da população e inserir estes indivíduos diretamente nas próximas gerações. Ao usar o elitismo, toda a população é substituída por novos indivíduos exceto aquele indivíduo que apresentou maior aptidão numa determinada geração. É um método utilizado para tentar melhorar a convergência dos AGs, pois através dele espera-se que ocorra um aumento na velocidade de dominação da população por indivíduos com elevado valor de aptidão.

▪ **Cruzamento (Recombinação)** – É utilizado após a operação de Seleção. Neste operador, o algoritmo faz uma mistura de genes entre pares de cadeias existentes com o objetivo de criar novos pares de cadeias com algumas das características genéticas de cada cromossomo pai. A recombinação simples é feita em duas etapas, ambas de forma aleatória: a primeira etapa é a escolha de quais cromossomos serão escolhidos para participar da combinação dois a dois. Baseado na probabilidade de cruzamento (p_c) definido pelo usuário, um número randômico gerado entre 0 e 1 determinará se o cruzamento ocorrerá ou não. Como exemplo, se $p_c = 0,8$ o cruzamento ocorrerá se o número randômico gerado pelo AG for menor que 0,8. Caso contrário, os cromossomos pais serão copiados. A segunda etapa é a escolha da posição

no cromossomo onde se dará o corte. Também é feita pela geração de um outro número aleatório.

As três formas mais comuns de cruzamento num AG são: cruzamento de um ponto, cruzamento de dois pontos e cruzamento uniforme.

○ Cruzamento de um ponto: o ponto de corte do cromossomo é escolhido de forma aleatória sobre a longitude da *string* que o representa (Figura 3.2). O primeiro segmento do cromossomo pai é unido com o segmento final do segundo cromossomo pai dando origem ao primeiro cromossomo filho. O segundo cromossomo filho é gerado a partir da segunda parte do primeiro cromossomo pai e da primeira parte do segundo cromossomo pai.

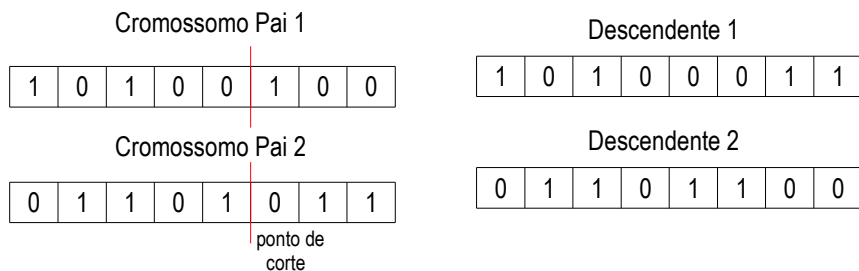


Figura 3.2 – Esquema gráfico do cruzamento de um ponto.

○ Cruzamento de dois pontos: difere do mecanismo anterior pelo fato de que são dois o número de pontos de corte escolhidos aleatoriamente (Figura 3.3).

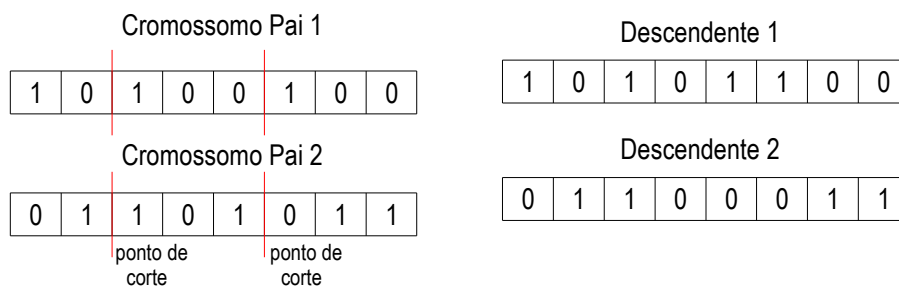


Figura 3.3 – Esquema gráfico do cruzamento de dois pontos.

○ Cruzamento uniforme: cada gene do descendente é criado copiando o gene correspondente de um dos pais, escolhido de acordo com uma máscara de cruzamento gerada aleatoriamente. Onde houver 1 na máscara de cruzamento, o gene correspondente será copiado do primeiro pai e, onde houver 0 será copiado do segundo.

O processo é repetido com os pais trocados para produzir o segundo descendente. Uma nova máscara de cruzamento é criada para cada par de pais. O número de pontos de troca de informação não é fixo mas em geral é usado $\frac{C}{2}$, onde C é o comprimento do cromossomo. A Figura 3.4 demonstra graficamente o processo.

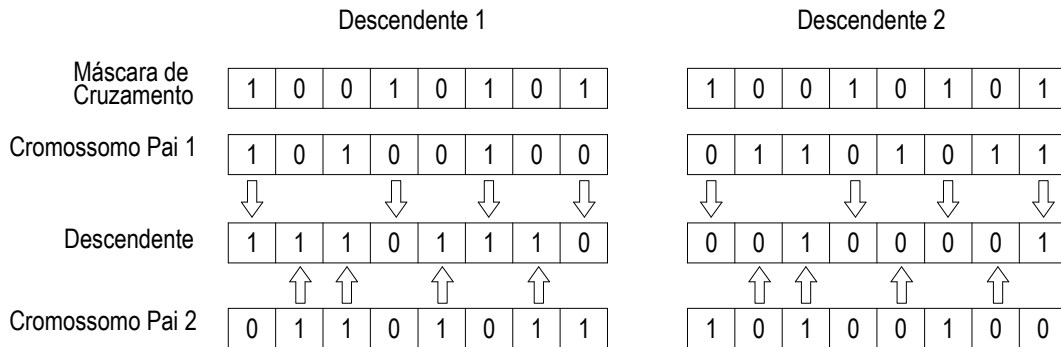


Figura 3.4 – Esquema gráfico do cruzamento uniforme

▪ **Mutação** - O algoritmo periodicamente faz trocas aleatórias ou mutações de um ou mais membros da população corrente, produzindo uma nova solução candidata pela introdução de novas características. Todos os bits dos novos cromossomos gerados no cruzamento estão sujeitos a uma probabilidade pré-definida de mutação (p_m). Um número randômico é gerado entre 0 e 1 que comparado com o valor de p_m definirá ou não a ocorrência da mutação que consistirá na troca do valor do *bit* de 0 por 1 ou vice-versa, na codificação binária (Figura 3.5). Essa movimentação aleatória pelo espaço de busca, pode ajudar a manter a diversidade da população.

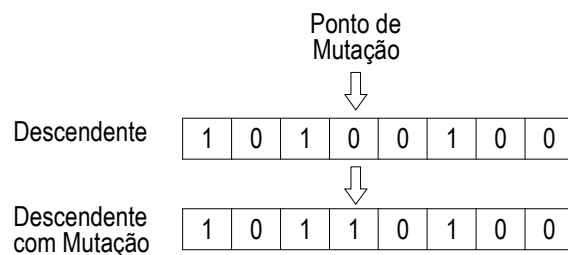


Figura 3.5 – Esquema gráfico de mutação simples

Dentro do ciclo do AG, os três operadores, descritos acima, são repetidos iterativamente para criar novas populações mais adaptadas até que alguma condição de parada pré-definida seja alcançada. O efeito decorrente da escolha inadequada desses

parâmetros afeta negativamente o desempenho do AG que pode caminhar para uma convergência prematura, ocorrer uma estagnação de busca, ter o tempo computacional elástico ou até a não convergência para uma solução viável.

Uma desvantagem desse método é a chamada evolução em avalanche, fenômeno que acontece quando alguns indivíduos relativamente bem mais adaptados que os demais, rapidamente se reproduzem, de modo que cópias dele e de indivíduos muito similares formam uma grande fração da população. Com isso, há redução da diversidade populacional, acarretando uma convergência prematura do AG para um mínimo local convertendo o algoritmo numa busca lenta. Esse fenômeno é mais comum no início do processo de convergência.

3.3 - Avaliação da função de aptidão

A função de aptidão (*fitness*) é determinante para a obtenção de uma boa solução para o problema, pois é a maneira de avaliar o quanto o indivíduo é bom em relação aos demais membros da população. Os valores obtidos serão usados para seleção dos mais aptos para compor a próxima geração. Na implementação dessa função devem ser respeitadas eventuais limitações do espaço de busca que são específicas de cada problema.

Grande parte do tempo computacional gasto no processo de otimização é gasto nessa função, pois ela é calculada para cada indivíduo de cada população ao longo das sucessivas gerações.

O algoritmo genético tem provado ser muito eficiente para resolver vários problemas de busca estocástica. Apesar de sua natureza aleatória, o ganho qualitativo em cada geração indica que o algoritmo efetua uma pesquisa bem direcionada. A performance dos AGs pode ser visualizada pelo gráfico da Figura 3.6, no qual percebe-se que o algoritmo tem uma convergência muito rápida no início do processo e bem mais lenta quando a convergência se aproxima da solução global. Essa característica enfatiza a sua adequação para resolver problemas complexos onde a robustez do método empregado é fundamental. Já para encontrar valores exatos pode ser que não seja a técnica mais adequada.

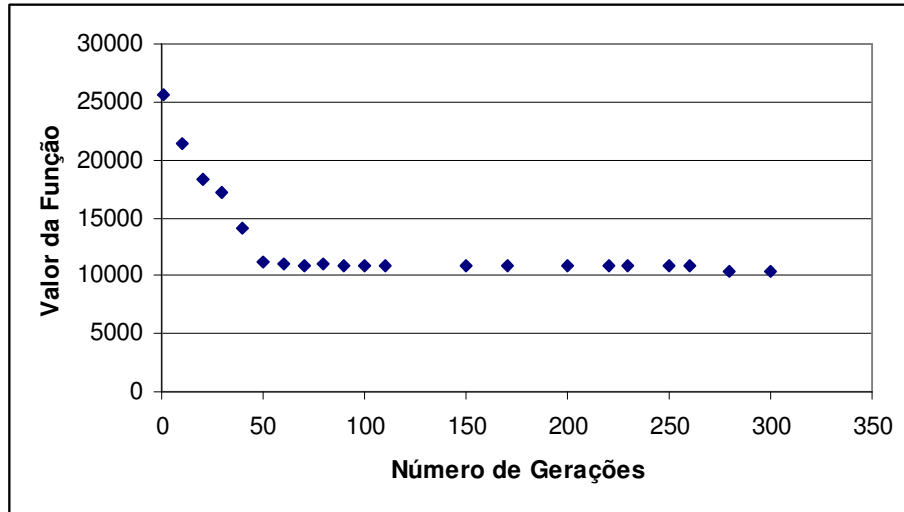


Figura 3.6 - Performance de um AG ao longo de cada geração.

3.4 - Tipos de algoritmos genéticos

De acordo com a maneira como se dá a formação dos novos indivíduos a cada geração em substituição aos indivíduos antigos, os algoritmos são classificados em dois tipos básicos: o geracional (*generational*) e o permanente (*steady-state*). No tipo geracional, a cada geração o algoritmo cria uma população inteiramente nova a partir da aplicação dos operadores genéticos. Não há sobreposição entre as gerações e opcionalmente o elitismo pode ser empregado. No tipo permanente, apenas uma parte dos indivíduos é trocada a cada geração, sendo um parâmetro do usuário.

3.5 - Critérios de parada

Como critérios de parada do algoritmo evolutivo, em geral, são usados a limitação do número de gerações que serão produzidas. Outro critério envolve, a homogeneidade da população, isto é, quando o desvio-padrão da aptidão de uma população é menor que um dado valor (próximo de 0), então o processo de geração de novas populações termina. O tempo de processamento computacional também pode ser um critério de parada na busca da solução mais adaptada.

3.6 - Representação cromossômica

Quando se pretende utilizar o Algoritmo Genético num problema de otimização deve-se decidir inicialmente como os parâmetros envolvidos serão representados nos genes das cadeias constituintes da população, ou seja, é preciso definir preliminarmente o tipo de código ou alfabeto que melhor se ajusta aquele problema específico.

No algoritmo genético padrão a codificação dos dados é feita por uma seqüência de dígitos binários 0's e 1's e o comprimento da cadeia é constante durante o processo evolucionário. Essa representação apresenta inúmeras vantagens no decorrer do processo de otimização como tornar as operações genéticas mais fáceis de serem executadas; tornar possível o trabalho com variáveis que assumam valores contínuos; facilitar a variação da faixa de trabalho dos parâmetros; além de apresentar relativa simplicidade na variação da precisão dos valores de cada parâmetro, muito embora também apresente certas limitações que inviabilizam a sua escolha. Na Figura 3.7 pode ser visto um exemplo de codificação binária com duas casas, abrindo espaço para quatro possibilidades de parâmetros para cada casa.

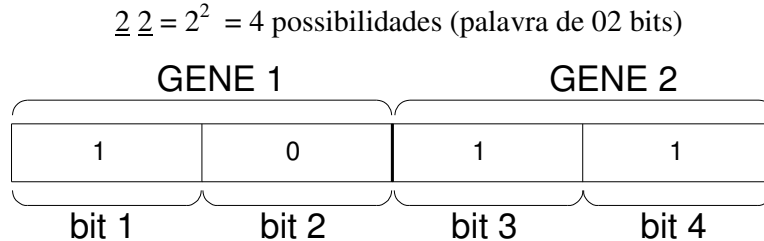


Figura 3.7 – Exemplo de codificação binária.

Quando levada à prática nos problemas em que a busca se dá em espaços contínuos e que se necessite de grande precisão, essa codificação torna-se muito extensa, exigindo grande tempo computacional para apresentar uma solução desejável. Além disso, não se pode pormenorizar o ajuste fino da solução do problema, fazendo com que a resposta não seja bem representada.

Para os casos em que o emprego do alfabeto binário se torna inadequado, foram criadas formas não-clássicas de codificação dos cromossomos, dentre elas a codificação real (Figura 3.8). Nela um gene ou um cromossomo, é representado através de seu próprio valor real. Os valores dos genes são mantidos dentro de um intervalo

estabelecido pelas variáveis que eles representam. Naturalmente para cada representação deve haver operadores genéticos correspondentes.

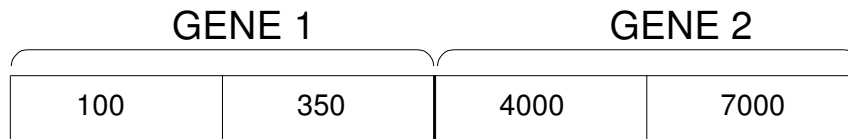


Figura 3.8 – Exemplo de codificação real.

Para escolher a melhor codificação é interessante que se observe em qual linguagem de programação os AGs serão implementados, pois caso trabalhe com números binários, a velocidade de processamento será maior com aquela codificação. Caso contrário, deve-se optar pela codificação real para evitar a decodificação a cada verificação da função de aptidão.

Na codificação real a ação dos operadores genéticos se dá de forma diferente, uma vez que a manipulação entre genes se dá em forma de funções matemáticas e não mais entre bits 0 e 1.

3.7 - Soluções híbridas e alternativas

Embora os Algoritmos Genéticos tenham um caráter genérico, existem problemas com alto grau de complexidade em que os AGs não apresenta soluções satisfatórias. Nos últimos anos pesquisadores têm proposto modificações nesses algoritmos, incorporando técnicas de busca local ou ferramentas de outras metaheurísticas, tais como: *Simulated Annealing*, *Tabu Search*, *Scatter Search* e AGs Paralelos (AGPs). Essas versões híbridas combinam de forma equilibrada o caráter genérico e simplista dos AGs convencionais com técnicas especializadas e mais sofisticadas.

MODELAGEM DO PROBLEMA

De uma maneira geral os sistemas adutores de abastecimento de água apresentam-se com uma topologia de rede hidráulica aberta, apresentando nas suas extremidades finais unidades de reservação que são as responsáveis pela regularização e suprimento de água às redes de distribuição. Muitas vezes uma mesma linha adutora interliga, de forma permanente ou temporária, vários centros de distribuição de água, com regime de demanda particular, o que dificulta ainda mais o entendimento das inter-relações hidráulicas. O desenho esquemático da Figura 4.1 ilustra uma situação desse tipo.

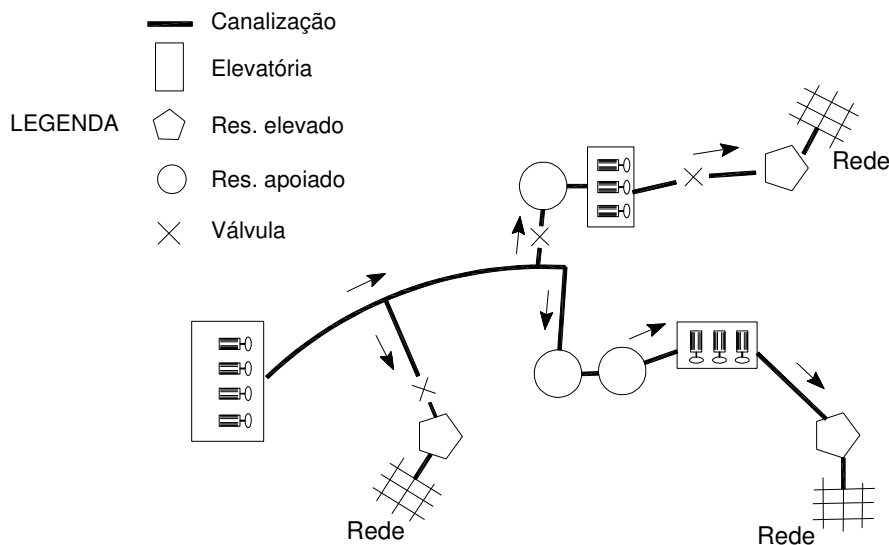


Figura 4.1 – Esquema de um sistema adutor

Cada elevatória do sistema poderá abrigar diversas bombas que funcionarão isoladamente ou associadas, acarretando diversas combinações de operação. A vazão instantânea em cada trecho da rede de condutos é função, principalmente, do número de bombas em operação e, também, do grau de abertura das válvulas de controle de fluxo,

fatores que, juntamente com a variação de demanda horária, influem fortemente na carga piezométrica das unidades de reservação.

4.1 - Pesquisa proposta

O problema pesquisado neste trabalho utiliza os recursos da pesquisa operacional, auxiliado por um modelo de simulação hidráulica, para otimizar uma função objetivo de natureza não-linear restrita, na busca da melhor regra de operação a ser aplicada a um sistema adutor concreto, conhecidas a demanda de consumo e as condições de contorno inicial. Da hidráulica do sistema, após o reservatório de distribuição, só é considerada a variação de demanda com o tempo, concentrada no nó inicial da rede. Tratando-se de um estudo sobre um sistema físico, funcionando regularmente, é suposto que as condições de pressão mínima e máxima na rede de distribuição são satisfeitas para qualquer valor de nível de água no reservatório.

A solução eleita deve ser aquela que minimize os custos de operação mais relevantes, que são aqueles relativos a energia elétrica e manutenção das bombas, respeitando as restrições de ordem hidráulica, físicas e operacionais particulares do sistema. O custo energético considerado deve englobar a parcela de consumo e a parcela de demanda de potência.

Para tanto, considerou-se um horizonte de planejamento de 24 horas com possibilidade de alteração de estado dos componentes, apenas, a cada hora. O modelo matemático está moldado para representar as unidades do sistema físico estudado, Sistema Adutor Marés, podendo sofrer adaptações para estudos semelhantes em sistemas maiores e mais complexos.

O termo otimização pode ser definido com sendo o processo de encontrar a melhor solução para um problema que tenha muitas soluções possíveis e programação ótima pode ser definida como aquela regra operacional que atenda às restrições do problema e otimize os objetivos estabelecidos.

Na rotina de um Centro de Controle Operacional - CCO, decisões são tomadas a cada hora pelo operador sobre a melhor configuração a ser atribuída ao estado de cada bomba e válvula do sistema. A opção por uma determinada alternativa operacional deixa de lado muitas outras que poderiam, também, ser tecnicamente viáveis e até mais econômicas para a empresa, mas que essa vantagem não tem como ser mensurada por falta de ferramentas apropriadas para esse fim. Com isso, deixa-se de

buscar a melhor solução operacional e o termo otimização não é aplicado como objetivo a ser perseguido. Hoje, essa é a realidade da quase a totalidade dos sistemas públicos de abastecimento de água no Brasil.

4.2 - Uso de modelos em abastecimento de água

O grande número de parâmetros que podem intervir no processo decisório de escolha da melhor política operacional, torna a sua análise um problema combinatorial complexo, impossibilitando os gestores de pesquisar regras diárias que possam melhorar a performance do sistema e a vida financeira das empresas que exploram os serviços públicos de abastecimento de água. Pela natureza complicada do problema, conclui-se que a busca da solução de custo mínimo, só se torna possível com auxílio de modelos computacionais formulados a partir de algoritmos matemáticos, preferencialmente de fácil aplicabilidade.

A inexistência desses modelos faz com que operadores continuem a se valer de técnicas heurísticas para administrar os sistemas numa rotina diária quase repetitiva.

Sabendo-se que um sistema em operação não deve ser tratado como um laboratório de ensaios, alguns técnicos envolvidos com tomadas de decisão, vem empregando modelos de simulação hidráulica que são instrumentos computacionais capazes de diagnosticar as conseqüências de suas ações no manuseio dos componentes do sistema. Com o acelerado avanço verificado nos recursos computacionais tem-se verificado um gradativo aumento na freqüência de acesso àqueles modelos pela facilidade de inserção de dados e riqueza dos resultados apresentados, tanto em forma tabular, como na forma gráfica. O uso desses simuladores hidráulicos melhora a produtividade do trabalho e confere melhor precisão as questões solicitadas.

Na pesquisa desenvolvida neste trabalho, onde a gestão futura do sistema faz parte do modelo pesquisado, é imprescindível a escolha de um simulador calibrado como suporte de análise das várias soluções pesquisadas, em que os resultados por ele encontrados corresponderiam àqueles esperados numa operação do sistema real.

Segundo Pizzo e Luvizotto Jr (2001), pode-se desenvolver modelos detalhados de sistemas reais, verificando seu desempenho sob várias condições de carga, ajustá-los a fim de obter o melhor comportamento global, e então utilizá-los como ferramenta de pesquisa para examinar os impactos das simulações e a sensibilidade do modelo às diferentes condições.

De acordo com Ormsbee e Lansey (1994) um sistema de controle ótimo de bombeamento deve contar com três componentes principais: um modelo de otimização, um modelo hidráulico e um modelo de previsão de demanda. Seguindo esse raciocínio, apresenta-se a seguir as bases de formulação do modelo proposto para otimização da programação de bombas e válvulas em sistemas adutores.

4.2.1 - Modelos de otimização

Matematicamente, a busca da operação ótima de bombas e válvulas em um sistema de abastecimento de água real é encarada como um problema de elevada complexidade, pelo fato de envolver um grande número de variáveis de decisão, muitas equações de natureza não-linear, restrições próprias de cada sistema, além de muitos parâmetros de natureza hidráulica e elétrica. Funcionalmente, trata-se de um problema de investigação do comportamento do sistema devido a mudanças das variáveis de decisão em intervalos de tempo pré-definidos ao longo de certo horizonte operacional.

Os modelos de otimização empregados para solucionar esse tipo de problema devem, potencialmente, possuir as seguintes qualidades:

- suportar variáveis discretas adequadas as variações de estado das válvulas (aberta/parcialmente aberta /fechada) e bombas (ligada/desligada);
- suficiente robustez para tratar problemas integrados com múltiplas estações de bombeamento, grupos elevatórios de características e associações diversas, múltiplos reservatórios de armazenamento e distribuição com diferentes formatos, diversos perfis de demanda diária, além de vários elementos controladores de fluxo distribuídos pelo sistema;
- tratar de problemas com funções não-lineares e com vários objetivos;
- deve ser eficiente e confiável na busca da solução de custo mínimo;
- permitir sua interação com modelos de simulação hidráulica;
- ser de fácil implementação para que tenha aceitação no campo da engenharia;
- aceitar com facilidade mudanças topológicas na rede e que a busca intensiva da melhor regra operacional se dê num curto espaço de tempo.

Como já exposto no Capítulo 2, a literatura apresenta várias modelos determinísticos e estocásticos na tentativa de resolver problemas operacionais de otimização em sistemas de abastecimento de água. Todos apresentam certo grau de

sucesso e limitações, dependendo dos objetivos a serem alcançados e da complexidade do sistema analisado.

A rotina diária dos sistemas de abastecimento de água, via de regra, é marcada por imprevistos que exigem dos operadores tomadas de decisão de grande responsabilidade, já que uma manobra mal calculada pode acarretar prejuízos temporários a milhares de consumidores. Dentre os fatores mais comuns que acarretam inesperadas mudanças de rumo operacional, destacam-se: interrupção no fornecimento de energia elétrica; vazamentos nas redes de distribuição; quebra de uma das bombas; insuficiência de produção da ETA e rompimento de adutora. Os modelos matemáticos convencionais pesquisados não apresentam flexibilidade suficiente para se adaptar a essas súbitas mudanças de comportamento do sistema, além de apresentarem grande complexidade analítica o que dificulta sua aplicação na vida operacional das empresas do setor.

4.2.1.1 - Modelagem proposta

O cenário de um problema para definição de estratégias ótimas de operação em sistema de abastecimento de água, onde a regra mais comum é a de avaliar o comportamento do sistema e tomar decisões a cada hora, requer uma grande demanda computacional para resolver o modelo. Dentre os vários métodos de otimização disponíveis, o Algoritmo Genético (AG) vem merecendo uma grande aceitação na área de recursos hídricos, oferecendo uma grande flexibilidade na exploração do espaço de busca, aliado ao uso de variáveis contínuas ou discretas. Além disso, a técnica é de fácil manipulação e pacotes computacionais de código aberto podem ser encontrados no meio especializado, o que facilita a sua conectividade com modelos de simulação.

Por conseguinte, na formulação da interface OTIMIZE, optamos em testar essa metodologia, decidindo pelos AGs, tipo elitista, na sua forma convencional, denominados Algoritmos Genéticos Padrão ou Simples ou Canônico (AGS), que será acoplado a um programa simulador EPANET2 (Rossman, 2000), que analisará a consistência hidráulica das inúmeras soluções potencialmente candidatas a resolver o problema, conforme ilustra a estrutura computacional mostrada no esquema da Figura 4.2.

No desenvolvimento do modelo os dois módulos trabalharão em conjunto de forma que a rotina de simulação hidráulica seja chamada para simular cada alternativa

operacional, uma após outra, geradas por uma função do Algoritmo Genético, na busca de alternativas de melhor performance. Se considerarmos o aspecto de que cada módulo emprega técnicas matemáticas distintas, no seu processo de convergência, a interface OTIMIZE pode ser considerada como um modelo híbrido, uma vez que, combina um modelo de busca aleatória (AG) e um modelo clássico de resolução de um sistema de equações (EPANET).

Essa técnica de integração desses dois módulos vem se tornando rotineira nas investigações sobre otimização de sistemas de abastecimento de água, já tendo sido noticiada por Su et al. (1987) num estudo relativo à otimização de reabilitação de redes, ocasião em que foi usado o KYPIPE como simulador e o GRG2 como modelo de otimização. Mais recentemente esse acoplamento vem sendo explorado, principalmente nas investigações relativas a projetos de redes de distribuição, destacando-se Simpson et al. (1994), Dandy et al. (1996), Lippai et al. (1999), Wu e Simpson (2001), Rey et al. (2004), entre outros.

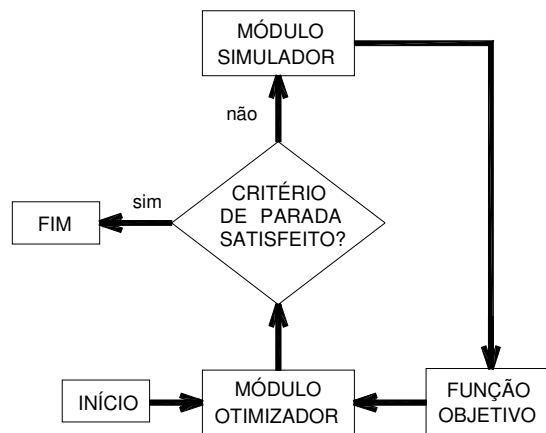


Figura 4.2 - Estrutura computacional do modelo

Com essa combinação pretende-se analisar a eficiência dos Algoritmos Genéticos Simples na definição de estratégias computacionais viáveis de serem aplicadas em sistemas de abastecimento de porte médio.

O modelo matemático empregado neste trabalho tem uma só função objetivo, representada pelos custos de bombeamento, sujeita às restrições próprias do sistema, tomando por base o custo unitário das tarifas de consumo e de demanda. O modelo deverá perseguir a redução do bombeamento nos horários de maior custo e

explorar a aplicação de tarifas diferenciadas de energia aplicadas ao setor pelas concessionárias de energia elétrica.

Ao modelo deve estar associada à noção da confiabilidade do sistema, definida por Lansey et al. (1989) como a probabilidade que o sistema realize satisfatoriamente sua missão dentro de limites específicos, para um dado período de tempo. Sob esse aspecto, Walsky (1993) comenta que a melhor solução pode não ser a solução de custo mínimo, mas alguma solução de baixo custo com viabilidade operacional aceitável. Essa colocação é fundamental nos processos de otimização dos procedimentos operacionais para que o produto resultante do modelo seja uma solução factível de ser implementada e não apenas uma solução teórica sem sustentação no mundo real.

Fiel a esse raciocínio, este trabalho além de propiciar a modelagem de um problema complexo e desenvolver uma metodologia que busca uma solução custo mínimo de bombeamento, também tem o objetivo de verificar, por meio de simulações, a viabilidade da sua implantação em um sistema existente.

4.2.2 - Definição das variáveis

No problema tratado, a função objetivo é bem definida e traduzida pela minimização dos custos de energia elétrica relativos ao bombeamento de um sistema completo de adução. Nesse trabalho se pretende ajustar um escalonamento de bombas e válvulas, baseado em parâmetros científicos para um sistema adutor real, de forma que num determinado intervalo de tempo, algumas bombas deverão estar funcionando, mas outras não. Além disso, algumas válvulas deverão estar totalmente abertas, totalmente fechada ou parcialmente abertas. Assim, a programação ótima investigada significa encontrar a melhor combinação, operacionalmente factível, desses dispositivos, a cada intervalo de tempo, ao longo de um horizonte operacional, de forma a resultar num custo energético mínimo.

Os trabalhos investigativos que buscam a eficiência energética de estações de bombeamento normalmente modelam o algoritmo de forma a encontrar a melhor combinação de bombas que resulte numa solução de custo mínimo. Entretanto, na prática, os dispositivos de regulagem de vazão oferecem resistência ao escoamento, influenciando consideravelmente no valor da potência solicitada ao motor de acionamento das bombas e conseqüentemente nos custos de consumo de energia elétrica do sistema.

Pela relevância que esse fato representa dentro do contexto dessa pesquisa, a função objetivo que definirá a melhor regra operacional considerará como variáveis de decisão:

- a) Estado operacional das bombas hidráulicas;
- b) Grau de abertura das válvulas de controle.

A eficácia da convergência dos Algoritmos Genéticos para encontrar a solução ótima ou próxima da ótima, depende substancialmente da complexidade da função objetivo representativa do problema. Dentro do processo de convergência do AG, essa função é iterativamente utilizada para avaliar a qualidade da solução de cada cromossomo ao longo da simulação dinâmica, até que a estratégia ótima seja identificada. Num problema de minimização, o valor da função será tão maior quanto pior for a solução proposta.

É fundamental que os códigos que descrevem essa função possam ser executados rapidamente para não acarretar em lentidão no processamento computacional do algoritmo como um todo, podendo tornar inviável uma tomada de decisão num tempo disponível restrito.

4.2.3 - Definição da função objetivo

Uma elevatória pode ser designada como uma edificação destinada a abrigar um conjunto de bombas, motores, canalizações, válvulas e peças especiais para, trabalhando em conjunto, fornecer meios para elevar o líquido até um ponto de maior elevação. O custo de bombeamento está associado, principalmente, a potência dos motores de acionamento e o custo associado a manutenção.

Denomina-se potência motriz a potência fornecida ao motor de uma bomba para que a vazão de líquido desejada seja elevada a certa altura estabelecida com um certo rendimento esperado (equação 4.1). Parte dessa potência é dissipada no motor elétrico, de forma que, a potência transferida ao eixo da bomba (PE) tem valor um pouco menor que a potência motriz. Por sua vez, a potência hidráulica transferida ao líquido (PH) é uma fração da potência de eixo, devido as perdas de energia que ocorrem nos componentes das bombas desde o bocal de entrada até o bocal de saída.

$$PM = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_m}{\eta} \quad (4.1)$$

onde, PM = potência motriz absorvida pelo motor (N.m/s); γ = peso específico do líquido (N/m³); Q = vazão recalçada (m³/s); H_m = altura manométrica total (m) e η = rendimento global ($\eta = \eta_m \cdot \eta_b$).

A relação entre a energia cedida ao eixo da bomba e a energia fornecida inicialmente ao motor é denominada de rendimento mecânico do motor (η_m). A relação entre a energia cedida ao rotor e a recebida pelo eixo da bomba é denominada de rendimento mecânico da bomba (η_b). Rendimento global (η), representa o rendimento do conjunto motor-bomba, definido como a relação entre a energia cedida pelo rotor ao líquido (que resulta na potência de elevação) e a fornecida inicialmente ao motor.

Os valores de rendimento dos motores e das bombas são, normalmente, fornecidos pelos fabricantes em termos percentuais.

A transformação de energias verificada num conjunto elevatório pode ser visualizada no esquema da Figura 4.3.

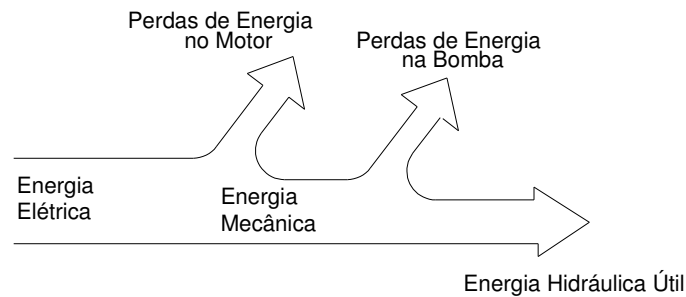


Figura 4.3 – Esquema das demandas de energia num conjunto bomba-motor.

O custo do consumo de energia elétrica de uma bomba para dado intervalo de tempo, função da potência motriz e da tarifa cobrada, é dada por:

$$C_b = PM \times TC \times \Delta t \quad (4.2)$$

onde, C_b é o custo energético (R\$); PM é a potência motriz (kW); TC é o custo unitário da tarifa de consumo (R\$/kWh) e Δt é o intervalo de tempo (h).

No modelo hidráulico estudado, a entrada de água nos reservatórios é do tipo afogada, havendo variação constante da altura geométrica de recalque, (H_g), função do nível de água nos reservatórios, o que provoca deslocamentos da curva do sistema a cada instante da simulação, segundo representação esquemática da Figura 4.4. Dessa

forma, a altura manométrica é variável com o tempo, fazendo com que as bombas trabalhem sob diferentes condições de vazão e rendimento.

É importante ressaltar que mudanças nestas duas grandezas, a cada intervalo de tempo, provoca alteração no valor do cálculo da potência motriz (eq. 4.1) e conseqüentemente no custo energético calculado pela equação 4.2. Tsutiya (2005) lembra que o motor fornece somente o que lhe é solicitado pela carga acionada. Se um motor de 100 CV aciona uma bomba que solicita 20 CV, ele fornecerá no seu eixo somente 20 CV.

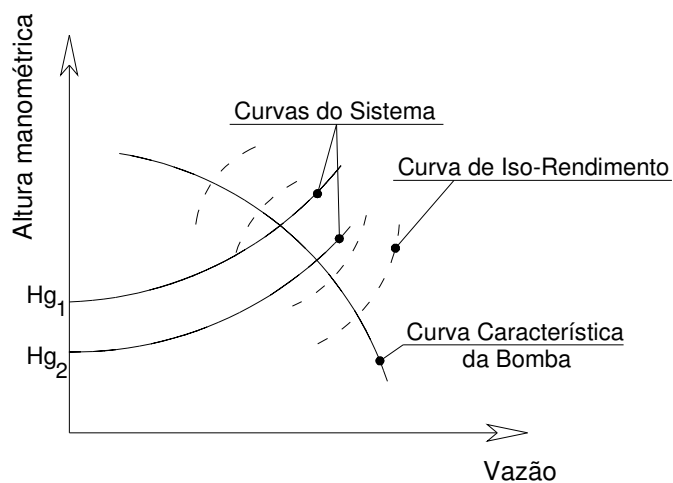


Figura 4.4 – Curva do sistema para diferentes cargas.

A equação da curva característica de uma bomba, ($H_m \times Q$), e o seu rendimento, ($\eta \times Q$), podem, segundo Macintyre (1987), serem representadas sob a forma:

$$H_m = A_1 \cdot Q^m + B_1 \cdot Q + C_1 \quad (4.3)$$

$$\eta = A_2 \cdot Q^n + B_2 \cdot Q + C_2 \quad (4.4)$$

onde A_1 , A_2 , B_1 , B_2 , C_1 , C_2 , são coeficientes de interpolação. É comum, fazer-se um ajuste de polinômios de grau dois aos expoentes m e n dessas equações.

Se NB é o número de bombas e NE é o número de bombas no sistema de adução, e NE é o número de elevatórias, então o custo energético de bombeamento (C_b) em NT períodos de tempo, será representado genericamente por:

$$C_b = \sum_{i=1}^{NB} \sum_{t=1}^{NT} [custo\ consumo(i,t)] + \sum_{i=1}^{NE} custo\ demanda(i) \quad (4.5)$$

Considerando que a cada elevatória (unidade consumidora) possa estar associada uma estrutura tarifária própria com tarifas diferenciadas de energia em DD divisões do dia, a função objetivo pode ser expressa pela equação 4.6.

$$C_b = \sum_{b=1}^{NB} \sum_{t=1}^{NT} \left\{ \frac{9,81 \times Q(b,t) \times Hm(b,t) \times TC(b,t) \times \Delta t}{\eta(b,t)} \right\} + \sum_{i=1}^{NE} \sum_{d=1}^{DD} \{TD(i,d) \times \max_dem(i,d)\} \quad (4.6)$$

onde, C_b = custo energético total (R\$); $Q(b,t)$ = vazão bombeada (m^3/h); $Hm(b,t)$ = altura manométrica total desenvolvida pela bomba (m); $TC(t)$ = tarifa de consumo (R\$/kWh); $TD(i,d)$ = tarifa de demanda (R\$/kW); $\max_dem(i,d)$ = demanda máxima calculada (kW); $\eta(b,t)$ = rendimento do conjunto elevatório. O termo t corresponde a hora do dia, b refere a uma bomba particular, i está associado à determinada unidade consumidora, e d é a divisão do dia (horário ponta/fora de ponta).

Para as estruturas tarifárias Convencional e Horo-sazonal Verde, a variável DD da equação 4.6 é igual a 1, já que a tarifa de demanda é única para o horário de ponta e fora de ponta. Para a estrutura horo-sazonal Azul existirá duas demandas máximas a serem calculadas pelo modelo: uma correspondente ao horário fora de ponta e a outra no horário fora de ponta, e assim, $DD = 2$.

Em condições normais de operação, o rendimento dos motores elétricos (η_m) se mantém em patamares elevados. Nesse trabalho os motores elétricos foram imaginados com um rendimento de 85%.

A equação 4.6 representa a formulação da função objetivo, incorporada aos códigos da interface computacional OTIMIZE para ser submetida ao processo de minimização pelo Algoritmo Genético.

4.2.4 - Definição da função de aptidão

Num problema típico de planejamento operacional de estações elevatórias, enquanto bombas com diferentes capacidades recalcam água para vários reservatórios para atender determinados objetivos, restrições físicas e operacionais do sistema devem

estar contidas entre limites. A natureza dessas restrições é própria de cada sistema físico estudado.

Como o Algoritmo Genético não trata diretamente com problemas de otimização que contenham funções restritivas, esse impedimento nos modelos de minimização pode ser contornado empregando-se o Método de Penalidades, no qual as restrições existentes no modelo real são adicionadas à função objetivo em termos de penalidades, convertendo o problema inicialmente restrito em um problema irrestrito. Dessa forma, a função de aptidão será constituída de dois termos principais:

$$\text{Função de aptidão} = \text{Função objetivo} + \text{termos de penalidade} \quad (4.7)$$

Esse artifício permite que as soluções não-factíveis permaneçam na população, porém aplicando-se a elas penas adequadas, mas que não venham ocasionar a desestabilização do algoritmo.

Matematicamente, o problema original de minimização da função objetivo (FO), com restrições é do tipo,

$$\text{Minimize: } FO(X) \quad (4.8)$$

$$\text{sujeito a: } g_r(X) \geq 0, \quad r = 1, 2, \dots, n_r \quad (4.9)$$

$$\text{onde } X = \{ x_1, x_2, \dots, x_n \} \quad (4.10)$$

n = número total de variáveis de decisão

n_r = número de restrições

Aplicando-se o Método de Penalidades, a formulação inicial do problema é transformada em:

$$\text{Minimize: } \phi(X, r) = FO(X) + \sum_{r=1}^{n_r} r_r \cdot y(g_r) \quad (4.11)$$

onde, $y(g_r)$ é calculada usando funções de penalidades que representam as violações ocorridas para cada solução candidata.; FO é a função objetivo original; r_r é um termo positivo que controla o grau de penalidade aplicada a cada função restritiva; e $\phi(X, r)$ é a função objetivo transformada (função de aptidão ou pseudo-função objetivo).

Neste trabalho adotou-se o critério de tratar as soluções fora da região factível como incompletas e então avaliar o custo adicional de transformar essa solução em uma solução factível considerando todos os membros de cada geração. Se todas as restrições são satisfeitas, não há penalidades a ser aplicada, então a função de aptidão equivale à função objetivo original. Portanto, expressamos cada restrição do problema em termos financeiro de forma a que as unidades dos dois termos da função de aptidão sejam homogêneas.

No caso de restrições virem a ser violadas, as soluções mais distantes do ponto ótimo precisariam de um custo maior para se enquadrar na região viável do domínio da função, enquanto os pontos localizados próximo da fronteira seriam enquadrados com um custo relativamente pequeno. A magnitude desses custos serve de informação para o AG ordenar os pontos para condução de uma solução aceitável.

4.2.4.1 - Construção das funções de penalidades

Devem ser incorporados na função de aptidão todos os tipos de ocorrência que mereçam penalidades em uma possível solução do problema. Nos sistema de abastecimento de água têm-se muitas restrições de ordem física e operacional, algumas até complexas de serem quantificadas monetariamente, como é o caso dos custos de manutenção das bombas. De acordo com Ormsbee e Lansey (1994), as restrições que normalmente estão associadas a esse tipo de problema dizem respeito as limitações físicas do sistema, as leis físicas de escoamento e as limitações impostas por agentes externos. O volume máximo que um reservatório pode armazenar, os estados de bombas e válvulas, a capacidade hídrica do manancial são exemplos do primeiro tipo de restrição; as limitações de escoamento são referidas a conservação da massa no nós da rede e a conservação da energia nos anéis da rede. Também nesse item pode ser inserida a relação entre perda de energia e vazão nos condutos, válvulas e bombas; as limitações externas são os valores de pressão e demandas a serem atendidas. Outras restrições podem ser acrescidas ao modelo em função do objetivo a ser alcançado.

Para o problema de otimização operacional do sistema adutor Marés será considerado satisfatório o plano operacional apresentado pela rotina OTIMIZE quando as três funções restritivas abaixo forem atendidas:

1) Função custo de manutenção das bombas, (g_1): trata-se de um custo de difícil mensuração e aplicação em modelos matemáticos e que pode ser relevante dentro do planejamento ótimo operacional das estações de bombeamento. Lansey e Awumah (1994) introduziram um critério indireto de avaliar esse item relacionando-o ao número de vezes que a bomba venha a ser acionada. Quanto mais vezes ela for posta em ação durante um ciclo de operação maior será seu desgaste.

Pelo referido critério a penalidade somente é aplicada se a bomba não estava operando num certo período de tempo e foi acionada para o período seguinte. Quando não há mudança de estado da bomba entre dois intervalos de tempo sucessivos ou então ela é desligada, o algoritmo não deve contar como acionamento de bomba. Com este juízo, o custo de manutenção pode ser minimizado pela redução do número de acionamento de bombas.

Neste trabalho adotou-se que cada bomba poderia ser acionada três vezes por dia sem haver acréscimo de penalidades na função de aptidão. A partir do quarto acionamento a restrição é considerada violada, sendo então aplicada a penalidade, segundo a função:

$$g_1 = \lambda_1 \sum_{b=1}^{NB} \sum_{t=1}^{NT} NA(b,t) \quad (4.12)$$

onde λ_1 é o grau penalidade a ser aplicada à função de restrição; NA é o número de acionamentos da bomba; NB o número de bombas e NT o número de intervalos de tempo.

2) Função custo de recuperação do estado inicial, (g_2): essa restrição é estabelecida para que no final do horizonte de planejamento operacional o sistema apresente as mesmas condições hidráulicas iniciais, visando garantir a continuidade da operação em períodos subsequentes. Segundo Cohen (1982) e posteriormente Goldman e Mays (1999), a otimização de uma rede de abastecimento ao longo de um período estabelecido, não tem significado se não se leva em conta a periodicidade na operação, o que significa uma maneira de impor que o estado final seja o mesmo do estado inicial nos reservatórios.

Para atender essa condicionante foi desenvolvida uma função de custo para penalizar a função de aptidão caso os níveis de água nos reservatórios não atinjam seus valores iniciais, fazendo com que o sistema tente recuperar o déficit, D_f , de volume no

próximo ciclo, aumentando os custos com energia elétrica. Esse custo tem como base o déficit de volume apurado entre o instante inicial e o instante ao final do período de operação para um reservatório, i , calculado como:

$$Df_i = A_i \times (h_{ini} - h_{fin}), \quad h_{fin} < h_{ini} \quad (4.13)$$

$$Df_i = 0, \quad h_{fin} \geq h_{ini} \quad (4.14)$$

onde A_i é a área da seção transversal do reservatório e h_{ini} e h_{fin} são os níveis de água no reservatório i , no início e no fim da simulação, respectivamente.

De posse do déficit calculado e do intervalo de tempo estimado para completar esse volume, calculado pela expressão, $\frac{Df}{Q}$, o custo de bombeamento correspondente, pode ser calculado pela equação 4.2.

A função de penalidade, será dada por:

$$g_2 = \lambda_2 \sum Cb \quad (4.15)$$

onde, λ_2 é o grau da penalidade a ser aplicada à restrição e Cb , o custo de bombeamento para anular o déficit de bombeamento. Quanto maior a diferença entre as lâminas de água nos estados limites, mais severa será a punição.

3) Função custo de garantia da demanda, (g_3):

O compromisso de que não haverá descontinuidade no suprimento de água à rede é interpretada nesse trabalho como a não ocorrência de pressão inferior a atmosférica no nó, logo a jusante do reservatório de distribuição.

A contínua verificação dessa ocorrência é efetuada com auxílio da função ENrunH(t), disponível no *Toolkit* do EPANET2, responsável pela análise hidráulica da rede nos vários tempos, t , da simulação. Essa função retorna, ao final do processo, uma mensagem de alerta (*warning code*) se alguma condição operacional foi violada. O conjunto desses códigos e as correspondentes mensagens são apresentados na Tabela 4.1, transcrita do EPANET *Programmer's Toolkit*, Rossman (2000).

Como exemplo, se no processamento é verificada algum valor de pressão negativo em algum nó da rede, no relatório de ocorrências constará a mensagem correspondente ao código 6, informando a hora e o nó onde ocorreu essa impropriedade.

Se nenhuma anormalidade é verificada na simulação, a função ENrunH(t) retorna o valor 0 (zero) e ao final do processamento é emitida a mensagem “Simulação Válida”.

Códigos de Advertência

Código	Descrição
1	Sistema não alcança o balanço hidráulico – convergência de uma solução hidráulica não é alcançada dentro das iterações toleradas.
2	Sistema pode estar hdraulicamente instável – convergência hidráulica foi alcançada somente depois dos estados dos trechos se mantiverem fixos.
3	Sistema desconectado - um ou mais nós com demanda positiva foram desconectados de suas fontes de suprimento.
4	Bombas não atendem vazão ou carga – uma ou mais bombas foram forçadas a desligar (devido à carga insuficiente) ou operar com vazão acima da máxima.
5	Válvulas não atendem vazão – uma ou mais válvulas de controle de fluxo não atendem a vazão requerida mesmo estando completamente abertas.
6	Sistema apresenta pressões negativas – ocorreu pressões negativas em uma ou mais junções com demanda positiva.

Tabela 4.1 – Relação dos códigos de verificação das condições de funcionamento da rede hidráulica.

No presente trabalho, foi introduzido nos códigos do programa OTIMIZE, uma condição que penaliza determinada população do Algoritmo Genético, se a função ENrunH(t) retorna o valor 6 em algum instante da simulação, o que representa a ocorrência de pressão negativa em algum dos nós alimentados pelos reservatórios de distribuição, Rede_R1 ou Rede_R2.

A função criada para penalizar eventual falta de comprometimento no atendimento às demandas da rede de distribuição, resulta do produto de um fator de penalidade, λ_3 , pelo tempo restante entre o instante da ocorrência da pressão negativa e o final do ciclo

operacional. Essa concepção privilegia aquela configuração de bombas e válvulas proposta pelo AG que provocou o problema mais tardiamente.

Dessa forma, pode-se escrever a função custo da seguinte forma:

$$g_3 = \lambda_3 \times (24 - tr) \quad (4.16)$$

onde, λ_3 é o grau da penalidade a ser aplicada à restrição e tr, o tempo restante para terminar o ciclo operacional a partir do instante da violação da restrição.

Apresentadas as restrições explícitas, consideradas no problema, a função de aptidão que fornece a solução para a melhor regra operacional, será dada por:

$$\text{Função de aptidão} = C_b + g_1 + g_2 + g_3 \quad (4.17)$$

em que, C_b é a função de custo de energia (R\$); g_1 é a função de custo relativa a violação da penalidade de manutenção das bombas (R\$); g_2 é a função de custo relativa a violação da penalidade de recuperação do estado inicial (R\$) e g_3 a função de custo de garantia de suprimento da rede (R\$).

Outras restrições inerentes ao funcionamento do sistema são levadas em consideração, incorporadas ao EPANET2 ou, ainda, inseridas nos próprios códigos da rotina computacional criada.

4) Outras Penalidades

Uma das restrições físicas mais importantes impostas aos modelos matemáticos trata-se da busca ao enquadramento dos níveis de água nos reservatórios dentro de limites, de forma que para cada período de tempo (t), ao longo de uma regra de operação, a lâmina de água sempre fique acima do menor nível estratégico e se apresente abaixo do mais alto nível operacional. Se considerarmos que são R unidades de reservação no sistema, então pode-se definir essas restrições como:

$$h_j(\min) < h_j(t) < h_j(\max) \quad j = 1,2,\dots,R ; \quad t = 1,2,\dots,24 \quad (4.18)$$

em que $h_j(\min)$ e $h_j(\max)$ representam o nível de água mínimo e máximo, respectivamente, no reservatório de ordem j e $h_j(t)$ é a lâmina de água naquele reservatório no instante, t .

Na formulação do modelo matemático do problema pesquisado, esses limites operacionais ficam definidos por ocasião da entrada de dados no EPANET2, através da janela de propriedades dos reservatórios conforme exemplo na Figura 4.7 deste capítulo.

O comportamento hidráulico do sistema nos casos do nível de água atingir os limites estratégicos nos reservatórios é comentado mais adiante no item 4.3.2.1 que trata sobre Componentes Físicos da Rede. O recurso ali comentado proporcionado pelo EPANET2 é fundamental para simplificação do Método de Penalidades empregado nesse trabalho, uma vez que, sendo o sistema constituído de múltiplos reservatórios haveria a necessidade de penalizar a função de custo a cada vez que o nível da água, em cada reservatório, atingisse o valor máximo ou valor mínimo para cada intervalo de atuação ao longo do horizonte de operação, o que poderia provocar redução da performance computacional e perda da qualidade dos resultados em razão da pulverização das restrições violadas.

Neste trabalho, considerou-se permitir a maximização da faixa de trabalho do nível de água em cada reservatório, dando liberdade para que o modelo possa alocar a carga hidráulica entre níveis operacionais pré-estabelecidos a qualquer instante, inclusive nas horas que se avizinham ao início do período de tarifa de energia mais cara. Essa política aumenta a flexibilidade do modelo na busca de soluções ótimas.

As diferentes estruturas de tarifas de energia elétrica com seus preços unitários diferenciados para consumo e demanda de acordo com a hora do dia, faz com que o algoritmo busque um agendamento de bombas mais ativo nas horas de custo tarifário mais barato. Configurações de estado operacional que resulte numa maior concentração de bombas em horários de ponta resulta numa solução de maior custo sendo preterida no processo de seleção do algoritmo genético.

4.2.4.2 - Método de penalidades

Esse método é geralmente aplicado aos Algoritmos Evolucionários para resolver problemas de otimização com restrições não-lineares incorporadas à função objetivo.

As funções de penalidade devem ser balanceadas aplicando-se a cada uma, coeficientes de penalidades com valores variados, dependendo da gravidade da restrição violada. Violações graves devem sofrer altas penas e para violações simples, penas mais leves, fazendo com que indivíduos mais viáveis tenham maiores chances de continuar nas próximas gerações.

A grande dificuldade do método está em encontrar um balanceamento entre os graus de penalidades a serem aplicados a violação das restrições, de forma que mesmo aqueles indivíduos que não atendem as restrições do problema possam contribuir com material genético para a busca de melhores soluções e não serem considerados como inviáveis. Por isso, muitos pesquisadores acreditam que as penalidades não devam ser muito rigorosas.

- **Valores dos coeficientes de penalidades**

A seleção dos valores apropriados do grau de penalidade para avaliar o custo de cada restrição violada é o fator crucial para utilização do Método de Penalidades. Wu e Simpson (2002) comentam que se o fator de penalidade é muito baixo, muitas soluções não-factíveis dominam a população do algoritmo genético. Se o fator de penalidade é muito alto, boas soluções serão eliminadas do processo de busca do AG. Portanto, esse fator direciona o Algoritmo Genético para determinada região do espaço de busca influenciando na performance do processo e no resultado da solução final. A busca da solução ótima ou próxima da ótima é feita na fronteira entre as regiões de soluções factíveis e não-factíveis. Diversas técnicas utilizando Algoritmos Genéticos têm sido foco de pesquisas para encontrar soluções ótimas a partir de coeficientes de penalidades bem equilibrados, entretanto, para chegar a resultados satisfatórios os tratamentos matemáticos empregados concebem alteração nos operadores genéticos naturais (Schoenauer e Michalewicz, 1996) ou encampam os coeficientes de penalidades como sendo variáveis de decisão, modificando o número de cromossomos inicialmente previstos para a população inicial, (Wu e Simpson, 2002).

Nenhum desses métodos estudados se enquadra na proposta deste trabalho que é de investigar a viabilidade de se conseguir encontrar resultados factíveis para o problema proposto empregando os Algoritmos Genéticos na sua forma primitiva, sem a necessidade de aperfeiçoá-lo para acelerar o gasto computacional ou apresentar melhorias na qualidade das soluções resultantes, embora essas qualidades sejam

importantes para o sucesso do modelo empregado, mas que poderá ser foco de outros estudos sobre o mesmo tema.

4.2.4.3 - Metodologia empregada

Pelas dificuldades operacionais de aplicação das metodologias existentes e pela baixa quantidade de coeficientes de penalidade a determinar, optou-se em empregar uma análise de sensibilidade para estimar seus melhores valores. A adoção dessa metodologia simples, mas muito empregada nos trabalhos investigativos, apenas pode tornar o algoritmo menos eficiente computacionalmente e obter resultados operacionais menos refinados qualitativamente, mas suficientes para verificar a aplicabilidade do AG convencional na definição de regras operacional factíveis de serem implementadas num sistema público de adução de água. Uma dificuldade presente nesses tipos de problema diz respeito às relações que normalmente existem entre as variáveis, fazendo com que a minimização de certa função de custo restritiva entre em conflito com outras funções do conjunto de restrições do problema.

Pelo método adotado, os coeficientes são encontrados através de um processo de tentativa e erro, no qual, inicialmente atribui-se um pequeno valor para, r , na equação (4.11), aumentando-se gradativamente seu valor até que o somatório dos valores dos termos de penalidades seja minimizado.

No desenvolvimento desse trabalho, todas as funções restritivas, diretamente associadas à função de aptidão, têm natureza de ordem operacional: a) custo de manutenção de bombas, b) custo de recuperação do estado inicial dos reservatórios e c) custo de garantia do abastecimento contínuo da rede de distribuição.

No início da análise de sensibilidade procurou-se identificar a importância de cada uma delas no processo de otimização, numa tentativa de classificá-las quanto à severidade dos coeficientes de penalidades a ser atribuída a cada função de restrição.

4.2.4.4 - Ajuste dos coeficientes de penalidades

A interferência de cada uma delas no processo de otimização foi comentado no item 4.2.4.4 deste capítulo, a partir do qual se pode intuitivamente classificá-las em ordem de importância para que se atinja o objetivo de encontrar uma solução final na

região factível. Com esse raciocínio, elegeu-se a seguinte ordem decrescente de importância das restrições do problema:

- 1) Asseverar a continuidade do abastecimento;
- 2) Recuperação dos níveis dos reservatórios;
- 3) Limitação do número de acionamento das bombas.

A partir dessa classificação pode-se atribuir valores a cada um dos coeficientes de penalidades, λ_1 , λ_2 e λ_3 , na tentativa de encontrar soluções que minimize as funções de penalidades.

O não cumprimento da primeira restrição significa encontrar uma solução sem compromisso prático, ou seja, uma regra de operação que provocaria intermitência no abastecimento de água, sendo, portanto, inviável de ser aplicada ao sistema real. Para assegurar a não ocorrência desse inconveniente, foi adotado de pronto um valor bastante elevado para o coeficiente λ_3 , ($\lambda_3=10000000$), ficando para os coeficientes λ_1 e λ_2 o estudo de análise de sensibilidade.

Pela geometria da rede hidráulica pesquisada existe dificuldades dos reservatórios recuperarem seu estado inicial devido a ocorrência de transferência de água entre eles nos intervalos de atuação em que a linha adutora deixa de receber carga de pressão das bombas da elevatória principal. Melhores detalhes desse fato são apresentados no item 6.2.3 que trata da Recuperação do Estado Inicial dos Reservatórios. Por esse motivo, utilizou-se como parâmetro para definir os melhores valores dos coeficientes de penalidade a melhor concordância de valores de pressão no nó da rede alimentado pelos reservatórios.

Várias combinações de valores dos coeficientes λ_1 e λ_2 foram aplicados no OTIMIZE, com tempo de processamento de 30 minutos, e os seus resultados simulados no EPANET2 para verificação das pressões nos nós Rede_R1 e Rede_R2 no tempo $t = 0$ e $t = 24$. Os melhores resultados encontrados estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Diferença de pressão no estágio inicial e final da simulação nos nós da rede.

λ_1	10	10	10	20	20	20	30	30	30
λ_2	100	200	300	100	200	300	100	200	300
	Diferença de pressão (m.c.a.)								
Nó Rede_R1	0,97	0,56	0,69	0,65	0,72	0,61	0,77	0,57	0,34
Nó Rede_R2	0,75	0,35	0,02	0,05	0,21	0,71	0,07	0,21	0,31
Total(mca)	1,72	0,91	0,71	0,70	0,93	0,92	0,84	0,78	0,65

Os números da Tabela 4.2, definiram os seguintes valores para os coeficientes: $\lambda_1 = 30$ (limitação do número de acionamento das bombas); $\lambda_2 = 300$ (recuperação dos níveis dos reservatórios) e $\lambda_3 = 10000000$, valores mantidos invariáveis durante todo o processamento e em todas as aplicações deste trabalho.

4.2.5 - Programa de otimização OptiGA

A crescente popularização dos Algoritmos Genéticos tem dado oportunidade, nos últimos anos, ao surgimento de vários *softwares* com abordagem de otimização segundo aquela técnica. No presente trabalho, foi utilizada a rotina computacional OptiGA, na sua versão *demo*, para implementar o AG na minimização da função objetivo.. Trata-se de um controle ActiveX extra incorporado ao projeto OTIMIZZE.vbp no Microsoft Visual Basic, onde se dá o seu acoplamento com as funções disponíveis na biblioteca do *Toolkit* do EPANET2, também encontradas naquela linguagem. A distribuição daquele programa é feita pela empresa OptiWater (<http://www.optiwater.com/index.html>), especializada em desenvolver produtos para otimização de redes hidráulicas e vem acompanhada de uma documentação explicativa dos seus recursos e dois exemplos que ilustram como implementar o Algoritmo Genético.

Outras bibliotecas e programas computacionais podem ser encontradas para permitir o acesso ao desenvolvimento do AG, cabendo a escolha por uma delas de

acordo com a finalidade da investigação, linguagem que se deseja trabalhar e disponibilidade de recursos financeiros disponíveis. Dentre os pacotes computacionais mais difundidos, destacam-se: MatLab e Envolver; além da biblioteca GALib C++ (Wall, 1996) desenvolvida pelo Massachusetts Institute of Technology – MIT dos Estados Unidos.

Embora o OptiGA não tenha a potencialidade dos programas computacionais mais divulgados na literatura, sua arquitetura foi projetada para aceitar trabalhar com funções objetivo complexas, vários tipos de representação cromossômica, vários operadores genéticos e diversos critérios de parada, sendo opcional o recurso do elitismo.

Na estrutura do OptiGA os operadores genéticos estão contemplados com os mecanismos abaixo listados, permitindo ao usuário pesquisar as vantagens de utilização de cada um na solução de problemas diversos.

Seleção (Reprodução): Propriedade associada: *SelectionType*

- a) *Roulette Rank* - a seleção é feita pela simulação de uma roleta, na qual a área de cada paleta correspondente a cada indivíduo é proporcional ao valor da sua função de aptidão (*fitness*). Os membros com maior *fitness* têm uma maior chance de seleção.
- b) *Tournament* - encontra o cromossomo melhor adaptado numa série de *n* elementos, comparando aleatoriamente pares desse subconjunto e escolhendo os melhores para serem pais na próxima geração.
- c) *Top Mate* – o primeiro cromossomo é escolhido pela ordem de *fitness*. O segundo é escolhido aleatoriamente.
- d) *Random* – os cromossomos são escolhidos aleatoriamente dentro do grupo.

Cruzamento: Propriedade associada: *BinaryCrossoverType*

- a) *One Point* – aleatoriamente é selecionado um ponto de corte. O primeiro segmento do cromossomo *pai* é unido com o segmento final do segundo cromossomo *pai* dando origem ao primeiro cromossomo *filho*. O segundo cromossomo *filho* é gerado a partir da segunda parte do primeiro cromossomo *pai* e da primeira parte do segundo cromossomo *pai*.
- b) *Two Points* – difere do mecanismo anterior pelo fato de que são dois o número de pontos de corte escolhidos aleatoriamente.

c) *Uniform* – cada bit/gene é escolhido aleatoriamente para ser permutado, ou do primeiro ou do segundo cromossomo.

O programa permite também, que o usuário defina outros tipos de cruzamento que melhor se adapte à solução do problema.

Mutação: Propriedade associada: *BinaryMutationType*

a) *Flip Bit* – aleatoriamente altera o valor de um *bit* do cromossomo. Neste trabalho denominamos de Mutação Pontual.

De forma semelhante ao que se disponibiliza para a operação de cruzamento, também é permitido ao usuário criar mecanismos de mutação mais adequados a cada tipo de problema.

A função *TerminationMode* especifica as condições necessárias para se chegar ao final do processo de busca, disponibilizando as seguintes opções: 1- Parar após n tentativas; 2- Parar após t minutos; 3- Parar quando a mudança após a última tentativa for inferior que um certo valor particular.

Dentro do OptiGA, o algoritmo genético é executado pela função *FitnessFunction*, com a seguinte sintaxe:

Private Sub optiGA1_FitnessFunction (BinaryGenes As Variant, RealGenes As Variant, IntegerGenes As Variant, GenerationNumber As Long, Fitness As Single)

onde,

BinaryGenes As Variant é uma matriz contendo o número de genes binários;

RealGenes As Variant, IntegerGenes As Variant são matrizes contendo o número de genes do tipo Real e Integer, respectivamente;

GenerationNumber As Long é uma variável utilizada para recuperar a geração em questão durante a simulação;

Fitness As Single é a variável responsável por armazenar o valor da função de aptidão.

A função *FitnessFunction* representa a função objetivo que se deseja minimizar e é chamada várias vezes com diferentes soluções proposta para o problema a partir do comando *optiGA1.RunOptiGA*.

Os resultados são dados por:

i = *optiGAI.GetSolutionParameters (RunTime, BestFitness, BinaryGenesSolution, RealGenes, IntegerGenes)*

onde,

RunTime é o tempo decorrido para encontrar a solução no processo genético;

BestFitness é o melhor valor encontrado pela função de aptidão;

BinaryGenesSolution é uma matriz contendo a melhor combinação encontrada após o processo genético;

RealGenes, IntegerGenes são matrizes contendo a melhor solução na forma de genes do tipo *Real* e *Integer* respectivamente.

Para se obter dados do processo genético em tempo de execução, o OptiGA fornece a função *GenerationReport* com a seguinte sintaxe:

Private Sub optiGAI_GenerationReport(BestFitness As Single, GenerationNumber As Long, BinaryGenes As Variant, RealGenes As Variant, IntegerGenes As Variant, ElapsedTime As Long, GenerationMeanFitness As Single)

onde,

BestFitness As Single é o melhor valor encontrado pela função de aptidão na população atual;

GenerationNumber As Long retorna o número da geração atual;

BinaryGenes As Variant é uma matriz contendo o número de genes binários da população atual.

RealGenes As Variant, IntegerGenes As Variant são matrizes contendo o número de genes do tipo *Real* e *Integer* da atual população;

ElapsedTime As Long retorna o tempo decorrido no processo genético;

GenerationMeanFitness As Single retorna o valor médio da função de aptidão na população atual.

Todo o estudo computacional foi desenvolvido com um microcomputador com as seguintes características principais: Processador AMD Duron, 1,19 GHz e 512 MB de memória RAM. Decididamente, não se trata de um equipamento mais adequado para uma elevada carga computacional, como exige a técnica dos Algoritmos Genéticos, mas os recursos de *hardware* proporcionaram uma performance satisfatória para atingir

os objetivos do trabalho, muito embora configurações mais avançadas sejam recomendadas para reduzir o tempo de resposta da interface computacional.

4.3 - Simulação hidráulica

No Brasil ainda é tímido o uso pelas companhias de abastecimento de água de *softwares* de modelação hidráulica para solucionar problemas relativos a projetos, controle e operação de sistemas. O atual desinteresse dessas entidades nessa ferramenta deve-se a fatores como: 1) custo elevado dos pacotes comerciais disponíveis; 2) falta de suporte técnico local; 3) resistência à incorporação de novas tecnologias; 4) falta de *know-how* dos técnicos para modelação dos sistemas; 5) insuficiência de dados cadastrais para alimentar o programa; 6) não estão traduzidos para a língua portuguesa e 7) apresentam aspectos em desacordo com as normas técnicas brasileiras.

Só mais recentemente, devido à complexidade de se compreender, de forma global, o funcionamento dos grandes sistemas de abastecimento de água, se vem despertando para o grande potencial técnico que representam esses programas.

O simulador hidráulico mais difundido em todo o mundo é o EPANET2, concebido por Rossman (2000) para ser uma ferramenta de pesquisa para melhorar a compreensão do comportamento das redes hidráulicas em regime de escoamento permanente. Trata-se de um programa de domínio público (*freeware*) podendo ter seus códigos manipulados pelo usuário para adequá-lo a aplicações específicas. A partir do emprego de códigos computacionais do EPANET2 surgiram alguns programas de caráter comercial muito bem difundidos no exterior, mas com pouca penetração no território brasileiro. Dentre eles, destacam-se: SARA e MIKE NET. Outros pacotes comerciais não derivados do EPANET2 mostram-se bastante competitivos, entre eles: WATERCAD, KYPIPE e WADISO.

Em comum, todos realizam análises de simulação tanto para um cenário de estática (simulação instantânea) como para períodos estendidos de tempo (simulação dinâmica). Com o extraordinário avanço dos recursos computacionais, muitas dessas plataformas transformaram-se em potentes programas com múltiplas e complexas funções, entre elas a análise do comportamento da qualidade da água, calibração de redes hidráulicas, prevenção de incêndio, definição de estratégias de reabilitação, entre outras. O programa WADISO realiza análises de otimização empregando a técnica da Enumeração Exaustiva.

No contexto deste trabalho, a busca iterativa da operação que resulte na minimização dos custos com energia elétrica, requer que cada solução candidata gerada pelo AG, seja avaliada quanto ao atendimento das restrições hidráulicas na rede. Essas análises são feitas num programa simulador de rede de condutos, servindo também, de ferramenta para mostrar o comportamento das variáveis hidráulicas ao longo do horizonte de operação, como exemplos, pressão nos nós, vazão nos trechos, potência motriz, etc.

Após a simulação hidráulica, o gasto energético de uma bomba, para certo intervalo de tempo, pode ser calculado a partir do valor da potência da bomba calculada e da tarifa de energia elétrica naquele horário (eq. 4.2).

4.3.1 - Equilíbrio hidráulico

A análise hidráulica de uma rede está baseada em um conjunto de equações que descrevem a dinâmica do sistema. As condições de equilíbrio em regime permanente requerem que as seguintes leis físicas que definem o comportamento hidráulico ao redor de qualquer circuito da rede sejam satisfeitas. Essas leis são definidas como restrições hidráulicas:

1) Equação da Continuidade em Cada Nó: a soma algébrica de todas as vazões num determinado nó deve ser nula, exceto para aqueles nós que representam reservatórios. Esta restrição assegura o balanço de massa em toda rede.

$$\sum_{i=1, j \neq 1}^N Q_{ij} + C_i = 0 \quad (4.18)$$

onde Q_{ij} é a vazão no elemento que conecta i a j ; C_i é o consumo ou alimentação no nó i ; N é o número de nós na rede. O fluxo é positivo no sentido de i para j .

2) Equação da Conservação da Energia Nos Circuitos: a soma algébrica das perdas de energia ao longo de um circuito fechado da rede deve ser nula, ou igual a energia fornecida por uma bomba, caso ela exista.

$$\sum_{\text{circuito}} hf - \sum H_m = 0 \quad (4.19)$$

onde, h_f é a perda de carga total no circuito e H_m é a energia transferida ao fluido pela bomba.

Esta restrição torna o problema altamente não-linear em virtude na natureza das equações que relacionam as perdas de carga com o diâmetro dos condutos e a vazão transportada. Essa relação pode ser representada na forma:

$$J = K Q^n / D^m \quad (4.20)$$

em que J é a perda de carga unitária, Q a vazão, D o diâmetro do conduto e K um coeficiente que depende do tipo de material da parede do conduto. Comparando com a equação universal esses parâmetros assumem os valores: $K = 0,0827$; $n = 2$; $m = 5$, para escoamentos turbulentos. Além disso, a presença de bombas, válvulas e múltiplos padrões de demanda podem resultar em múltiplas descontinuidades, Lippai et al. (1999).

Quando as equações (4.18) e (4.19) são simultaneamente satisfeitas diz-se que a solução do problema foi alcançada. Para encontrar o equilíbrio hidráulico da rede, o EPANET2 (Rossman, 2000) utiliza a formulação proposta por Todini e Pilati (1987), designado mais tarde como “Método do Gradiente”. Essa metodologia faz uso do Método de Newton-Raphson para linearizar as equações, formando um sistema a ser resolvido iterativamente a partir de cotas piezométricas conhecidas nos reservatórios e de uma primeira distribuição de vazões nos trechos sem ter que satisfazer, necessariamente, a equação da continuidade nos nós. As vazões são atualizadas e novas cotas piezométricas nos nós são obtidas sempre que a soma das variações de vazão (em valor absoluto) relativamente a vazão total for superior à tolerância especificada (por exemplo 0,001). Os procedimentos algébricos dessa técnica são apresentados no trabalho de Cheung (2004).

O método calcula os valores de pressão e vazão na rede, considerando todo o sistema como estanque, desprezando eventuais perdas físicas. A Figura 4.5 ilustra o fluxograma de uma simulação hidráulica pelo EPANET, apresentado no trabalho de Alonso et al. (2000).

Uma simulação em período estendido pode ser entendida como integrada por várias simulações estáticas, cada uma representando um intervalo de tempo pré-definido, permitindo as mudanças nos níveis dos reservatórios, alteração nos estados das bombas, das válvulas e padrão de demandas, Bree e Rao (1977). A simulação estática

permite reproduzir as características do sistema simulado para um dado cenário de consumos, como se dele fornecessem uma fotografia, LNEC (2000).

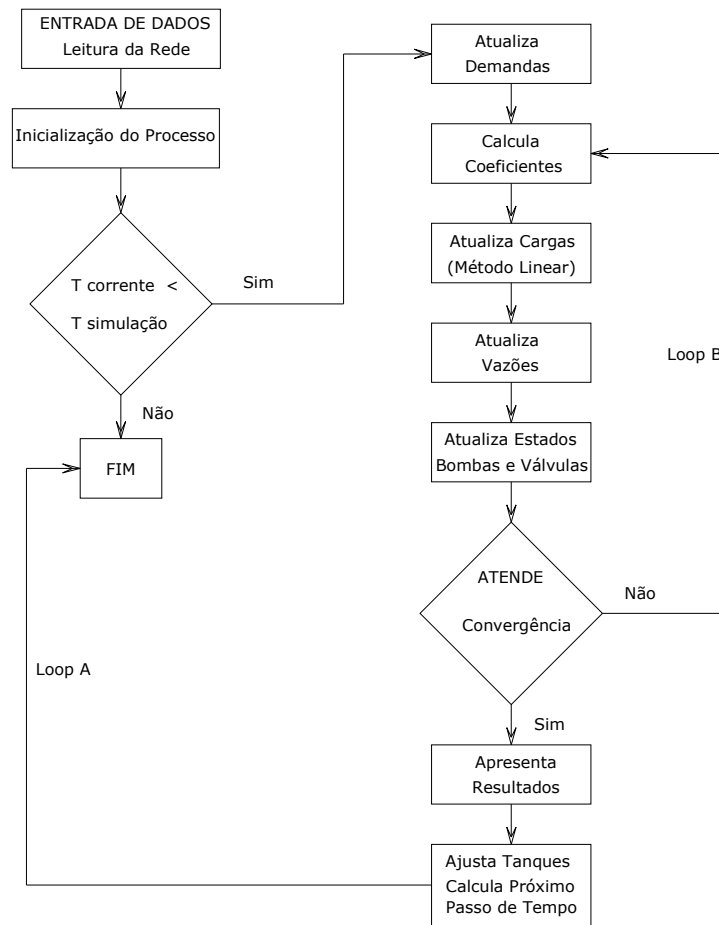


Figura 4.5 – Fluxograma da simulação hidráulica no EPANET, (Alonso et al., 2000).

4.3.2 - Módulo de simulação hidráulica: EPANET2

O EPANET2 é um programa desenvolvido pela *U. S. Environmental Protection Agency - EPA* (2000), dos Estados Unidos da América para estudar o comportamento hidráulico e a qualidade da água em redes de condutos forçados, em regime de escoamento permanente. A sua versatilidade faz com que essa rotina possa ser empregada em diferentes tipos de aplicação hidráulica, entre eles simulação e calibração de redes.

Numa simulação estática ou dinâmica, o programa permite calcular as vazões nos trechos da rede e pressões nos pontos notáveis, lâmina de água em cada reservatório, além de muitas outras grandezas relacionadas a hidráulica do sistema.

Esse programa foi escolhido como módulo de avaliação iterativa do comportamento hidráulico da rede adutora investigada, servindo de instrumento para calcular as variáveis de estado das inúmeras combinações de bombas e válvulas propostas pelo módulo otimizador para minimizar os custos de bombeamento. A opção por essa rotina computacional está alicerçada em vários fatores de grande relevância para o objetivo deste estudo, dentre os quais podemos destacar:

1) Caráter gratuito. É distribuído livremente nas versões de língua inglesa, espanhola e portuguesa, esta última traduzida pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC (2000). O emprego do arquivo executável EN2Psetup.zip é recomendável quando se deseja apenas simulações hidráulicas para vários cenários de operação;

2) Código fonte acessível (EN2Psource.zip e EN2Ptoolkit.zip). É disponibilizado o código de origem (*source code*) e um *Toolkit* formado por uma coleção com mais de 50 funções de programação destinada ao desenvolvimento de interfaces computacionais que incorporem o EPANET2 a outros modelos específicos, como por exemplo, o modelo de planificação estratégica, OptiGA, utilizado neste trabalho.

As aplicações desenvolvidas no ambiente MS Windows, nas linguagens Visual Basic, C/C++ e Delphi Pascal, entre outras que possam incorporar funções de vínculo dinâmico (*Dynamics Link Library - DLLs*) na construção de rotinas computacionais;

3) Confiabilidade. Trata-se de um programa amplamente testado e aceito pela comunidade científica, sendo o mais utilizado nos trabalhos técnicos que exigem a solução das equações básicas que regem o escoamento de fluídos em condutos forçados;

4) Facilidade de modelação e qualidade gráfica dos resultados. A introdução dos elementos de uma rede hidráulica é feita de forma amigável, auxiliado por ícones. Tem a capacidade de apresentar os resultados em vários formatos, inclusive o ambiente gráfico.

Além dessas vantagens genéricas, o EPANET2 traz algumas potencialidades que se enquadram no estudo de otimização proposto, facilitando a obtenção de grandezas de interesse operacional. Algumas dessas vantagens são:

- ✓ Edição de dados de entrada;
- ✓ Execução de simulações estáticas e estendidas;
- ✓ Desenho de gráficos de séries temporais;
- ✓ Modelação de bombas simples ou associadas;
- ✓ Modelação de reservatórios de nível variado e formas diversas;
- ✓ Modelação dos principais tipos de válvulas usadas em redes de condutos;
- ✓ Configuração das condições operacionais a partir de Controles Simples;
- ✓ Cálculo da perda de carga contínua a partir da fórmula de Darcy-Weisbach.

O potencial do EPANET2 em executar simulações em períodos estendidos é fundamental para o presente estudo, pelo fato de que nos sistemas de abastecimento as condições operacionais em tempo real não são representativas do estado permanente, pois ocorre, ao longo do dia, variação de demanda, variação dos níveis de água nos reservatórios e alteração de estado das bombas e válvulas.

4.3.2.1 - Representação do modelo de rede

De uma maneira geral as redes hidráulicas são representadas por uma rede de fluxo formada por um conjunto de trechos (*links*) conectados nas suas extremidades a nós (*nodes*), dispostos espacialmente de forma a ocorrer uma relação mútua entre esses diversos componentes. Na Figura 4.6 apresenta-se um exemplo de uma rede simples com uma variedade desses elementos.

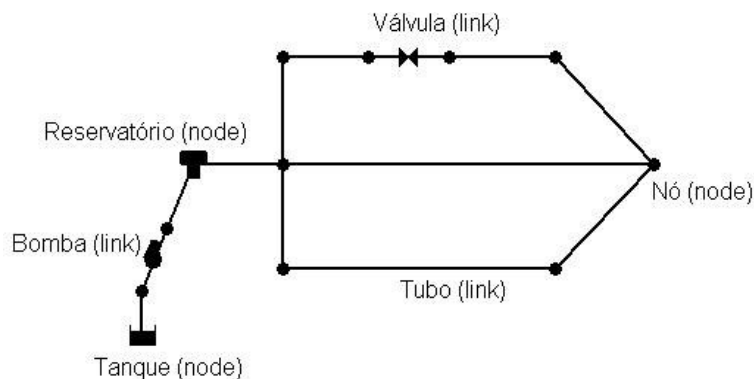


Figura 4.6 - Componentes de uma rede hidráulica no EPANET2.

➤ Principais Componentes Físicos da Rede

Na rede adutora de Marés estão presentes os componentes abaixo descritos, acompanhados de sua definição:

- **Conduitos** → elementos responsáveis pelo efeito de transporte do líquido de um ponto para outro da rede. As perdas de carga distribuídas foram calculadas pela fórmula de Darcy-Weisbach por representar uma formulação mais geral e válida para diferentes tipos de escoamento.

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D_i} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (4.15)$$

em que, f = coeficiente de atrito (adimensional); L = comprimento do conduto entre duas seções (m); D_i = diâmetro interno do conduto (m); V = velocidade média do escoamento (m/s) e g = aceleração da gravidade ($= 9,81\text{m/s}^2$).

O EPANET2 calcula o fator de atrito, f , por três equações, dependendo do número de Reynolds,

a) Para regime laminar emprega a Fórmula de Hagen-Poiseulle,

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad (4.21)$$

b) Para regime de transição utiliza uma interpolação cúbica do ábaco de Moody;

c) Para regime turbulento adota a fórmula explícita de Swamee-Jain para resolver a equação de Colebrook-White,

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon / D}{3,7} + \frac{5,74}{R_e^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (4.22)$$

em que ε é a rugosidade absoluta interna do tubo (m) e D_i = diâmetro interno do conduto (m).

- **Reservatórios** → os de nível fixo (RNF) representam um volume de capacidade ilimitada e carga hidráulica constante. No caso de poço profundo, quando se conhece a vazão bombeada, mas não se conhece a dinâmica do nível de água, pode-

se considerar o manancial como um RNF, cujo nível de água é igual à cota piezométrica do aquífero. No estudo de caso, essa foi a modelação adotada para o poço profundo existente no sistema.

Os reservatórios de nível variável (RNV) caracterizam-se por apresentar volume definido, podendo ocorrer variação da lâmina de água no seu interior ao longo de uma simulação estendida. Devem sempre ser modelados com informação dos limites operacionais mínimos e máximos pré-estabelecidos.

A esse respeito o manual do programa EPANET2 (Rossman, 2000), informa: “As tubulações podem estar abertas ou fechadas em determinados períodos da simulação ou quando ocorrem determinadas condições específicas de operação, tais como, quando a altura de água no reservatório de nível variável atinge determinados valores ou quando a pressão num nó está abaixo ou acima de certo valor”. Em outras palavras o programa confronta a cota piezométrica calculada com os valores limites estratégicos informados inicialmente. Se superior ao valor máximo, fecha o conduto que chega ao RNV evitando perda de água. Se inferior ao valor mínimo, fecha o conduto que sai do reservatório. Esses componentes são reabertos na próxima verificação de estado em que essas condições já não se verificarem.

No caso do recalque, apenas o estado do conduto é alterado para fechado (*closed*), interrompendo o fluxo, mas o estado das bombas continua aberto (*open*).com seu consumo regular de energia elétrica, considerada nesse caso desnecessária para aquele intervalo de tempo em que o fenômeno ocorreu. Pode-se deduzir que essa configuração de bombas proposta pelo AG produzirá um valor maior para a função de aptidão reduzindo a probabilidade de ser selecionada para as próximas gerações, ou seja, esse artifício auto-penaliza as más combinações de bombas e válvulas.

Essa qualidade potencial do programa foi explorada, nesse trabalho, na medida em que transfere-se para o EPANET2 as restrições físicas relativas ao extravasamento da água nos reservatórios, em vez de incorporar essa restrição na função de aptidão (eq. 4.11) e submete-la a coeficientes de penalidades durante a simulação.

A adoção dessa formulação simplifica a estrutura da função de aptidão, contribuindo para aumentar a celeridade de processamento e conseqüentemente uma melhor performance do algoritmo.

- Bombas → são trechos da rede que recebem energia mecânica de um motor e a transferem a um líquido aumentando sua carga hidráulica. Deve ser inserido no programa os dados dos nós inicial e final e as características da bomba. O

escoamento através da bomba é unidirecional e os principais resultados produzidos pela simulação são a vazão bombeada e a altura de elevação.

Nesse estudo, todas as bombas operativas no sistema são de velocidade constante, representadas no EPANET2 pelas suas curvas características, conforme metodologia apresentada no item 5.6 - Curvas Características das Bombas.

Dependendo da combinação de bombas proposta pelo Algoritmo Genético, o EPANET2 apresenta a versatilidade de promover a associação de bombas em paralelo, ajustando automaticamente os valores de pressão e vazão para a nova configuração.

- Válvulas → são trechos utilizados em pontos estratégicos da rede para controle de vazão ou pressão. Cada tipo de válvula é caracterizada por um parâmetro de controle diferente que descreve o seu ponto de operação. O estado da válvula e suas respectivas condições de operação podem ser alteradas durante uma simulação. Quando abertas é assumido que funciona como uma tubulação lisa ($f=0,02$) e comprimento duas vezes o diâmetro.

No sistema adutor Marés (Figura 4.8), a válvula de gaveta, V5, controla o fluxo para o reservatório BR1 trabalhando totalmente aberta, exceto quando, dentro dos critérios operacionais da CAGEPA, haja a necessidade de aumentar a oferta de água ao Centro R2, ocasião em que ela é manobrada manualmente para que a gaveta (cunha) ocupe uma posição correspondente a aproximadamente 20% da seção plena. Essa válvula foi modelada no EPANET2 como TCV (*throttle control valve*), ou válvula controladora de perda de carga. A relação entre o grau de fechamento da válvula e o correspondente coeficiente de perda de carga singular é usualmente fornecida pelo fabricante da válvula.

No contexto da otimização proposta para o sistema, essa válvula é considerada como variável de decisão, mantendo-se os mesmos percentuais de abertura da gaveta (2 bits).

A válvula, V3, também é do tipo gaveta e controla o fluxo para o reservatório AR1 do Centro R1. Esse dispositivo permanece durante todo o dia fechado uma vez que o volume do AR1 é considerado reserva técnica para atender às solicitações do sistema nos meses de maior demanda. Tratando-se de um equipamento de idade bastante avançada, sua estanqueidade está bastante comprometida, permitindo continuamente a passagem de uma vazão aproximada de 10 l/s para o interior do compartimento, fato que força o acionamento da bomba B3R1 durante um hora por dia

para, apenas, abaixar o nível de água e evitar o seu transbordamento. A modelação dessa válvula, com essas características, foi possível considerando-a como uma Válvula Controladora de Fluxo (FCV), ajustando para 10 o parâmetro de controle da vazão (Figura 4.7).

No EPANET2 a válvula de retenção (CV) é considerada como propriedade de estado do conduto (*open, closed, CV*) e não modelada como um elemento independente (*link*) a exemplo das demais válvulas. Na rede estudada, CVs estão presentes nos trechos logo a jusante daquelas bombas passíveis de funcionar em paralelo para evitar complicações operacionais resultantes de valores diferentes de pressão geradas por cada bomba individualmente, com reflexo negativo no equilíbrio hidráulico do sistema.

4.3.2.2 - Uso da extensão *Toolkit* na interface computacional OTIMIZE

Prevalecendo-se de que o EPANET2 se trata de um programa aberto é possível manipular convenientemente sua biblioteca de funções, de forma a integrá-lo com o módulo de otimização do problema (OptiGA), passando ambos a trabalhar conjuntamente na interface computacional desenvolvida. Esse acoplamento dos dois programas, enseja a realização sistemática de simulações hidráulicas para vários cenários de operação, obtendo de cada uma delas as informações pertinentes para alcançar o objetivo principal da pesquisa.

Uma vez que se esteja familiarizado com a representação dos vários componentes da rede e sua forma de operação, é possível usar as funções do *Toolkit*, contida no arquivo EPANET2.DLL, para customizar o programa EPANET2. No caso estudado, essa customização deu origem a uma aplicação computacional nomeada de OTIMIZE, a partir da escolha das funções adequadas à solução do problema pesquisado. Sequencialmente, as funções buscadas na biblioteca do *Toolkit* e utilizadas no desenvolvimento do programa, foram:

- Função ENopen para admitir no OTIMIZE o arquivo de texto (extensão .inp) que descreve o sistema hidráulico de Marés a ser analisado. Esse arquivo é representado pelo arquivo Sistema_Adutor.inp criado externamente à aplicação, a partir do modelo criado no EPANET2 com o nome Sistema_Adutor.net, conforme descrito no item 4.3. Após isso, outras funções do *Toolkit* estão aptas

a serem usadas para desenvolvimento do programa. A importação do arquivo Sistema_Adutor.inp se dá através do código,

```
ENopen(App.Path & "\" & Sistema_Adutor, App.Path & "\Out.dat", "")
```

- Função ENgetnodeindex para associar o identificador (ID) de cada componente, do tipo nó, ao seu índice correspondente (idx), criado pelo EPANET2 por ocasião da construção da rede hidráulica. Qualquer operação de alimentação de dados ao aplicativo ou resgate de informação deve ser feito referindo-se ao seu índice em vez de seu nome identificador. Os índices são números inteiros sucessivos a partir do valor 1. Exemplo:

```
ENgetnodeindex("AR2", RNV_AR2_idx)
```

O reservatório nomeado de AR2 no EPANET2 fica, a partir da aplicação dessa função, associado ao índice internamente criado pelo programa para o componente RNV_AR2_idx.

- Função ENsetlinkvalue para ajustar o estado dos componentes da rede, do tipo trecho, antes da simulação. Exemplo:

```
ENsetlinkvalue(B1R1idx, EN_INITSTATUS, BinaryGenes(0)),
```

em que B1R1idx representa o índice da bomba B1R1; EN_INITSTATUS é o parâmetro que define o estado inicial de B1R1 e BinaryGenes(0) é o estado da bomba B1R1 no instante inicial da simulação, definido pelo Algoritmo Genético. (BinaryGenes(0) = 0 <=> fechado; BinaryGenes(0) = 1 <=> aberto).

- Função ENopenH para inicializar a análise do sistema hidráulico. Possibilita realizar uma simulação dinâmica com acesso a resultados em cada intervalo de tempo discretizado.
- Função ENinitH para atribuir valores dos níveis dos reservatórios, estado dos trechos, bombas, válvulas, e tempo da simulação, antes de operar uma análise hidráulica. Deve suceder a chamada da função ENopenH.
- Função ENrunH para realizar análise hidráulica num certo período de tempo, t, particular da simulação total.

```
ENrunH (t)
```

- Função ENsetlinkvalue para promover o ajuste dos estados dos componentes, do tipo trecho, que venham sofrer modificações no transcorrer do período de simulação. Exemplo:

ENsetlinkvalue(B1R1idx, EN_STATUS, BinaryGenes(cont_passo)),

onde B1R1idx representa o índice da bomba B1R1; EN_STATUS representa o parâmetro que define o estado da bomba B1R1 em qualquer tempo da simulação, diferente do tempo inicial, e BinaryGenes(cont_passo) representa o estado da bomba no instante da simulação definida pela variável, cont_passo, (0 = fechado; 1 = aberto).

- Função ENgetlinkvalue para resgatar do aplicativo, a qualquer instante, o valor de uma grandeza calculada correspondente a determinado componente do tipo trecho. Exemplo:

ENgetlinkvalue(B4Maresidx, EN_FLOW, Vazao)

Nesta sentença o parâmetro EN_FLOW propicia a transferência do valor da vazão recalçada pela bomba B4Mares para a variável Vazão.

- Função ENnextH para controlar, através da variável Tstep, o tempo decorrido da simulação hidráulica.

ENnextH (Tstep)

- Função ENcloseH para encerrar a análise hidráulica da rede Sistema_Adutor.inp, uma vez percorridos todos os 24 intervalos de tempo da simulação dinâmica.

Todas estas funções estão integradas ao módulo de otimização OptiGA formando um conjunto único de instruções na linguagem *Visual Basic 6* complementado pelos códigos criados para atender as necessidades específicas do aplicativo, entre elas a construção do *layout* contendo a melhor regra diária pesquisada.

4.4 - Etapas da elaboração do modelo digital

No início da execução da interface OTIMIZE é feita a leitura da rede hidráulica construída no EPANET2 a partir dos seguintes passos, dando origem ao arquivo Sistema_Adutor.net:

Passo 1: introdução dos elementos constituintes da rede de forma esquemática;

Passo 2: associação de um conjunto de propriedades de cada elemento a valores particulares da rede do sistema.

Passo 3: introdução das condições de operacionalidade do sistema;

Os itens requeridos na entrada podem se resumidos na listagem a seguir e exemplificados na Figura 4.7.

- ✓ Dados gerais da rede: topologia, diâmetros, comprimentos e rugosidade dos tubos;
- ✓ padrões de demanda;
- ✓ curvas características das bombas;
- ✓ geometria dos reservatórios;
- ✓ tipos de válvulas;
- ✓ duração da simulação.



Figura 4.7 – Exemplos de janelas de propriedades do EPANET2

Como forma de extrair o máximo benefício na construção do modelo, deve-se identificar em campo as características construtivas, hidráulicas e elétricas de todos os elementos da rede adutora, de forma que nas operações de simulação hidráulica, o modelo represente o mais fielmente possível todas as complexas relações funcionais verificadas no dia-a-dia de um sistema real. Essa fidelidade dá a garantia aos técnicos de explorar uma grande faixa de cenários operacionais, tornando mais robusta a pesquisa pela configuração mais racional. Tão importante quanto introduzir as propriedades

corretas de um elemento é promover a interconexão correta entre eles, sem a qual poderão ocorrer sérias imprecisões no modelo.

A Figura 4.8, mostra a janela principal do programa EPANET2 com o desenho do Sistema Adutor Marés que serve de modelo físico para o estudo de otimização energética através dos Algoritmos Genéticos. O modelo desenvolvido, assim como qualquer outro, reflete apenas uma aproximação daquele modelo do mundo real, entretanto suas limitações não devem impedir a funcionalidade do mesmo. Como incertezas, pode-se destacar: a) demandas nos nós, b) coeficientes de rugosidade dos condutos, c) parâmetros hidráulicos das bombas, d) parâmetros elétricos dos motores, e) parâmetros geométricos dos reservatórios, f) coeficientes de perdas localizadas das válvulas.

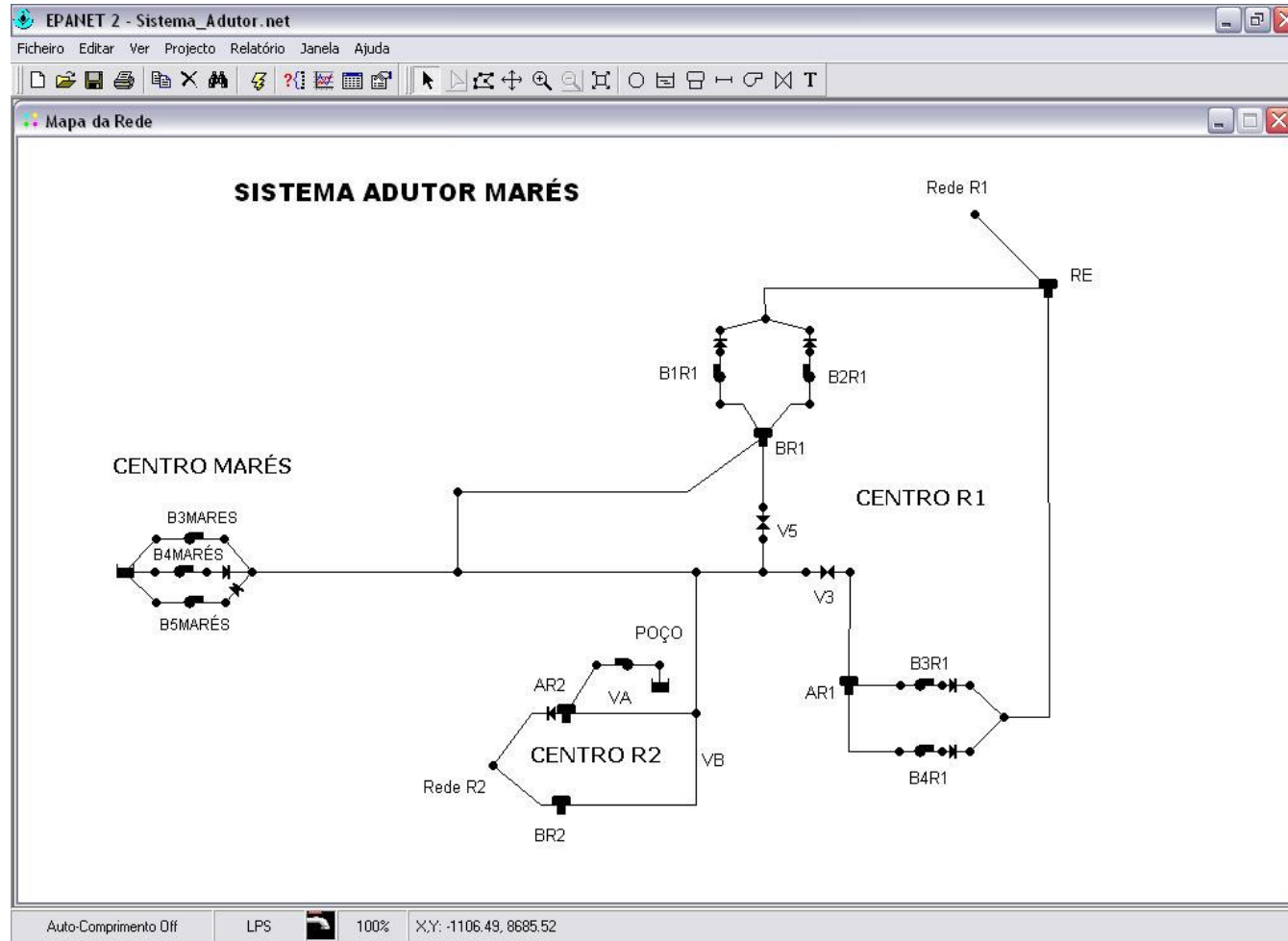


Figura 4.8 – Modelo do sistema adutor Marés no simulador EPANET2

Uma vez vencidas todas as etapas preliminares necessárias à modelagem do problema, pode-se avançar em direção da construção da ferramenta computacional que propiciará alcançar um dos objetivos propostos para esse trabalho. O procedimento geral do programa pode ser representado pelo fluxograma da Figura 4.9.

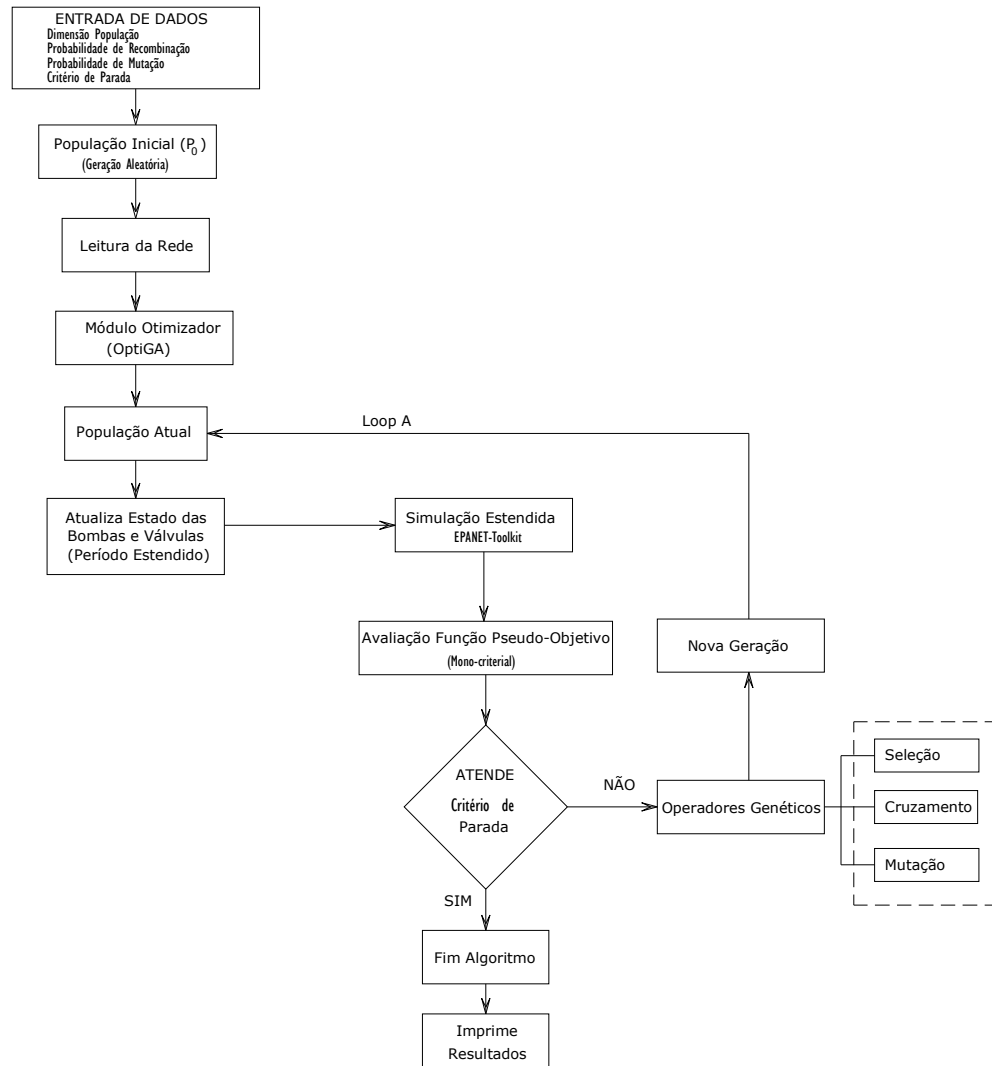


Figura 4.9 – Diagrama de fluxo da ferramenta computacional OTIMIZE.

4.4.1 – Procedimentos da concepção do modelo

O modelo computacional proposto pode ser expresso de forma simplificada pelos seguintes procedimentos:

Passo 1 → Preparação do arquivo de entrada:

No EPANET2, ajustar o modelo digital às condições de contorno inicial. O arquivo da rede foi nomeado como Sistema_Adutor.net e seu correspondente arquivo texto nomeado como Sistema_Adutor.inp. Esse passo se dá externamente ao OTIMIZE;

Passo 2 → Criação do projeto OTIMIZE.vbp no Microsoft Visual Basic.

No *Visual Basic 6* foi criado o projeto intitulado OTIMIZE.vbp compartilhado em cinco **Formulários**: Main.frm; Tabela.frm, Grafico.frm; Custos.frm e Solução.frm; três **Janelas de Diálogos**: Dialog_Conf.frm, Dialog_Graf.frm e Dialog_Tab.frm e dois **Módulos**: Modulo_AG.bas e Modulo_Custos.bas. Existe também o módulo EPANET2.bas, fornecido pelo *Toolkit* do EPANET2. que permite a iteração da rotina computacional com o simulador hidráulico;

Passo 3 → Declaração de variáveis.**Passo 4** → Abertura da rede hidráulica

Importação do arquivo de texto da rede (Sistema_Adutor.inp), criado externamente (Passo 1);

Passo 5 → Recuperação dos índices dos componentes da rede

É feita a associação do identificador (ID) do componente da rede a um índice criado pelo EPANET2 quando da introdução do elemento na construção da rede. Exemplos:

i = ENgetlinkindex("B3MARES", B3Maresidx)

i = ENgetlinkindex("T34", TuboT34idx)

Passo 6 → Definição da classe tarifária de energia.

Escolher para cada Centro de Distribuição a modalidade tarifária adequada;

Passo 7 → Definição dos valores dos operadores e parâmetros genéticos.

Introdução no formulário principal (frmMain) dos valores dos operadores e parâmetros que guiarão o processo de convergência do algoritmo genético;

Passo 8 → Inicialização da População

O OptiGA gera aleatoriamente os cromossomos que formam a primeira população. A matriz (24 x 8) representativa da população inicial é denominada BinaryGenes;

Passo 9 → Executa o módulo de otimização

O algoritmo genético é executado pela função optiGA1.RunOptiGA;

Passo 10 → Simulação Dinâmica

Para dar início ao processo de simulação hidráulica foi criada nos códigos do programa a rotina nomeada de Simulação;

Passo 11 → Introdução do contador de intervalos de tempo

A variável cont_passo controla o tempo do processo dinâmico, cujo valor varia de 0 a 24;

Passo 12 → Fixa o estado inicial dos componentes (variáveis de decisão).

Fixação dos estados iniciais dos componentes da rede de acordo com a proposição feita por BinaryGenes quando da primeira geração (NG = 1) e (cont_passo = 0). Exemplo:

```
ENsetlinkvalue(B IR lidx,EN_INITSTATUS,BinaryGenes(cont_passo));
```

Passo 13 → Inicializa o sistema hidráulico.

Através das funções ENopenH, ENinitH e ENrunH(t), presentes no módulo EPANET2.bas, tem início a simulação para NG = 1 e cont_passo = 0;

Passo 14 → Determina valores característicos das bombas

As equações das Tabelas 5.12, 5.13 e 5.14 permitem calcular a eficiência e altura manométrica de cada bomba e a equação (4.1) calcula a potência motriz correspondente para o contador de tempo, cont_passo, corrente;

Passo 15 → Testa tempo de simulação

Compara o valor da variável controladora de tempo atual, `cont_passo`, com o tempo total da simulação. Se for menor retorna ao Passo 10, caso contrário, conclui a simulação para a população estabelecida no Passo 8 e segue ao Passo 16;

Passo 16 → Determina valores das funções de restrição

Para a simulação corrente, as equações (4.12), (4.15) e (4.16) calculam os termos de penalização correspondentes a frequência de acionamento das bombas, recuperação do estado inicial dos reservatórios e garantia de suprimento a rede;

Passo 17 → Determina valor da função de aptidão

A função de aptidão é resolvida, conforme equação (4.17).

Passo 18 → Testa critério de parada

Se o valor da função de aptidão (Passo 17) atende o critério de parada pré-definido do algoritmo, então o processo é interrompido e a configuração matriz `BinaryGenes` corrente será a solução de custo mínimo. Caso contrário, a rotina é dirigida ao Passo 19 em busca de melhores cromossomos;

Passo 19 → Aplicação dos operadores genéticos

A população corrente é submetida aos operadores probabilísticos genéticos definidos no Passo 7;

Passo 20 → Imprime a solução econômica

Imprime num formulário específico a regra operacional diária de melhor eficiência energética obtida no Passo 17.

A tela principal do programa onde se dá a introdução de dados no programa, bem como, é exibida a melhor estratégia operacional encontrada é apresentada na Figura 6.1 do Capítulo de Resultados e Análises.

CAPÍTULO 5

APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

A elaboração de um planejamento operacional otimizado de uma rede hidráulica requer uma análise contínua do comportamento hidráulico dos seus vários elementos constituintes, para vários cenários factíveis. A complexidade de se encontrar a melhor combinação das variáveis de decisão escolhidas para o sistema exigiu um tratamento matemático apresentado no Capítulo 4, resultando numa interface computacional denominada OTIMIZE, escrita na linguagem *Visual Basic 6* que apresenta a regra operacional mais econômica em termos energéticos para um horizonte de trabalho de 24 horas.

Para validar os resultados alcançados pela metodologia empregada necessário se faz a sua aplicação a um sistema real representado pelo seu modelo hidráulico no programa EPANET2 descrito no Capítulo 4, de forma a avaliar o comportamento dos parâmetros hidráulicos resultantes e diagnosticar a viabilidade operacional da metodologia proposta. Com esse fim, foi escolhida uma rede hidráulica de porte médio e grande complexidade que funciona como um dos sistemas adutores que abastece a cidade de João Pessoa - Paraíba.

O estudo de caso em modelo desse porte deverá dar validação e sensibilidade à metodologia empregada, servindo de suporte a estudos maiores e mais complexos, nos quais a ordem de redução de custos de operação, foco principal deste trabalho, tenha uma maior magnitude.

A idade do sistema, cerca de 40 anos, acarretou dificuldades adicionais, além daquelas inerentes ao tema da pesquisa, uma vez que, para viabilizar a elaboração do modelo hidráulico do sistema todo cadastro técnico das unidades físicas foi refeito, cotas (altitudes) foram levantadas com GPS topográfico, às gastas válvulas (registros) de gaveta mereceram um estudo especial, além das inúmeras consultas a técnicos que não mais pertencem ao corpo funcional ativo da empresa necessitaram serem feitas. Para os parâmetros físicos, hidráulicos e elétricos que não puderam ser medidos no

local, por falta de equipamentos apropriado ou pessoal qualificado, foram consultados os dados dos fabricantes ou adotados valores de uso generalizado na área de abastecimento de água.

5.1 – Estudo de Caso

5.1.1- Descrição do Sistema Estudado

O sistema adutor estudado é operado de forma manual pela Companhia de Água e Esgotos da Paraíba – CAGEPA, sendo responsável pelo abastecimento de água de grande parte da região central da cidade de João Pessoa - PB. Seu Centro de Controle de Operação - CCO fica localizado na Regional Marés da CAGEPA, nas proximidades da Estação de Tratamento de Águas de Marés - ETA Marés, fronteira com o município de Santa Rita-PB. O sistema foi espacialmente dividido em três Centros de estudo: o Centro Marés, o Centro R1 e o Centro R2, destacados na Figura 5.1 que mostra uma visão global do sistema ao longo do seu trajeto real.

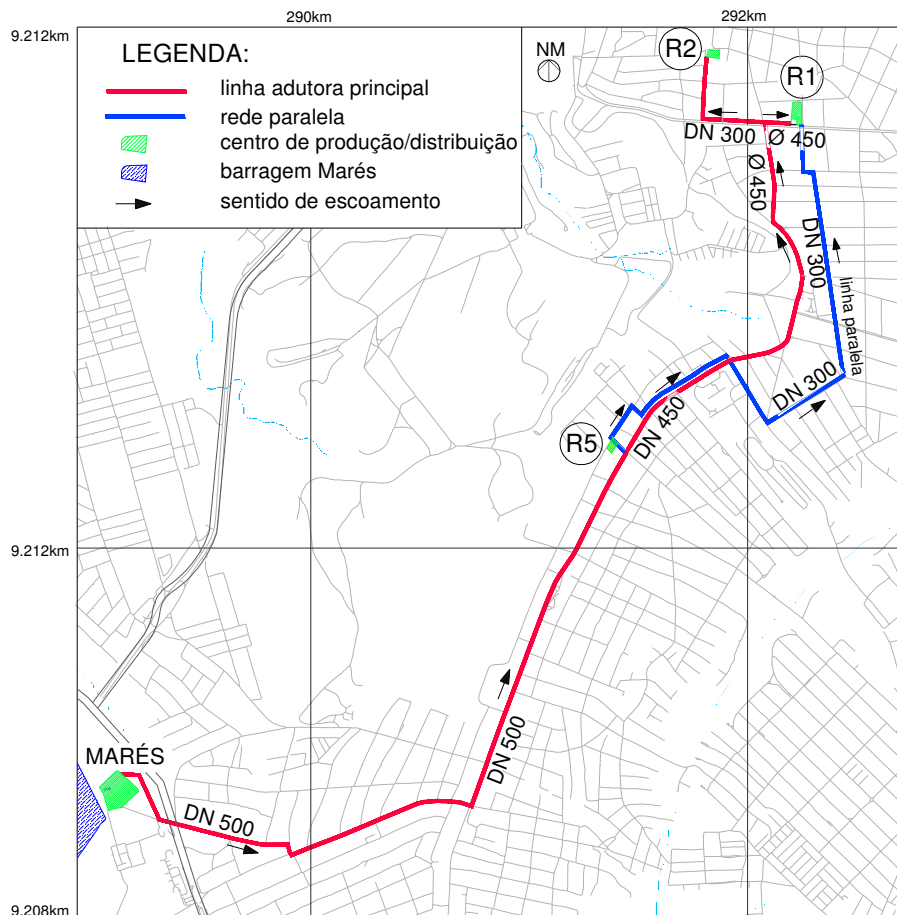


Figura 5.1 – Caminhamento da linha adutora até os centros de distribuição.

A Figura 5.2 apresenta um esquema completo das várias unidades que compõem o Sistema Adutor Marés. Na construção do modelo digital algumas simplificações foram implementadas com vistas à melhoria do desempenho hidráulico das muitas simulações realizadas ao longo do processo de otimização.

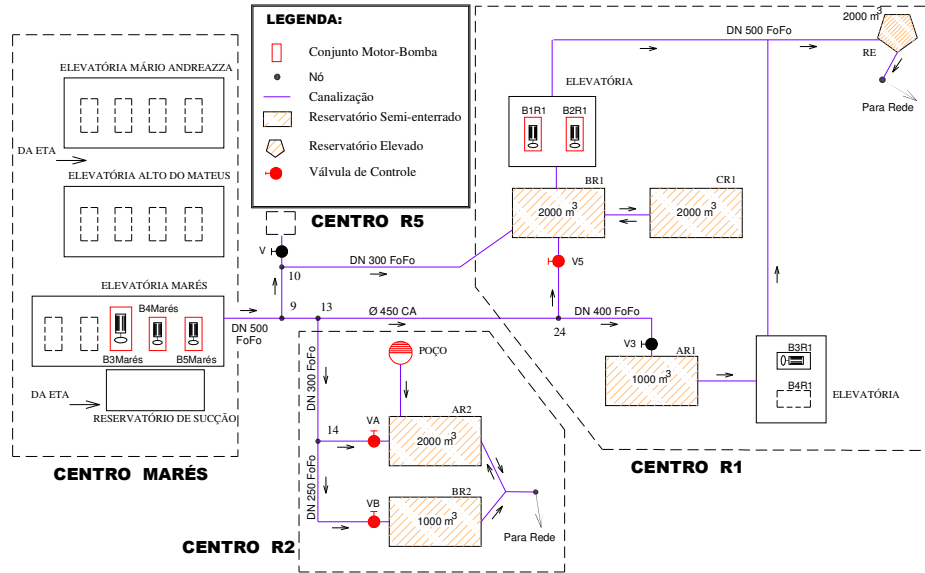


Figura 5.2 – Esquema geral do sistema adutor Marés

O número de componentes distribuídos ao longo do sistema e incorporados ao modelo no EPANET2 obedece à distribuição da Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Distribuição quantitativa das unidades do Sistema Marés

NOME DA UNIDADE	QUANTIDADE
Reservatório de Nível Constante	01
Reservatório de Nível Variável	05
Bomba	07
Válvula	04
Canalização	37
Nó	34

Nas tubulações de saída de cada elevatória do sistema e na entrada de cada Centro de Distribuição existe um Te de Derivação (TAP) destinado a permitir avaliação das grandezas relacionadas ao escoamento, especialmente vazão e pressão dinâmica.

5.1.1.1 – Centro de produção Marés

Localiza-se no município de João Pessoa numa região fronteira ao município de Santa Rita na Paraíba, distando cerca de 5,5 km do centro da capital. Foi edificado na década de 60 nas vizinhanças de barragem Marés, manancial que abastece grande parte da capital paraibana. Sua altitude média é 7,527 m.

Basicamente é formado por uma elevatória que abriga cinco bombas de média pressão e rotação constante (Figura 5.3), das quais apenas três (B3MARÉS, B4MARÉS e B5MARÉS), fazem parte do sistema adutor Marés. As demais, embora abrigadas na mesma elevatória, são componentes de um outro sistema de recalque, independente do sistema estudado.



Figura 5.3 – Vista interior da elevatória Marés.

A distribuição da potência nominal de cada motor se dá da seguinte forma: dois motores de 500 CV operativos, podendo trabalhar associados em paralelo, e um de 750 CV de reserva. A estação de tratamento Marés que tem o potencial para beneficiar até 1500 l/s de água abastece, logo a jusante, três casas de bombas responsáveis pela alimentação de vários setores da Grande João Pessoa, dentre as quais encontra-se a elevatória intitulada Marés, que compõe a primeira unidade do sistema adutor estudado.

No planejamento operacional do sistema adotado pela CAGEPA procura-se manter o poço de sucção dessa elevatória com o nível de água próximo do limite máximo para garantir que as bombas trabalhem afogadas, além da continuidade do bombeamento mesmo com eventuais manobras rápidas na ETA. Esse poço de sucção foi modelado no EPANET2 como reservatório de nível constante (RNF) representando um manancial com nível piezométrico estático na cota 6132 metros.

As características principais dos conjuntos elevatórios dessa estação de bombeamento são apresentadas no Tabela 5.2, abaixo.

Tabela 5.2 – Dados dos conjuntos elevatórios de Marés.

ID	BOMBA			MOTOR		
	Fabricante	Modelo	Rotor (pol)	Fabricante	Potência (cv)	Rotação (rpm)
B3Marés	Worthington	12-LN-26	25 1/2	Arno	750	1175
B4Marés	Worthington	8-LN-21	21	Arno	500	1765
B5Marés	Worthington	8-LN-21	20	Arno	500	1765

Para atenuar os inconvenientes nas partidas e paradas dos motores, os mesmos são acionados por meio de um limitador de torque que reduz o estresse mecânico e os custos de manutenção. Esse dispositivo de controle colocado na válvula de saída das bombas é um conjunto de engrenagens com o objetivo de reduzir a velocidade de rotação dos fusos das válvulas e desligar automaticamente o motor ao final do processo. Pode ser visto na Figura 5.3 em substituição ao volante das válvulas.

A linha de recalque principal é constituída por dois trechos contínuos interligados pelo Nó 9 mostrado na Figura 5.2. O primeiro trecho é formado por 3704 m de tubos de ferro fundido, DN 500, e o segundo com 2298 m de extensão é constituído por tubos de cimento-amianto, ϕ 450 mm, totalizando 6002 metros de linha adutora até

sua chegada ao Centro de Distribuição R1. Quase ao final da linha tronco (Nó 13) tem início uma sub-adutora de 605 m de comprimento formada por tubos de ferro fundido, DN 300, responsável principal pelo abastecimento de água a um outro Centro de Distribuição denominado de R2.

Emergencialmente e por pouco tempo, a linha adutora atende ao Centro de Distribuição R5, responsável pelo abastecimento do bairro Cruz das Armas e adjacências. Esse suplemento eventual de água se dá através de uma derivação na linha tronco pelo Nó 9, em 84 m de tubos de ferro fundido, DN 300, prolongado por mais 2.731 m até o reservatório BR1 do Centro R1, passando a ser uma linha “paralela” à adutora principal (Figuras 5.1 e 5.2). A CAGEPA justifica a existência desse trecho secundário como uma forma de atenuar a sobre-pressão na linha principal decorrentes de eventuais manobras de fechamento parcial da válvula, V5, localizada no Centro R1, causa de rompimentos da linha adutora no seu trecho final constituído por tubos de cimento-amianto.

5.1.1.2 - Centro de distribuição R1

O Centro de Distribuição, R1, está localizado nas coordenadas UTM (292.217 m; 9.212.009 m) e altitude 49,881 m. Atende uma área de influência de aproximadamente 1400 ha, abrangendo os bairros Centro, Jaguaribe, Cidade Padre Zé e Roger, em João Pessoa-PB, distando 140 m do início da sub-adutora que alimenta o Centro de Distribuição, R2, conforme ilustra a Figura 5.1.

É formado por três reservatórios semi-enterrados (AR1, BR1 e CR1), totalizando um volume de 5000 m³, duas elevatórias com duas bombas, e um reservatório elevado (RE) de montante com capacidade para armazenar 2000 m³ de água.

O desenho da Figura 5.4 ilustra a locação das unidades constituintes desse Centro que está localizado na Rua Diogo Velho.

NOTAÇÃO E LEGENDA:

- AR1 Reservatório de Nível Variável (semi-enterrado)
 BR1 Reservatório de Nível Variável (semi-enterrado)
 CR1 Reservatório de Nível Variável (semi-enterrado)
 RE Reservatório de Nível Variável (elevado)
 EE Estação Elevatória
- Canalização
 ⊗ Válvula de Controle ou TAP
 → Sentido do Escoamento

OBSERVAÇÃO:

Os reservatórios BR1 e CR1 constituem um sistema de vasos comunicantes.

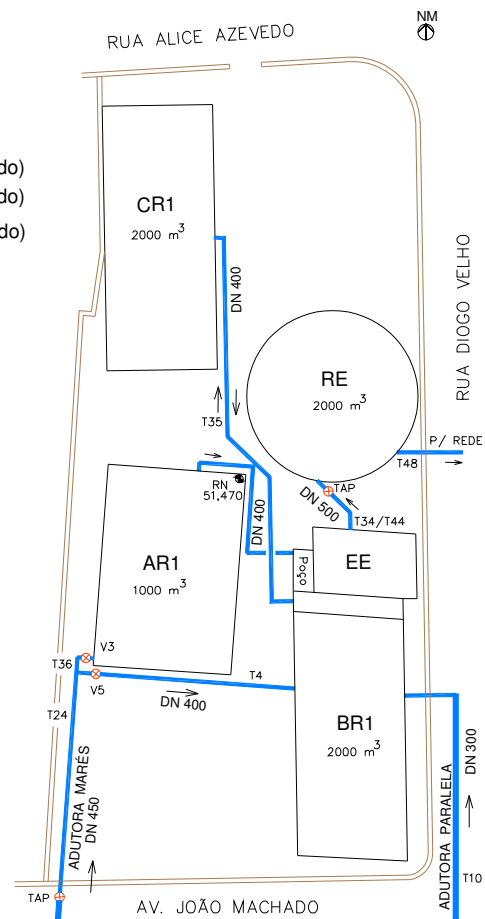


Figura 5.4 – Esquema geral do sistema distribuidor R1.

A chegada da água ao Centro se dá diretamente no reservatório semi-enterrado, BR1, de onde é recalçada para o reservatório elevado, RE, através de uma curta adutora de 43 m de extensão em ferro fundido, DN 500, com auxílio das bombas B1R1 e/ou B2R1, vencendo um desnível máximo de 19,769 metros. O reservatório BR1 também se interliga, por meio de uma canalização de ferro fundido DN 400, com o reservatório, CR1, edificado nas suas proximidades com as mesmas dimensões e mesma cota de fundo (48,686 m), formando um sistema de vasos comunicantes. No modelo hidráulico construído no EPANET2, o volume do reservatório CR1 foi incorporado ao do reservatório BR1, passando a constituir um único reservatório com os mesmos níveis operacionais originais.

O volume armazenado no reservatório semi-enterrado, AR1, é considerado pela CAGEPA como reserva técnica para atender as demandas da área nos meses de maior solicitação. Nessas ocasiões, essa unidade passa a operar normalmente no sistema contando com a ajuda das bombas B3R1 ou B4R1 para recalcar água até o reservatório elevado, RE. Como essas duas bombas não fazem parte da operação normal diária do sistema na maioria dos meses do ano, não foram incluídas no conjunto de variáveis de decisão da função objetivo.

Embora as quatro bombas retirem água de dois reservatórios diferentes (BR1 e AR1), elas estão abrigadas na mesma casa de bombas, como ilustra a Figura 5.5. As características principais dos conjuntos elevatórios estão listadas na Tabela 5.3.



Figura 5.5 – Elevatória do Centro de Distribuição, R1.

Por um defeito de estanqueidade na válvula, V3, (Figura 5.2) que controla o fluxo de água para o reservatório AR1, uma vazão estimada de 10 l/s aflui a essa unidade mesmo estando à válvula totalmente fechada. Para evitar o seu transbordamento a bomba B3R1 ou B4R1 é acionada uma hora por dia para fazer cair o nível de água no seu interior, sendo a água recalçada para o reservatório, RE (Figura 5.6).

Tabela 5.3 – Dados dos conjuntos elevatórios da Região R1.

ID	BOMBA			MOTOR		
	Fabricante	Modelo	Rotor	Fabricante	Potência (cv)	Rotação (rpm)
B1R1	Worthington	6 CNE-104	10 ^{3/4} "	Arno	60	1750
B2R1	Worthington	6 CNE-104	10 ^{3/4} "	GE	75	1750
B3R1	Worthington	6 CNE-104	10 ^{3/4} "	Arno	60	1750
B4R1	Worthington	6 CNE-104	10 ^{3/4} "	GE	75	1750

O controle de admissão da água ao reservatório BR1 pela adutora principal é feito através de uma válvula de gaveta, V5, instalada ao nível do terreno distante 25 m daquele reservatório. Muito embora esse tipo de dispositivo de controle não seja recomendado para funcionar parcialmente aberto, a regra operacional implementada pela CAGEPA recomenda o seu fechamento parcial (80%), durante algumas horas do dia (normalmente de madrugada), de forma a privilegiar a vazão aduzida por Marés em direção ao Centro de Distribuição R2.



Figura 5.6 - Reservatório elevado (RE) do sub-sistema R1.

Os reservatórios não dispõem de sensores de nível, sendo a variação da carga hidráulica acompanhada através de régua graduadas instaladas em cada reservatório.

5.1.1.3 - Centro de distribuição R2

O Centro de Reservação e Distribuição, R2, também edificado na zona central da capital paraibana nas coordenadas UTM (291.844; 9.212.276) e altitude 49,420 m, é constituído por dois reservatórios semi-enterrados (AR2 e BR2), com capacidade total para armazenar 4000 m³, responsáveis pela distribuição de água por gravidade para grande parte da cidade baixa de João Pessoa, abrangendo uma área aproximada de 495 ha, onde predomina imóveis com características comerciais, distribuídos pelos bairros Varadouro e Distrito Mecânico. É alimentado pelo sistema Marés através de uma sub-adutora de tubos de ferro fundido, DN 300 com 605 m de comprimento. Nas horas do dia de maior demanda de água esse Centro recebe reforço de 11,95 l/s de um poço artesiano com 176 m de profundidade (ϕ 150 mm), localizado ao lado do reservatório AR2.



Figura 5.7 – Centro de reservação e distribuição R2.

As características do conjunto submerso, fornecidas pela CAGEPA, são apresentadas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Dados do conjunto elevatório submerso da Região R2

ID	BOMBA			MOTOR	
	Fabricante	Tipo	Diâmetro (mm)	Tipo	Potência (cv)
BPoço	GRUNDFOS	SP 60-11	150	Franklin 6"	37

A disposição das unidades dentro da área do Centro R2 é vista na Figura 5.7.

Na sua concepção os dois reservatórios semi-enterrados estão assentados em planos topográficos diferentes e ambos podem abastecer simultaneamente a rede de distribuição (Nó Rede_R2). O desequilíbrio entre seus níveis piezométricos faz com que o reservatório BR2, de maior cota piezométrica, tenha capacidade de abastecer, tanto a rede do setor, como o reservatório AR2, exigindo periodicamente manipulação de válvulas de controle para evitar perda de água por extravasamento. Esse inconveniente torna inconstante a operação desse subsistema, exigindo maior controle dos níveis de água nos reservatórios.

No modelo hidráulico construído no EPANET2 foi instalada uma válvula de retenção na saída do reservatório AR2, como forma de direcionar o fluxo de água apenas para a rede de distribuição, simplificando o processo. Também as válvulas tipo gaveta que controlam o fluxo de entrada aos dois reservatórios foram abstraídas no modelo computacional, passando esses controles a serem exercidos pelo estado (aberto ou fechado) dos condutos T14 e T19 que alimentam aqueles reservatórios.

A Figura 5.8 mostra uma vista parcial dos dois reservatórios da região R2, na qual pode-se observar as diferentes alturas entre eles.



Figura 5.8 – Vista do sistema de reservação e distribuição R2.

Os subsistemas R1 e R2 distam cerca de 480 m um do outro e praticamente, estão assentes na mesma cota topográfica e abastecem regiões distintas do Centro da cidade de João Pessoa.

A Figura 5.9 mostra os limites da área de influência dos reservatórios R1 e R2, definidos pela CAGEPA.

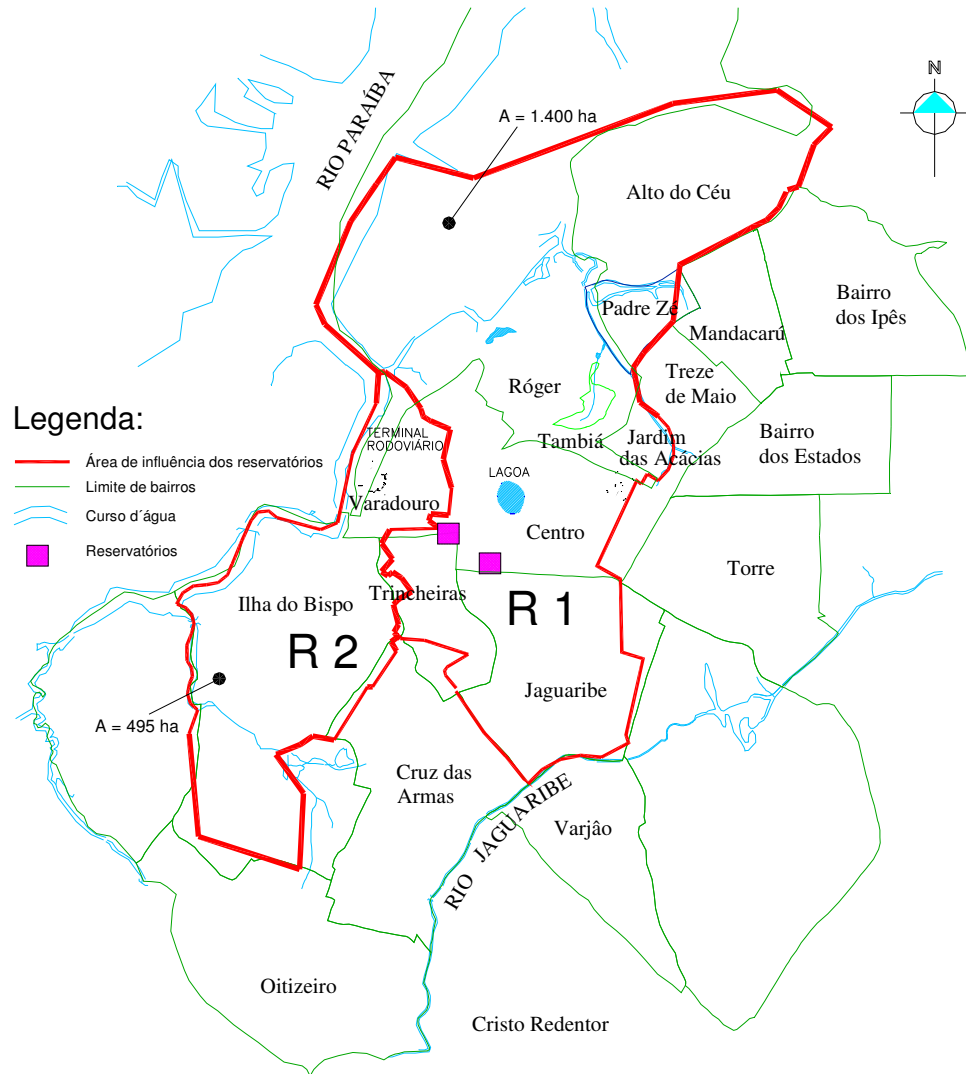


Figura 5.9 – Área de influência dos Centros de Distribuição R1 e R2.

5.1.2 - Definição das vazões aduzidas

As variações climáticas na cidade de João Pessoa, localizada no nordeste brasileiro, exercem forte influência nas demandas de água para abastecimento humano, observando-se uma maior predominância de consumo entre os meses de outubro a abril. A CAGEPA monitora o volume recalcado nas suas adutoras através de medições continuadas de vazão ou estimando esse volume pelo número de horas de funcionamento de cada bomba.

No presente trabalho, o banco de dados da Companhia foi utilizado para selecionar três meses críticos do ano em termos de consumo, para estabelecer as vazões médias transitadas em direção a cada centro de distribuição do sistema Marés e que alimentarão o modelo hidráulico construído no EPANET2. A Tabela 5.5 reproduz os volumes afluentes correspondentes aos meses de novembro, dezembro de 2004, e janeiro de 2005.

Fonte: CAGEPA

MÊS	CENTRO R1		CENTRO R2			
	Vol. afluente (m ³) MARÉS	Vazão (l/s)	Vol. afluente (m ³) MARÉS	Vol. afluente (m ³) POÇO	Vol. afluente total (m ³)	Vazão (l/s)
Nov/2004	584.504	225,5	173.316	29.822	203.138	78,4
Dez/2004	652.529	243,6	145.099	31.978	177.077	66,1
Jan/2005	651.218	243,1	181.141	34.289	215.430	80,4
	Média	237,4			Média	75,0

Tabela 5.5 – Volumes aduzidos aos centros de distribuição

A partir destes dados, a vazão média adotada para um dia típico no nó de alimentação do Centro R1 foi de 237,4 l/s e a correspondente para o nó do Centro R2 foi de 75,0 l/s.

5.1.3 - Levantamento do sistema estudado

Dentro do contexto deste trabalho, a representação do sistema físico escolhido dentro do módulo de simulação hidráulica, se constitui numa das etapas mais

importantes e delicadas da pesquisa. O modelo resultante deverá refletir o mais fiel possível o comportamento do sistema adutor em toda sua amplitude de trabalho, considerando, sempre que possível, suas particularidades físicas e operacionais, de forma que os valores obtidos nas simulações efetuadas se aproximem daqueles obtidos no sistema real, para que o mesmo possa ser considerado como ferramenta de gestão na prática das empresas de abastecimento.

Essa etapa do trabalho demanda bastante tempo para coletar inúmeras e detalhadas informações sobre o sistema, nem sempre disponíveis ao modelador. As companhias de saneamento, via de regra, não possuem dados cadastrais confiáveis e atualizados dos seus sistemas, sendo muitas vezes disponibilizados, incompletos ou em forma esquemática. Para o trabalho de modelação, a boa qualidade dos dados de entrada é imprescindível para que a representação redunde bem ajustada à realidade, transmitindo confiabilidade nos seus resultados.

No caso particular estudado, a idade avançada do sistema Marés exigiu esforço adicional na sua modelação, em face da necessidade de levantamento completo de todas as unidades distribuídas pelas três regiões abrangidas pelo sistema. As informações buscadas para montagem do modelo podem ser resumidas nas seguintes ações:

a) Levantamento planialtimétrico e cadastral das casas de bomba e reservatórios → fase inicial de coleta de dados para alimentação de informações ao modelo. Trabalho desenvolvido com o auxílio de uma equipe de topografia operando os equipamentos, Estação Total e GPS topográfico, para definir pontos para locação dos imóveis, dimensões internas dos reservatórios, cotas dos níveis limites de operação, cota do eixo das bombas; calibração das réguas medidoras de nível, entre outros;

b) Representação gráfica das unidades envolvidas na operação. → fase na qual se elabora a planta cadastral de cada Centro e a planta individual de cada unidade, além de estabelecer a distribuição espacial da linha adutora e suas ramificações;

c) Inventário dos equipamentos mecânicos e eletromecânicos. → identificação das características dos dispositivos de controle que terão influência direta no processo de otimização da função objetivo, com destaque para os tipos de válvulas de controle de fluxo e dados disponíveis dos motores e bombas;

d) Medição de vazão e pressão. → através de medidores e registradores instalados na saída da elevatórias, algumas medições de vazão e pressão foram feitas para definição das curva característica das bombas;

e) Engajamento do modelador à equipe de tomadores de decisão para melhor compreensão dos procedimentos operacionais em cada subsistema.

Uma vez coletados e introduzidos todos os dados no modelo computacional, este deve alcançar o equilíbrio hidráulico e apresentar as variáveis hidrodinâmicas, pressão e vazão, em todos os pontos e instantes de tempo, em função das curvas de demanda conhecidas. O modelo assim encontrado ainda é considerado provisório, passando a ser ferramenta de trabalho após o processo de calibração.

O estudo de caso em um modelo de médio porte deverá dar validação à metodologia proposta, servindo de suporte a estudos maiores e mais complexos, nos quais a ordem de redução de custos de operação, foco principal deste trabalho, tenha uma maior magnitude.

Em concordância com esse procedimento, adotou-se neste trabalho, o alcance operacional de 24 horas, divididos em períodos regulares de uma hora, intervalo em que as condições operacionais do sistema permanecem constantes. Em vista disso, os códigos da rotina OTIMIZE foram escritos para só permitir mudança de estado das variáveis de decisão nas denominadas “horas válidas”, ou seja, quando o contador de tempo for igual a 0, 1, 2, 3, 4,....., 23. A adoção deste horizonte de operação apresenta a vantagem de contemplar todas as variações diárias das tarifas de consumo e de demanda levadas a efeito nesse estudo.

Vale ressaltar que a discretização horária não interfere no ajuste do passo de cálculo hidráulico no simulador EPANET2, que é o intervalo de tempo entre cálculos sucessivos com o conjunto de equações que regem o escoamento da água na rede na busca do equilíbrio hidráulico. Nas análises feitas durante o processo de busca da melhor solução adotou-se para esse passo o valor padrão do EPANET2 que é de 1 hora. Valores menores aumentam bastante o esforço computacional do modelo no processo de convergência do Algoritmo Genético.

A topologia do sistema adutor Marés é apresentada na Figura 5.10.

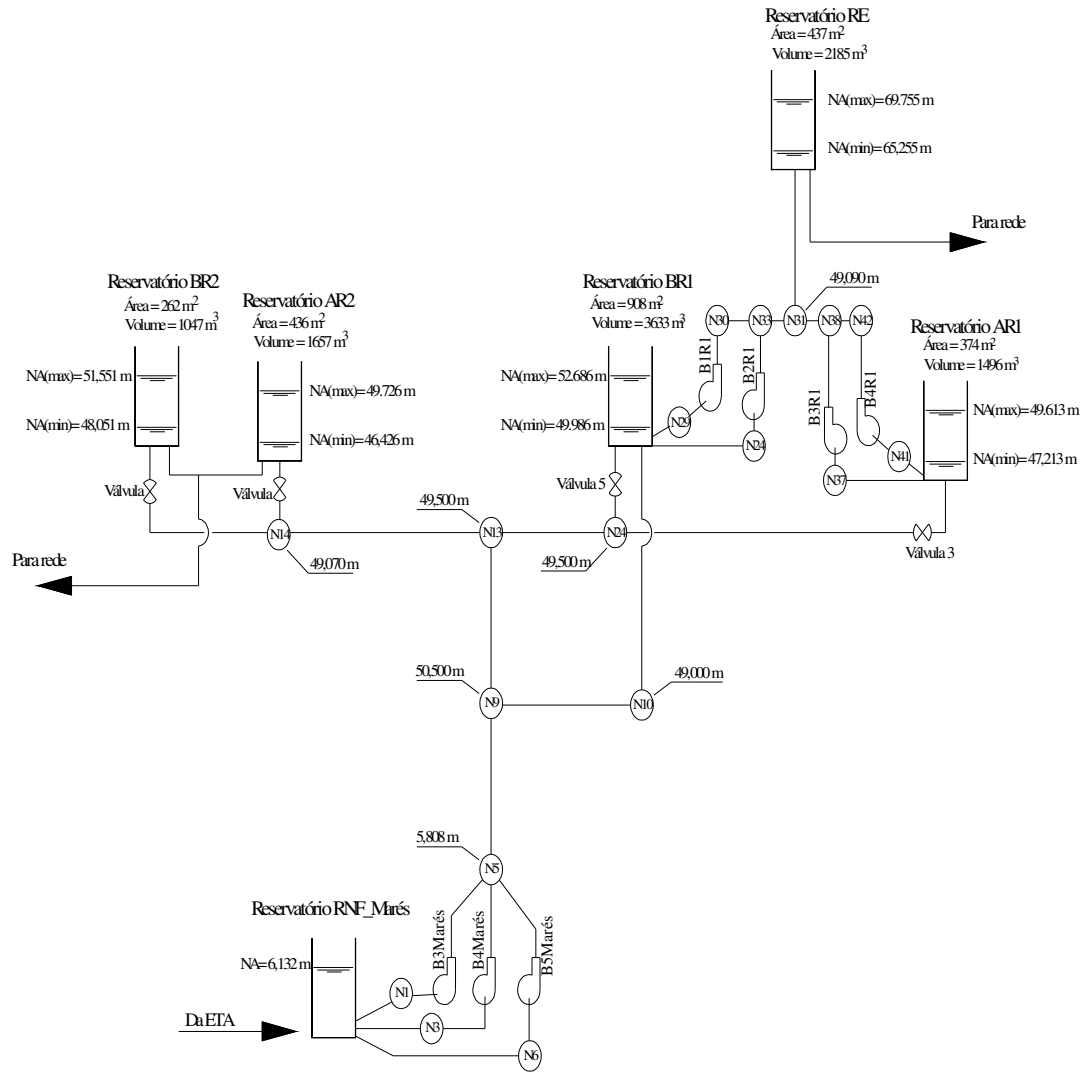


Figura 5.10 – Topologia do sistema adutor Marés.

5.1.3.1 - Calibração

A complexidade de modelação dos sistemas de abastecimento de água é um fato destacado por aqueles que necessitam dessa ferramenta para auxiliar na gestão desses sistemas. As dificuldades derivam, principalmente, do envolvimento de muitas equações de natureza não-linear, além da necessidade de alocação no modelo de um grande número de parâmetros de difícil quantificação prática, como é o caso da rugosidade interna dos tubos, diâmetro interno e curva de modulação de consumo. Todas essas incertezas pode tornar os resultados da simulação discrepantes daqueles

registrados em equipamento instalados em campo, sabendo-se também que, as próprias medidas de pressão e vazão carregam imprecisões inerentes aos próprios aparelhos.

Para uma simulação hidráulica ter validade é necessário inicialmente que se calibre o modelo construído (Pedrosa Filho, L. et al., 2005). Portanto, a calibração é um procedimento que deve ser feito antes de qualquer análise operacional, caso contrário os resultados encontrados podem ser considerados como irrealistas.

O processo de calibração é essencialmente um problema de otimização cujo objetivo é estimar um conjunto de parâmetros físicos e operacionais com o propósito de alcançar a minimização das diferenças entre os valores de pressões e vazões medidas no modelo real e aqueles obtidos pela simulação. Ormsbee e Wood (1986) afirmam que a calibração sobre a ótica da otimização somente será uma técnica útil se os dados coletados em campo forem de boa qualidade.

Muitos são os modelos analíticos encontrados na literatura para calibração de uma rede de abastecimento de água, destacando-se Walsky (1983), Bhave (1988), entre outros. As técnicas empregadas ou ajustam apenas os coeficientes de resistência das tubulações, ou ajustam estes coeficiente simultaneamente com os valores de demanda em cada nó da rede.

Com o avanço tecnológico dos computadores, a metodologia dos Algoritmos Genéticos vem sendo extensivamente explorada com sucesso na calibração de redes de abastecimento, além do que essa tarefa vem sendo facilitada por alguns pacotes computacionais de abastecimento de água que vêm acompanhados de um módulo de calibração de redes, como é o caso dos programas EPANET2 e H₂ONET. Um estudo comparativo sobre a eficiência de alguns processos de calibração em redes hidráulicas pode ser consultado no trabalho de Cheung (2001).

Dentro da temática desenvolvida nesta pesquisa, uma vez encontrada a solução de custo mínimo pelo Algoritmo Genético, ela deverá em seguida ser simulada pelo EPANET2, para mostrar o comportamento dos níveis de água nos reservatórios a cada hora do dia, de forma a proporcionar uma eventual intervenção para corrigir alguma distorção de ordem operacional. Desta forma, deve-se dispor de uma rede calibrada no espaço e no tempo, satisfazendo inclusive, combinações de bombas e válvulas não usuais nas políticas adotadas pela empresa de abastecimento.

Quando a rede a ser calibrada tratar-se de uma linha adutora completa abrangendo múltiplas estações de bombeamento, vários reservatórios, diversas válvulas de controle, além de vários padrões de demanda, observa-se que as técnicas disponíveis

empregadas para calibrar redes de distribuição necessitam serem adaptadas a esse tipo de sistema, devido ao surgimento de novas funções não-lineares relativas as curvas características das bombas, $(H_m \times Q)$, as curvas de calibração das válvulas, $(K_S \times \theta)$, em que, H_m é a altura manométrica total; Q é a vazão bombeada; K_S o coeficiente de perda de carga localizada e θ o grau de abertura das válvulas.

Observa-se na literatura especializada uma abundância de investigações enfocando calibração de redes de distribuição de água, entretanto existe uma lacuna de trabalhos científicos voltados estritamente à calibração de sistemas de adução. Alguns fatores o tornam diferentes do enfoque dado à calibração de redes de distribuição, podendo-se destacar:

1) um sistema adutor é constituído por um conjunto de redes interligadas por estações de bombeamento, ao invés de uma única rede alimentada por um reservatório de cota piezométrica de fácil determinação;

2) no modelo matemático as vazões e pressões estão diretamente vinculadas à qualidade das curvas características de bombas com certo grau de desgaste;

3) as dimensões internas dos reservatórios passam a exercer um papel relevante no processo de calibração;

4) a posição de entrada do tubo de recalque no reservatório influencia no valor da descarga da bomba;

5) uma operação manual completa numa válvula de controle demanda alguns minutos, enquanto no modelo a mudança de estado é instantânea.

6) o acionamento e o desligamento de bombas com auxílio de dispositivos denominados limitorques produz o mesmo efeito descrito no item anterior.

Cada sistema adutor possui suas particularidades que são do conhecimento da equipe operacional, mas que acabam interferindo no processo de calibração. No caso do sistema adutor Marés devem ser mencionadas:

a) insuficiência de equipamentos para medição simultânea de descarga e pressão em vários pontos de controle;

b) utilização de muitos parâmetros hidráulicos e elétricos fornecidos pelos fabricantes dos equipamentos;

c) falta de precisão nas leituras das régua indicadoras das lâminas de água nos reservatórios;

d) imprecisão na anotação dos horários em que ocorrem mudanças operativas em algum equipamento do sistema.

e) a idade avançada da linha adutora estudada, cerca de 40 anos, torna imprevisível a definição correta da rugosidade interna dos condutos, parâmetro fortemente influenciado pela qualidade da água transportada ao longo desses anos. Foi adotado o valor de 3,0 mm (Gomes, 2002) para os tubos de ferro fundido dúctil e 0,1 mm para os tubos de cimento-amianto, valor este quatro vezes maior que aquele recomendado para tubos novos.

f) as curvas de demandas correspondentes aos dois centros de distribuição são relativas à um dia típico da semana, resultado de medições de vazão na saída do reservatório elevado, RE, do Centro R1 e de um balanço de massa nos reservatórios do Centro R2. Tratando-se de uma variável que sofre forte influência sazonal, é recomendado para estudos mais completos e que exija melhor precisão, um estudo mais aprofundado do comportamento da variação horária da demanda, visto que o sucesso da aplicação do simulador hidráulico e por conseguinte do modelo de otimização está intrinsecamente ligado as demandas médias diárias associadas a rede.

Os padrões temporais de demanda dos Centros R1 e R2 são vistos na Figura 5.11, sobressaindo-se a discrepância de comportamento entre eles, tendo como causa principal as diferentes vocações dos setores abastecidos. Os fatores multiplicativos devem ser aplicados aos valores médios de vazão 237,4 l/s para o Centro R1 e 75,0 l/s para o Centro R2.

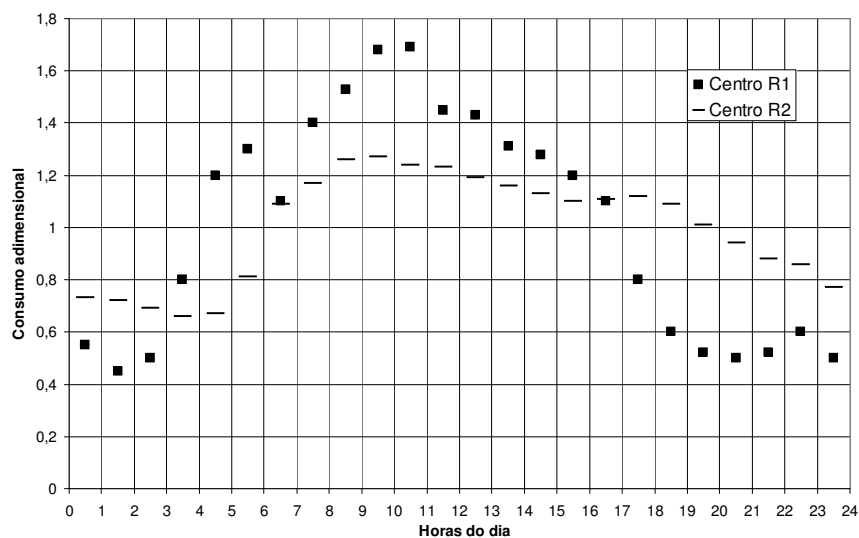


Figura 5.11 – Padrão de demanda horária dos Centros R1 e R2.

g) a válvula de gaveta, V5, na entrada do reservatório B1R1, diariamente passa da posição totalmente aberta (100%) para a posição semi-aberta ($\cong 20\%$), permanecendo nesse estado durante algumas horas de operação. A resistência ao escoamento devido à posição intermediária da cunha ou gaveta no interior da referida válvula é representada pelo coeficiente de perda de carga localizada (K_S) que tem uma relação exponencial com a abertura da válvula;

h) nas manobras da válvula, V5, o seu fechamento parcial se dá manualmente e sem critério técnico definido, resultando a cada operação, diferentes aberturas e conseqüentemente, valores distintos de vazão são escoados.

Levantamentos experimentais comprovam que a relação entre o coeficiente de perda singular (K_S) da válvula e o seu grau de abertura (s/S) obedece a uma relação exponencial determinada experimentalmente. No desenvolvimento desse trabalho, devido à impossibilidade técnica de levantamento dessa curva de calibração, adotou-se como referência os valores encontrados na P-NB-590/77 da ABNT, que plotados resultou no diagrama da Figura 5.12 e curva ajustada,

$$K_S = 169,31 \cdot e^{-7,9725 (s/S)} \quad (5.1)$$

em que e é a constante matemática neperiana.

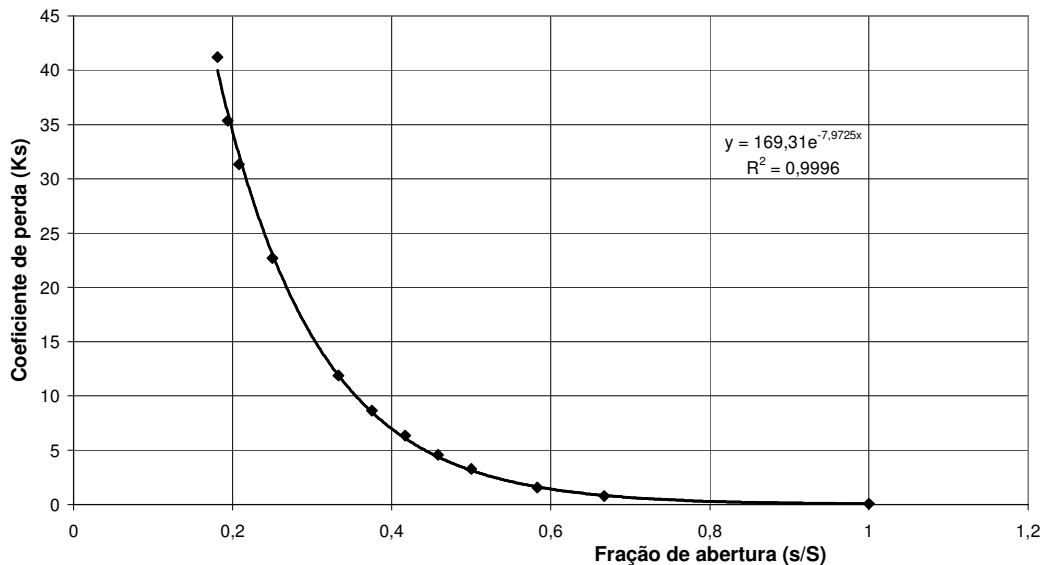


Figura 5.12 - Coeficientes de perdas de carga em válvulas de gaveta. (Fonte: ABNT).

No presente trabalho, a metodologia adotada para calibração do sistema foi considerar como aceitáveis as curvas de demanda e as rugosidades dos tubos, passando

a ajustar, por tentativas, valores de K_S para a válvula, V5, procurando uma melhor concordância entre os níveis de água observados e os simulados.

Inicialmente o arquivo do sistema Marés criado do programa EPANET2, foi alimentado com instruções referentes aos dados operacionais do dia 11/01/2005 tabulados pelo Centro de Controle Operacional da CAGEPA. Esse conjunto de controles simples, escritos em formato adequado, altera o estado dos componentes da rede baseado nos seguintes parâmetros: altura de água num reservatório de nível variável, instante da simulação e instante do dia. Uma parte desse conjunto de controles, correspondente aos horários das 18 horas e 19 horas, é apresentada a seguir:

```
LINK B3_MARES CLOSED AT TIME 18
LINK B4_MARES CLOSED AT TIME 18
LINK B5_MARES OPEN AT TIME 18
LINK B1R1 OPEN AT TIME 18
LINK B2R1 OPEN AT TIME 18
LINK B3R1 CLOSED AT TIME 18
LINK B4R1 CLOSED AT TIME 18
LINK V5 0.058 AT TIME 18
LINK T36 OPEN AT TIME 18
LINK POCO CLOSED AT TIME 18
LINK T14 OPEN AT TIME 18
LINK T19 CLOSED AT TIME 18
LINK B1R1 CLOSED AT CLOCKTIME 6:40 PM
LINK B2R1 CLOSED AT CLOCKTIME 6:40 PM
LINK B5_MARES CLOSED AT CLOCKTIME 6:10 PM
```

```
LINK B3_MARES CLOSED AT TIME 19
LINK B4_MARES CLOSED AT TIME 19
LINK B5_MARES CLOSED AT TIME 19
LINK B1R1 CLOSED AT TIME 19
LINK B2R1 CLOSED AT TIME 19
LINK B3R1 CLOSED AT TIME 19
LINK B4R1 CLOSED AT TIME 19
LINK V5 0.058 AT TIME 19
LINK T36 OPEN AT TIME 19
LINK POCO CLOSED AT TIME 19
LINK T14 OPEN AT TIME 19
LINK T19 CLOSED AT TIME 19
LINK POCO OPEN AT CLOCKTIME 7:10 PM
```

As Figuras 5.13 a 5.17, ilustram os resultados do processo de calibração, mostrando o comportamento da variação das cargas hidráulicas observada e a prevista para os cinco reservatórios do sistema ao longo de um dia de operação. Não houve manobra na válvula de gaveta, V5, e o melhor ajuste para o coeficiente de perda localizada (válvula aberta) foi, $K_S = 0,058$.

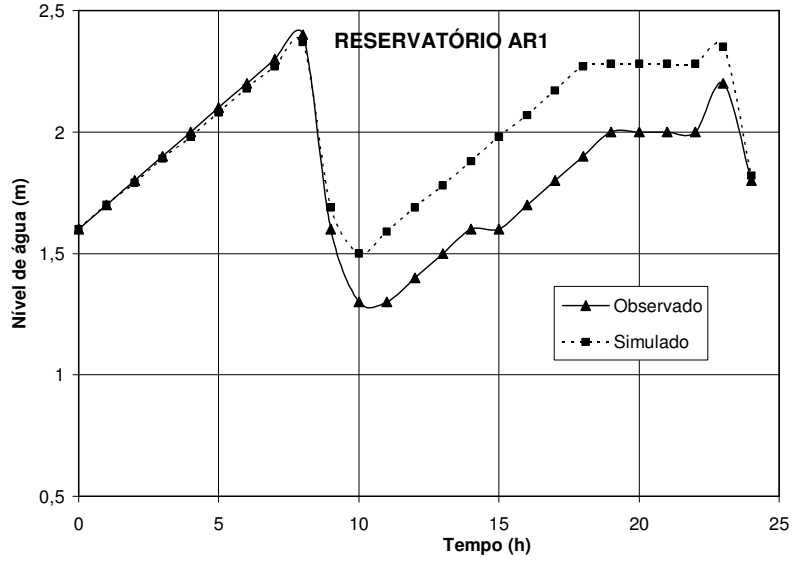


Figura 5.13 - Níveis de água observado e simulado no reservatório AR1.

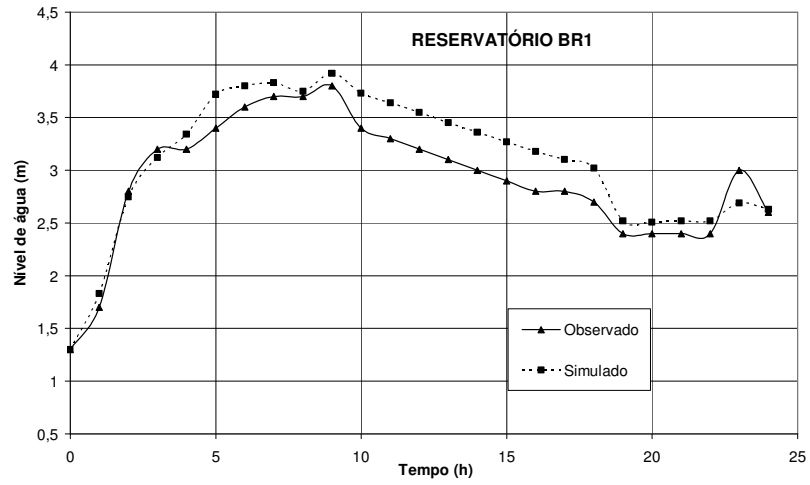


Figura 5.14 - Níveis de água observado e simulado no reservatório BR1.

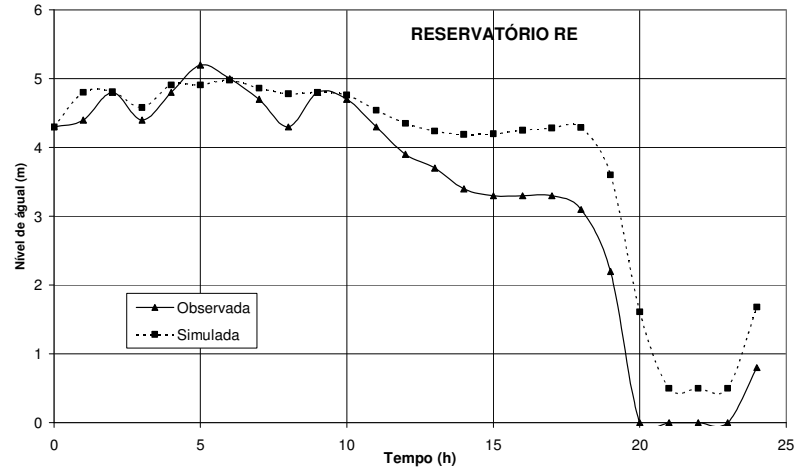


Figura 5.15 - Níveis de água observado e simulado no reservatório elevado RE.

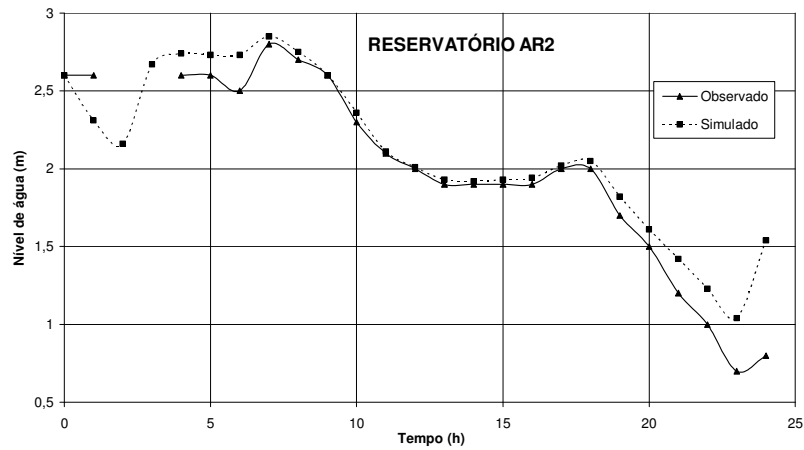


Figura 5.16 - Níveis de água observado e simulado no reservatório AR2.

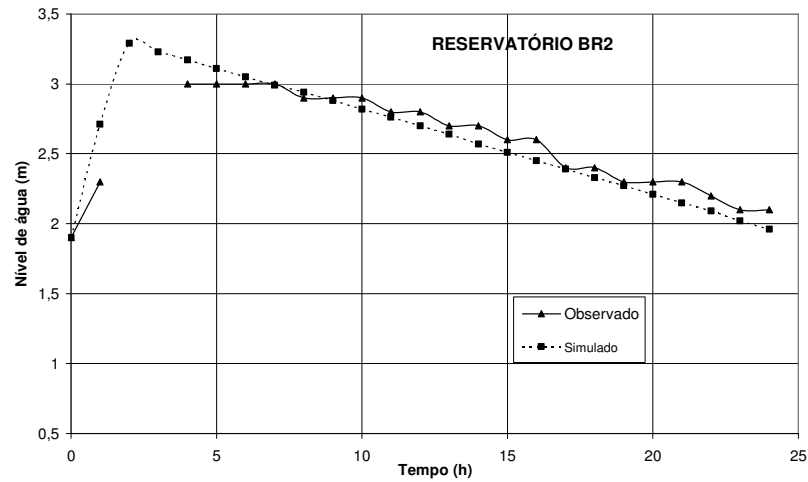


Figura 5.17 - Níveis de água observado e simulado no reservatório BR2.

Apesar das inúmeras imprecisões decorrentes da coleta de informações sobre a operação diária do sistema adutor, a regular concordância observada entre os níveis de água nos reservatórios demonstra o acerto na concepção geral do modelo, qualificando sua utilização para estudos confiáveis sobre o comportamento geral do sistema em períodos estendidos.

A falta de disciplina na manobra das válvulas do sistema, inviabiliza comparar a evolução dos níveis de água nos reservatórios, para mais de um dia de operação, utilizando o mesmo parâmetro de perda de carga localizada. Por esse motivo, o julgamento da boa concordância entre o observado e o esperado obedeceu o critério visual, sem aplicação de parâmetros estatísticos.

A partir dessa afirmação, pode-se concluir que o modelo criado pode ser utilizado na segunda etapa da pesquisa que objetiva a elaboração de uma rotina computacional que permita estabelecer regras de operação aplicáveis aos sistemas adutores de abastecimento de água de forma a minimizar os custos operacionais com energia elétrica.

5.2 - Codificação do Problema

Para implementação do Algoritmo Genético no problema de otimização, cada possível solução proposta, deve ser representada univocamente por um único cromossomo de comprimento C e com $(C-1)$ posições. No presente estudo, os componentes do sistema foram codificados com a representação binária clássica que segundo Sotelo et al. (2001), se ajusta bem aos problemas de programação de bombas.

Teoricamente as variáveis de decisão escolhidas para compor o problema de otimização dos custos energéticos totaliza uma seqüência de nove parâmetros distintos, cada um com 2 *bits* de comprimento, cuja distribuição é representada na Tabela 5.6. Em cada gene está codificada as características de estado de cada componente: ligada ou desliga para as bombas, e aberta ou fechada para as válvulas, exceção feita a válvula V5, da Região R1, cujos dois *bits* correspondem aos estados, aberta ou parcialmente fechada, de forma a guardar correspondência com os estados reais verificados no sistema Marés.

Tabela 5.6 – Lista das variáveis de decisão do problema.

NÚMERO DE BITS	2 bits	2 bits	2 bits	2 bits	2 bits	2 bits	2 bits	2 bits	2 bits
NATUREZA	Bomba	Bomba	Bomba	Bomba	Bomba	Válvula	Bomba	Válvula	Válvula
VARIÁVEL	B3MARES	B4MARES	B5MARES	B1R1	B2R1	VB_R1	POÇO	VA_R2	VB_R2

Uma situação especial ocorre no Centro Marés, onde as bombas B4MARES e B5MARES, ambas com motores de 500 CV são operativas e a bomba B3MARES com motor de 750 CV é reservada para situações emergenciais. Por motivos operacionais, apenas os dois primeiros conjuntos que possuem características semelhantes, podem funcionar associados em paralelo. A bomba de maior porte, B3MARES, pode ser acionada, apenas, quando as outras duas estão desligadas. Por conta disso, apesar de serem consideradas todas como variáveis de decisão e aptas a terem seu estado operativo alterado a cada intervalo de tempo, o número de combinações possíveis entre elas se torna menor. Essa restrição é implementada mais facilmente na construção dos códigos da interface OTIMIZE ao impor que o valor do *bit* da bomba de maior capacidade seja sempre 0 (desligada) quando o valor do *bit* de qualquer uma das outras duas bombas seja igual a 1 (ligada). Com esse artifício o número de indivíduos na população passa a ser $(9 - 1) = 8$ e o número de elementos na matriz *BinaryGenes*, para 24 intervalos de tempo, terá $(8 \times 24) = 192$ *bits*, que confere ao espaço de busca das soluções uma magnitude 2^{192} possíveis soluções para o alcance de um dia de operação do sistema adutor.

5.3 - Tarifação da Energia Elétrica

Nos projetos de eficiência energética é essencial o conhecimento das modalidades tarifárias locais de forma a se definir pelo melhor enquadramento tarifário e acerto do valor contratual de demanda que minimize os custos com energia elétrica. A cobrança da energia consumida é regulada pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. A legislação brasileira permite que a fatura cobrada pelas concessionárias de energia seja calculada a partir da medição do consumo (kWh); da demanda (kW) e do fator de potência. Detalhes do sistema brasileiro de tarifação de energia elétrica podem ser consultados em Tsutiya (2001). A Figura 5.18 apresenta uma visão geral desse esquema tarifário.

Um dos fatores que contribuem para o aumento da carga energética é a impossibilidade de desligamento total das unidades de bombeamento nas horas de maior tarifação energética, já que os volumes dos reservatórios de distribuição não são suficientes para atender as necessidades hídricas da rede nas três horas do horário de ponta. Como exemplo, tarifa horo-sazonal azul Dependendo da classe tarifária, o valor da taxa de consumo na hora de ponta é cerca de nove vezes mais cara que no horário fora de ponta. Logo, o funcionamento de bombas naqueles horários reflete negativamente nas despesas mensais de operação. O acionamento de bombas naquele horário também coloca o sistema próximo do limite de demanda contratada podendo eventualmente ocorrer multas de ultrapassagem.

Dentre as medidas de conservação de energia que podem ser implementadas pelas empresas nos sistemas de abastecimento de água está aquela de melhor adequar às tarifas aos contratos de fornecimento de energia elétrica. Para tanto, as empresas de posse de um histórico de medições recentes podem optar pela adoção de uma única classe tarifária (convencional ou horo-sazonal) para todas as unidades ou ajustar com a concessionária de energia modalidade tarifária diferente para cada unidade de bombeamento de acordo com a melhor resposta financeira que cada alternativa possa resultar.

A proposta de implantação de um programa otimizado de regras operacionais, objetivo principal desse trabalho, trás naturalmente, a alteração da rotina diária de funcionamento de todas as bombas e a conseqüente tentativa de deslocamento das suas curvas de carga do período de ponta para o período fora de ponta, repercutindo diretamente nos valores medidos de demanda e consumo das unidades operacionais. Esse novo quadro de valores propicia fazer uma análise da viabilidade de renegociar os termos contratuais de fornecimento de energia, enquadrando-o em uma situação mais vantajosa.

O modelo proposto OTIMIZE possibilita ao usuário realizar simulações para várias combinações de estrutura tarifária, pesquisando o ajuste que minimize o custo energético global do sistema de recalque. Na rotina computacional, a opção de escolha da classe tarifária é feita na Janela **Configurações**, conforme Figura 5.18. Esse potencial torna-o ainda mais versátil na busca da efficientização energética.

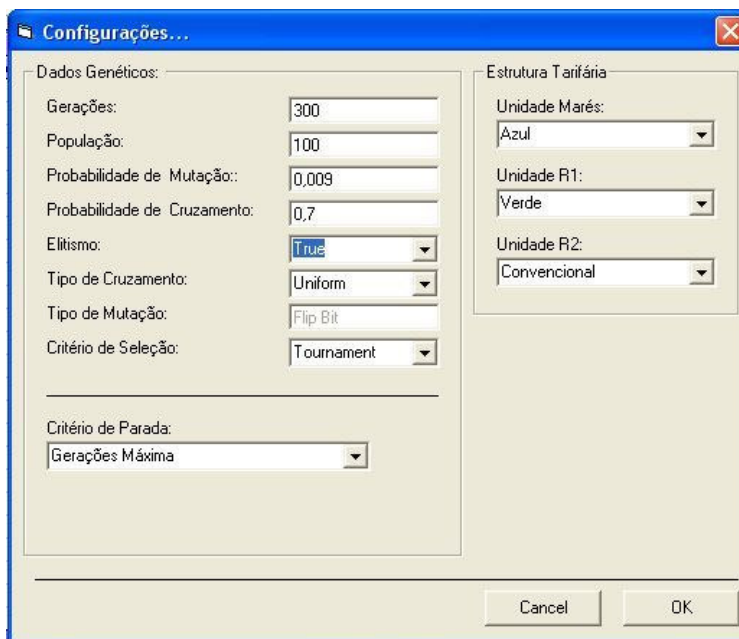


Figura 5.18 - Janela de Configuração de parâmetros do OTIMIZE

As grandes unidades de consumo do sistema de abastecimento de água da cidade de João Pessoa estão enquadradas, segundo classificação da ANEEL, no Grupo A, Sub-Grupo A4 (tensão de fornecimento entre 2,3 kV e 25 kV). Nesse estudo de caso, todas as tarifas unitárias envolvidas no processo de otimização estão apresentadas nas Tabelas 5.7, 5.8 e 5.9, correspondentes ao período de janeiro a abril de 2004.

Tabela 5.7 – Tarifa horo-sazonal Azul e Verde para o Sub-Grupo A4.

Tarifa horo-sazonal azul		Tarifa horo-sazonal verde		
Sub-Grupo A4 (2,3 a 25 kV)	Consumo (R\$/kWh)		Consumo (R\$/kWh)	
	Fora de Ponta		Fora de Ponta	
	Seca	Úmida	Seca	Úmida
	0,11160	0,09586	0,10299	0,0910
	Ponta		Ponta	
	Seca	Úmida	Seca	Úmida
	0,21799	0,19768	0,87986	0,86542
	Demanda (R\$/kW)		Demanda (R\$/kW)	
	Fora de Ponta	Ponta	11,5456	
9,77000	29,76000			

Tabela 5.8 – Tarifa Convencional para Sub-Grupo A4.

Tarifa convencional	
Sub-Grupo A4 (2,3 a 25 kV)	Consumo (R\$/kWh)
	0,16176
	Demanda (R\$/kW)
	13,120

Tabela 5.9 – Tarifa Convencional para Sub-Grupo B3

Tarifa convencional	
Sub-Grupo B3 (< 600 V)	Consumo (R\$/kWh)
	0,29263

Nos termos do contrato de fornecimento de energia elétrica firmado entre a CAGEPA e a Sociedade Anônima de Eletrificação da Paraíba - SAELPA, a unidade consumidora, Marés está sujeita ao regime tarifário horo-sazonal Azul, a unidade consumidora, R1 enquadrada no regime Convencional e o Centro R2, onde opera apenas uma bomba submersa, é cobrado pela tarifação Convencional do Sub-Grupo B3 (baixa tensão).

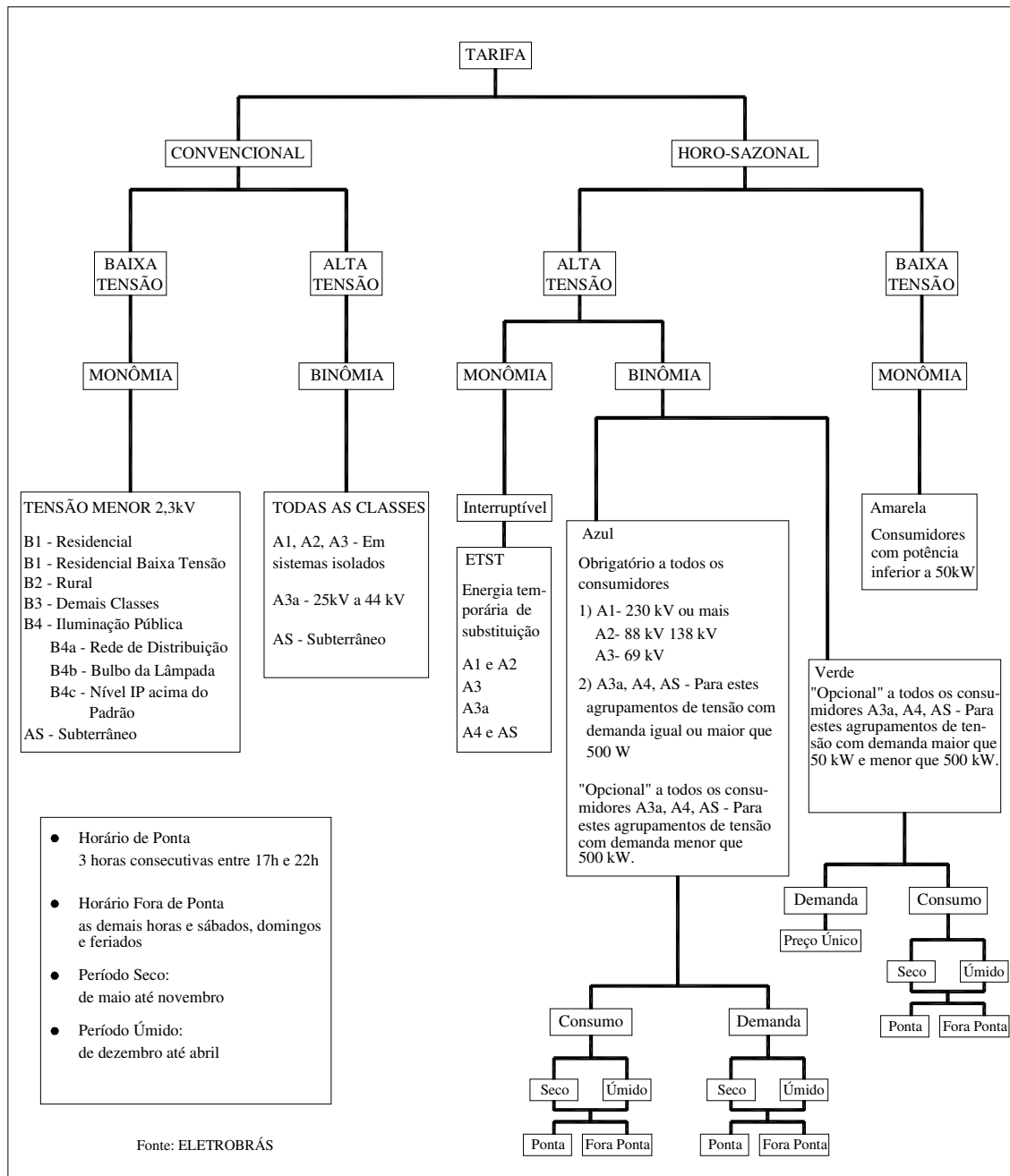
No Estado da Paraíba o horário de ponta estabelecido ocorre entre 17h:30 min e 20h:30 min.

A Tabela 5.10 dá uma visão geral da tarifação adotada pelo sistema elétrico brasileiro, PROCEL (1998). No Apêndice A é apresentado alguns conceitos relativos a sistema tarifário, classificação dos consumidores, modalidades tarifárias e tarifação.

5.3.1 - Medições de consumo de energia

No Centro Marés, o consumo de energia elétrica das três elevatórias presentes naquela região, e da ETA é medido por um único quadro de medição, fato que impossibilitou neste trabalho, uma comparação mais realista dos custos diários medidos com aqueles obtidos pela interface criada.

Nos demais de Centros de Distribuição, R1 e R2, as medições de energia são feitas em quadros próprios para cada estação de bombeamento.



5.4 - Operadores Genéticos

Diversos estudos científicos envolvendo AGs têm como foco principal a determinação dos melhores valores desses operadores genéticos de forma a melhor direcionar o processo evolutivo de forma confiável e rápida para um ponto próximo do ótimo. A definição desses valores é uma das tarefas mais difíceis para quem emprega a técnica dos algoritmos genéticos como ferramenta de otimização, já que a melhor adaptação de um ou outro método para os operadores e os valores adotados para os parâmetros é função da natureza e complexidade do problema a ser resolvido. Goldberg (1989) sugere que uma boa performance do algoritmo requer a seguinte combinação: alta probabilidade de cruzamento, baixa probabilidade mutação e tamanho de população moderado.

No presente trabalho, procurou-se fazer uma análise de sensibilidade entre os métodos disponibilizados pelo *solver* OptiGA na busca da combinação de parâmetros de maior performance na implementação dos Algoritmos Genéticos. Como esses algoritmos são baseados em regras probabilísticas, é necessário que sejam efetuadas várias rodadas, para que se possa decidir o melhor valor.

Geração da População Inicial: sua topologia deve contemplar o maior número possível de regiões do espaço genético garantindo a diversidade de soluções pesquisadas. Para sistemas grandes e complexos, a forma como ela é encontrada tem influência direta no tempo computacional e qualidade do algoritmo.

No caso estudado, a definição da geração inicial de potenciais soluções do problema é feita de forma aleatória segundo metodologia embutida na rotina do OptiGA.

Tamanho da População: especifica a quantidade de cromossomos que haverá em cada geração. Está fortemente ligado ao desempenho global e tempo de processamento computacional. Com uma grande população o AG fica mais lento, mas pesquisa o espaço de solução mais completamente, reduzindo as chances de convergência prematura para mínimos locais. Simpson et al. (1994) recomenda uma população com tamanho entre 30 e 200; o manual do *solver* OptiGA reduz o limite superior sugerido por Simpson para 100.

O tamanho adequado da população, N , para o algoritmo encontrar soluções corretas e rápidas, depende do problema e da sua formulação. Em nossa experiência foi

pesquisado o melhor valor do tamanho da população fazendo-se um trabalho de verificação do melhor rendimento do algoritmo para valores de população 30, 50; 100 e 150, considerando para cada tentativa, as mesmas condições de contorno e mesmos valores de parâmetros genéticos para 30 minutos de processamento.

A Figura 5.19 ilustra os resultados médios encontrados após cinco ensaios de 30 minutos para cada alternativa populacional pesquisada.

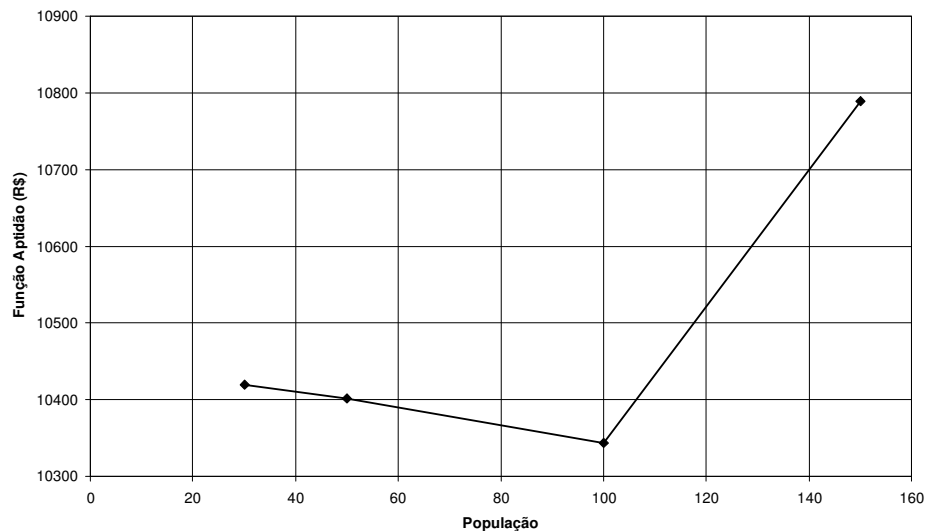


Figura 5.19 – Influência do tamanho da população na função de aptidão.

Nessa experiência, percebe-se que a população formada por 100 diferentes de cromossomos se destaca por alcançar o menor valor da função de aptidão, demonstrando ser o melhor valor testado para ser usado na aplicação do algoritmo genético. Sendo assim, para cada intervalo de uma hora do horizonte de operação, o módulo otimizador apresentará no princípio do processo (população inicial) uma coleção de 100 possíveis soluções do problema que serão levadas, uma a uma, ao simulador hidráulico. Para esse teste, bem como, naqueles de definição das melhores estratégias de seleção, foram anotados, apenas, os valores finais dos valores de aptidão.

Estratégia de Seleção: neste trabalho foram implementados quatro mecanismos de seleção disponíveis no OptiGA: (a) a seleção por roleta; (b) a seleção baseada em torneio; (c) Top Mate e (d) seleção randômica. No caso particular, a Figura 5.20 mostra que a média dos valores da função de aptidão para a seleção baseada em Torneio se mostrou mais eficiente que as demais modalidades para 7 simulações de 30 minutos cada.

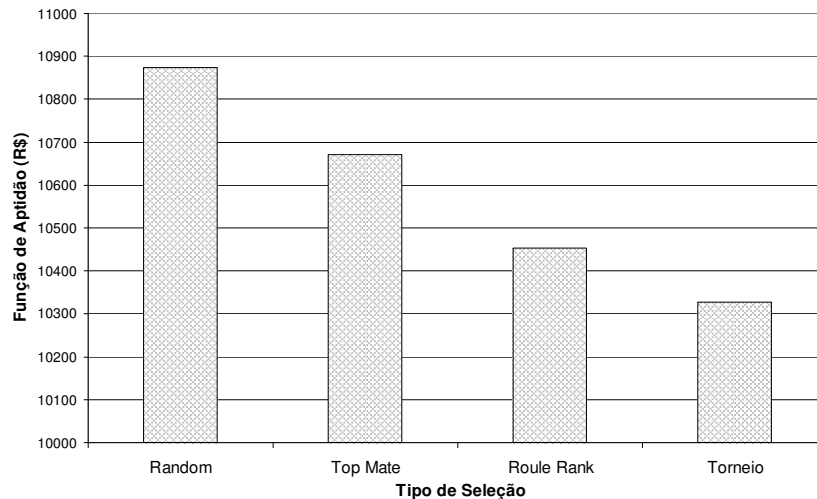


Figura 5.20 – Influência do tipo de reprodução na convergência do AG.

Estratégia de Cruzamento e Mutação: a metodologia seguida para escolha da melhor estratégia de Cruzamento foi idêntica aquela aplicada para o processo de Reprodução. O resultado da investigação entre as alternativas Uniforme, Um Ponto e Dois Pontos, encontra-se ilustrada na Figura 5.21, na qual observa-se que após 30 minutos de ensaio esses operadores assumem praticamente o mesmo valor com ligeira vantagem para a estratégia Uniforme (R\$ 9.990,00) em relação a estratégia Um Ponto (R\$ 10.325,00), sendo portanto escolhida para fazer parte do processo de otimização.

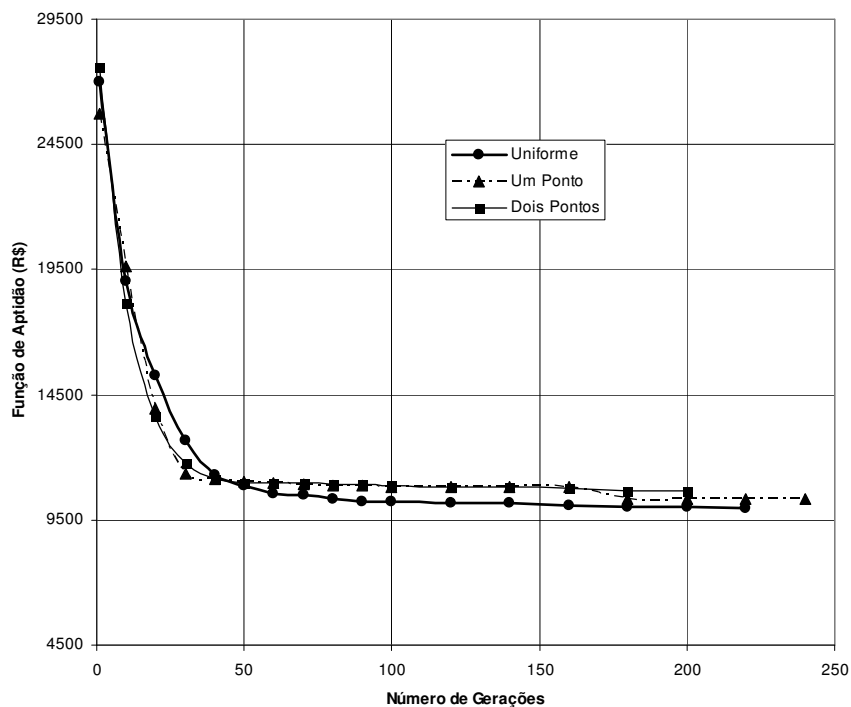


Figura 5.21 – Comparação entre estratégias de Cruzamento.

Para o operador genético da mutação foi eleita a permuta simples entre *bits* como mais adequada para as características do AG utilizado no trabalho.

O Processo do Cruzamento: a escolha dos distintos pares de indivíduos (pais) para criação de novos descendentes (filhos) é controlado por uma probabilidade de ocorrência, p_c , cujo valor oscila entre 0,60 a 1,00, segundo Goldberg (1989). Valores elevados dessa taxa provocam intensa troca de material genético na população, o que pode resultar em perda de estruturas de alta aptidão. Por outro lado, a adoção de valores baixos pode tornar o processo de convergência lento. Para p_c igual a 1, tem-se que todos os pares formados sofrerão cruzamento. A implementação do cruzamento é um dos aspectos críticos no desempenho de um algoritmo genético.

As seguintes sistemáticas foram testadas para verificar a celeridade do AG: corte em um só ponto da cadeia, corte em dois pontos da cadeia e cruzamento uniforme. Cada teste de modalidade era repetida cinco vezes para um tempo de processamento de 30 minutos, mantendo-se invariável as demais grandezas genéticas. Para a análise de sensibilidade do cruzamento, utilizou-se a taxa de probabilidade de mutação igual a 0,009; população de 100 elementos e as seguintes probabilidades de cruzamento: 0,60; 0,70; 0,80 e 0,90.

A Figura 5.22 ilustra o efeito do cruzamento na performance do AG para valores médios das repetições executadas. Observa-se que os diferentes valores de p_c testados apresentam um desempenho equivalente na parte mais estável do AG, não desenvolvendo aspectos críticos no processo.

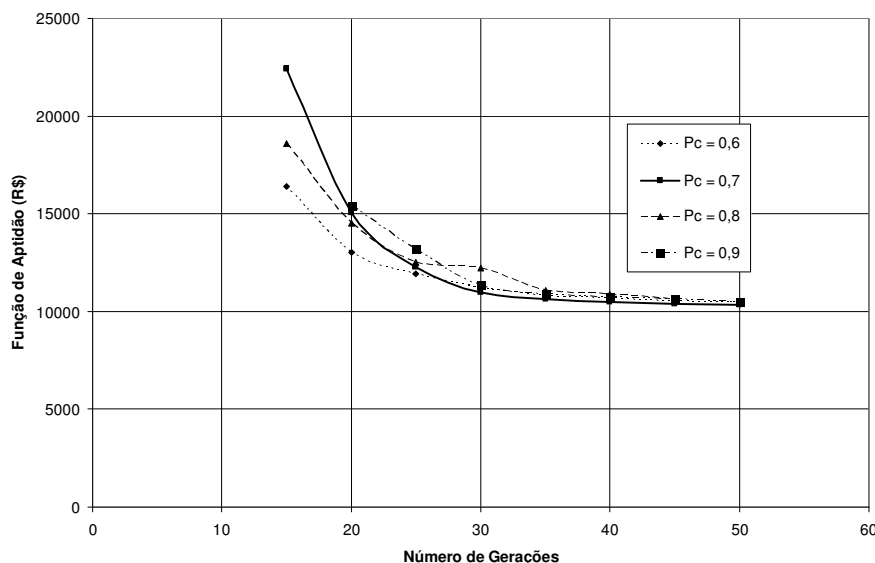


Figura 5.22 - Sensibilidade da probabilidade de Cruzamento.

Apesar da pouca discrepância em relação aos valores extremos da função de aptidão (cerca de 1,57%), a probabilidade 0,7, representada na Figura pela linha contínua, proporciona uma grande robustez no início do processo iterativo, continuando com um ótimo desempenho para todos os tempos de processamento do AG.

O valor de $p_c = 0,7$ atende melhor a minimização da função de aptidão, sendo escolhida como valor padrão a ser empregado no modelo de otimização.

O Processo de Mutação: a aplicação desse operador provoca alteração no valor de um bit do cromossomo quando a codificação é binária. A mutação é controlada por uma probabilidade de ocorrência, p_m , que assume valores distintos segundo vários autores: Goldberg (1989) aconselha valores entre 0,001 e 0,05; Wang (1991) recomenda o valor 0,01 e Simpson et al. (1994) aconselha valores entre 0,01 e 0,05. A diretriz mais recomendada é que o valor, p_m , atenda a $(1/N \leq p_m \leq 1/C)$, onde N é o número de cromossomos da população e C o comprimento dos cromossomos. A considerar essa última recomendação a probabilidade de mutação, nesse problema, deveria assumir um valor entre 0,0025 e 0,010.

Considerando o critério de mutação uniforme em que todos os *bits* têm a mesma chance de sofrer mutação, pesquisou-se o melhor valor de p_m , fixando seus valores em 0,003; 0,005; 0,006; 0,007; 0,008; 0,009 e 0,01, obedecendo à mesma estratégia usada na pesquisa de melhor taxa de cruzamento. Os testes foram feitos para uma população de 100 indivíduos e taxa de cruzamento de 0,7. Os resultados médios da análise de sensibilidade de mutação são apresentados na Tabela 5.11 e a curva de desempenho da melhor e da pior alternativa é ilustrada na Figura 5.23.

Tabela 5.11 – Valores de função de aptidão para vários valores de mutação

Mutação	0,003	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009	0,010
Função de Aptidão (R\$)	10.846	10.718	10.723	10.620	11.740	10.432	10.479

Fica evidenciada que a taxa de mutação igual a 0,009 resulta num melhor desempenho na minimização da função de aptidão, opção ligeiramente melhor que a encontrada para a taxa de 0,010.

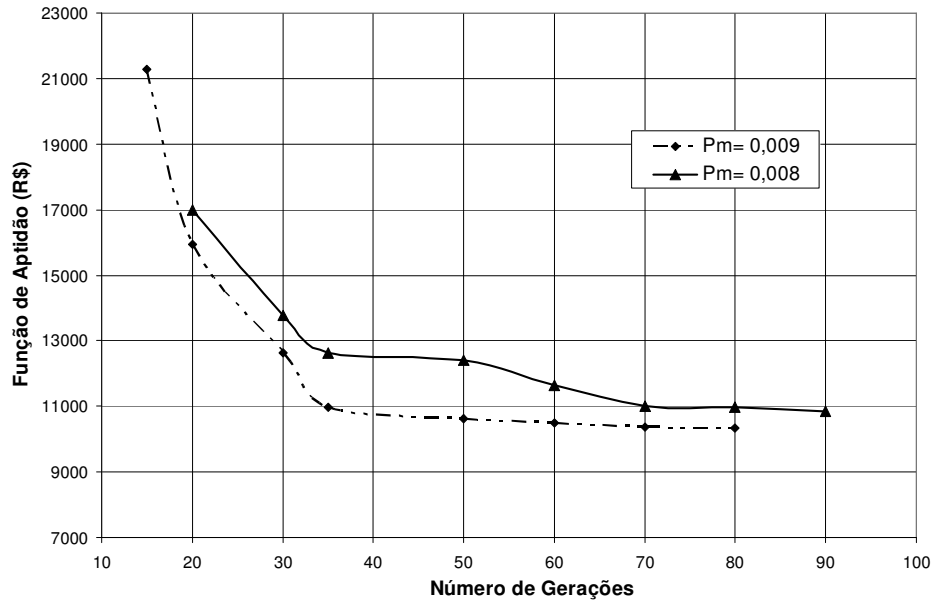


Figura 5.23 – Sensibilidade da Probabilidade de Mutação.

Assim, os melhores resultados em termos de esforço computacional e de qualidade do resultado são encontrados usando uma taxa de cruzamento de 0,70, uma taxa de mutação de 0,009, população de tamanho 100, recombinação tipo uniforme, e seleção baseado em torneio.

5.5 - Política Ótima de Operação

Concluída a busca do melhor valor de população e a análise de sensibilidade dos parâmetros genéticos de cruzamento e mutação, a política operacional passa a ser pesquisada pelo algoritmo genético elitista, implementando-se os valores dos parâmetros genéticos resumidos na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 - Valores dos parâmetros genéticos escolhidos para o AG

Parâmetro Genético	Valor
População de indivíduos	100
Taxa de cruzamento	0,70
Taxa de mutação	0,009
Critério de parada (fixado)	30 minutos

5.6 - Curvas Características das Bombas

Representam graficamente as funções que relacionam os diversos parâmetros envolvidos em seu funcionamento, sendo normalmente fornecidas pelos fabricantes em seus catálogos de produtos, (Porto,1998). Essas características funcionais são obtidas a partir de ensaios em laboratório, medindo-se para cada vazão recalçada, os valores reais da altura de elevação (H_m), rendimento (η_b) e potência, para uma determinada rotação. Após alguns anos de operação esses equipamentos apresentam desgaste físico e mecânico nos seus componentes, provocando alterações nos valores originais da altura manométrica e rendimento para uma mesma vazão recalçada.

Como no Sistema Adutor Marés os conjuntos elevatórios estão em operação há mais de 10 anos, decidiu-se fazer uma verificação da carga manométrica desenvolvida pelas bombas, a partir de dados de vazão e pressão medidos nos registros TAP (Figura 5.24), existentes a jusante das elevatórias. Essa decisão, justifica-se pela importância daquela grandeza no valor da potência motriz (eq. 4.1) e conseqüentemente no valor do custo de bombeamento (eq. 4.6), grandeza que deverá ser minimizada no processo de otimização.

Descreve-se a seguir, a metodologia empregada para o cálculo da altura manométrica nominal em cada bomba:



Figura 5.24 – Registrador de pressão e vazão no TAP.

De forma analítica, calculou-se a pressão dinâmica na descarga da bomba aplicando-se a equação da energia entre essa seção e a seção de controle (TAP), segundo esquema mostrado na Figura 5.25.

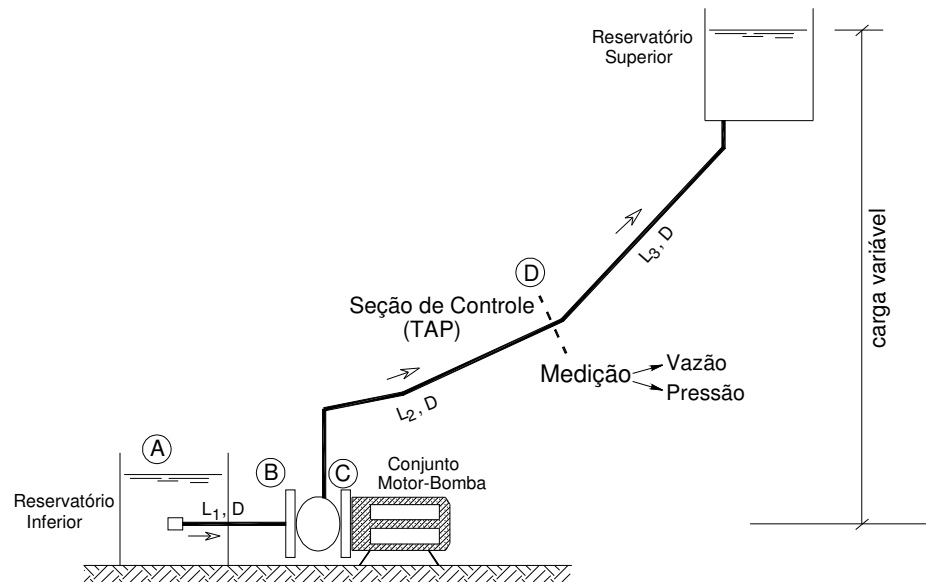


Figura 5.25 - Esquema simples de recalque com seção de controle.

$$\frac{p(C)}{\gamma} = \frac{p(D)}{\gamma} + [z(D) - z(C)] + h_f(CD) \quad (5.2)$$

em que $\frac{p(C)}{\gamma}$ e $\frac{p(D)}{\gamma}$ são as pressões dinâmicas nas seções C e D, respectivamente; $z(C)$ e $z(D)$ são as cotas topográficas das seções C e D, respectivamente; e $h_f(CD)$ é a perda de energia linear entre as seções estudadas.

De forma análoga foi calculada a pressão na seção de entrada da bomba, aplicando-se a mesma equação entre a superfície líquida do reservatório de sucção (nível constante) e o bocal de entrada.

$$\frac{p(B)}{\gamma} = \frac{p(A)}{\gamma} + [z(A) - z(B)] + h_f(AB) \quad (5.3)$$

em que $\frac{p(A)}{\gamma}$ e $\frac{p(B)}{\gamma}$ são as pressões dinâmicas nas seções A e B, respectivamente; $z(A)$ e $z(B)$ são as cotas topográficas das seções A e B, respectivamente; e $h_f(AB)$ é a perda de carga linear entre as seções de interesse.

A diferença entre os dois valores de carga de pressão, calculados pelas equações (5.2) e (5.3), corresponde à parcela de energia transferida pela bomba ao líquido para aquelas condições de operação.

Assim, a carga de pressão nominal, será:

$$H_m = \frac{p(C)}{\gamma} - \frac{p(B)}{\gamma} \quad (5.4)$$

Dessa forma fica definido o par de valores (Q, H_m) , pertencente à curva característica da bomba usada. A esse ponto conhecido, o EPANET2 incorpora mais dois outros pontos para criar automaticamente a curva característica completa daquela bomba: o primeiro ponto correspondente à vazão nula e uma carga de 133% da carga manométrica nominal (carga de shutt-off), e o outro ponto de altura de elevação nula e vazão correspondente a duas vezes ao valor nominal.

Numa tentativa de melhorar a qualidade do traçado de cada curva característica, adotou-se a seguinte metodologia para sua geração que pode melhor ser entendida com auxílio da Figura 5.26: o ponto experimental de funcionamento, (Q, H_m) , foi marcado no gráfico da curva fornecida pelo fabricante, a partir do qual foi traçada a curva que representa as características da bomba usada, deslocada da curva original de uma distância, d .

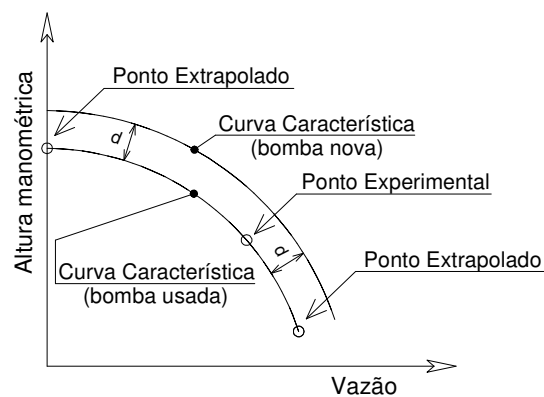


Figura 5.26 – Metodologia usada para traçado da curva característica das bombas.

Após o traçado da curva característica e identificadas as coordenadas dos três pontos (Tabela 5.11) que originaram sua construção, o EPANET2 ajusta por eles uma função contínua, cujas expressões analíticas estão contidas nas Tabelas 5.12 e 5.13. Para a bomba do poço profundo foi empregada a curva característica fornecida pelo fabricante, cuja representação matemática consta na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 – Relação de pontos para construção das curvas características

	B3MARÉS	B4MARÉS	B5MARÉS	B1R1/B4R1	B2R1/B3R1
(Q ₁ ; Hm ₁)	(0,00;97,50)	(0,00;145,00)	(0,00;136,00)	(0,00;32,20)	(0,00;32,78)
(Q ₂ ; Hm ₂)	(380,00;90,00)	(355,00;84,00)	222,00;114,00)	(125,05;21,00)	(136,80;20,43)
(Q ₃ ; Hm ₃)	(743,00;56,50)	369,40;80,00)	(365,00;84,00)	(141,90;16,95)	(150,46;16,67)

Devido à impossibilidade de levantar a curva de rendimento das bombas, foram utilizadas as fornecidas pelo fabricante, cujas equações obtidas através de análise de regressão, são apresentadas nas Tabelas 5.14, 5.15 e 5.16. Na prática, se sabe que devido aos desgastes das bombas com certo tempo de uso, seus rendimentos apresentam valores inferiores aqueles obtidos das bombas novas.

Como a entrada de água nos reservatórios é afogada conforme relatado no item 4.2.3, a cada intervalo de tempo tem-se uma altura de elevação e um rendimento da bomba diferente.

CENTRO MARÉS

B3MARÉS	$Hm = -2,186 \times 10^{-6} \times Q^{2,53} + 97,50$	$\eta = -0,0002 \cdot Q^2 + 0,2086 \cdot Q + 24,214$
B4MARÉS	$Hm = -5,15 \times 10^{-3} \times Q^{1,60} + 145,00$	$\eta = -0,0007 \cdot Q^2 + 0,3268 \cdot Q + 43,437$
B5MARÉS	$Hm = -1,919 \times 10^{-3} \times Q^{1,73} + 136,00$	$\eta = -0,0003 \cdot Q^2 + 0,0729 \cdot Q + 89,221$

Tabela 5.14 – Representação matemática das bombas do Centro de Produção Marés.

CENTRO R1

B1R1=B4R1	$H_m = -8,483 \times 10^{-5} \times Q^{2,44} + 32,2$	$\eta = -0,0069 \cdot Q^2 + 1,4555 \cdot Q - 1,8699$
B2R1=B3R1	$H_m = -1,338 \times 10^{-5} \times Q^{2,79} + 32,78$	$\eta = -0,0005 \cdot Q^2 - 0,1443 \cdot Q + 99,416$

Tabela 5.15 - Representação matemática das bombas do Centro de Distribuição R1.

CENTRO R2

POÇO	$H_m = -10,22 \cdot Q^2 - 3,76 \cdot Q + 240,43$	$\eta = -0,1856 \cdot Q^2 + 7,6383 \cdot Q + 0,235$
------	--	---

Tabela 5.16 - Representação matemática da bomba do Centro de Distribuição R2.

Essas expressões analíticas foram incorporadas à equação (4.6) nos códigos da rotina computacional OTIMIZE com a finalidade de calcular a potência motriz de cada grupo elevatório a cada período de tempo que compõe o horizonte operacional.

RESULTADOS E ANÁLISES

Nos capítulos anteriores foi apresentado o problema a ser resolvido, os objetivos desse trabalho, as técnicas e metodologias empregadas para alcançá-los e o modelo físico escolhido para estudo de caso. Neste capítulo serão mostrados e analisados os resultados alcançados pela utilização da metodologia proposta, avaliando seus pontos fortes e fracos e a possibilidade de sua aplicação no sistema real numa perspectiva de garantia de operação mais eficiente em termos de custo com energia elétrica.

Para tanto, apresenta-se os resultados de algumas simulações hidráulicas realizadas com auxílio do programa EPANET2 e executadas a partir de soluções geradas pela ferramenta computacional OTIMIZE, que utiliza os Algoritmos Genéticos como técnica de minimização da função mono-objetivo considerada.

6.1- Formulário de Dados

Como forma de facilitar a aplicação da metodologia empregada foi criado um formulário, mostrado na Figura 6.1, que se constitui na tela principal do programa, na qual se concentra os comandos de acesso a entrada de dados, o comando para iniciar o processo de convergência do AG e também, um conjunto de campos devidamente organizados para receber a impressão dos dados de saída do modelo.

. A alimentação do programa tem início pela escolha admissão dos operadores e parâmetros genéticos a serem considerados no processo de convergência, bem como, na definição da estrutura tarifária praticada em cada região do sistema adutor, conforme janela mostrada na Figura 5.17 no Capítulo 5 desse trabalho. O botão de comando “Executar OTIMIZE” aciona internamente a função RunOptiGA responsável pelo início de busca da solução mais adaptada ao objetivo do problema. Após intenso esforço computacional, obtém-se como resposta, uma política operacional diária para todas as variáveis de decisão distribuídas pelas três regiões de estudo, segundo ilustra a Figura 6.1. Complementando esses dados de controle operacional, a

tela principal mostra dados relativos aos valores da função de aptidão, custo de bombeamento da solução apresentada, potência horária e acumulada no eixo das bombas, vazão aduzida horária e volume total de água recalcado para aquela solução apresentada.

The screenshot shows the OTIMIZE software interface. The title bar reads "OTIMIZE - OTIMIZAÇÃO DE ESTRATÉGIAS OPERACIONAIS DE SISTEMAS ADUTORES". The interface is divided into several sections:

- Parâmetros do AG:** Gerações: 1200, População: 150, Mutação: 0,01, Cruzamento: 0,9, Elitismo (selected).
- Operadores Genéticos:** Seleção: Roule Rank, Cruzamento: Um Ponto, Mutação: Simples.
- Relatório:** Função Aptidão (R\$), Geração, Tempo (min).
- Modo de Finalização:** Número de Gerações Máxima.
- Classe Tarifária:** MARES: Azul, R1: Verde, R2: Baixa Tensão B3.
- UFCC:** UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE.
- Executar OTIMIZE** button.
- Totais Diários:** Custo Bomb. (R\$), Vol. Aduzido (litros), Pot. Acumulada (kW).

Below the configuration is a table titled "Processamento da Simulação:" with the following structure:

Hr.Min.	CENTRO MARES			CENTRO R1				CENTRO R2			RESULTADOS		
	Bomba 3	Bomba 4	Bomba 5	Bomba 1	Bomba 2	Bomba 3	Válvula 5	Poço	Válvula A	Válvula B	Vazão (l/s)	Potência (kW)	Custo (R\$)
0:00													
1:00													
2:00													
3:00													
4:00													
5:00													
6:00													
7:00													
8:00													
9:00													
10:00													
11:00													
12:00													
13:00													
14:00													
15:00													
16:00													
17:00													
18:00													
19:00													
20:00													
21:00													
22:00													
23:00													

Figura 6.1 – Formulário (*grid*) para apresentação da melhor regra operacional.

Vale ressaltar que a política operacional apresentada no formulário acima deve ser olhada como uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão e não como uma regra absoluta a ser rigorosamente seguida pelos gestores do sistema, ao longo das 24 horas de operação. Esse raciocínio fundamenta-se nas incertezas presentes nas diversas variáveis e parâmetros envolvidos no processo de modelação do sistema físico, com destaque para as curvas de demanda de consumo que apresentam qualidade discutível, decorrente da falta de um melhor monitoramento do sistema e maior quantidade de dados históricos, essenciais ao tempo da sua construção. O padrão temporal dessa curva é introduzida no EPANET2 e desempenha forte influência na variação dos níveis de água dos reservatórios com reflexo direto nos valores de outras variáveis hidráulicas.

Além da apresentação da melhor regra operacional, o menu principal da rotina OTIMIZE dá acesso ao quadro mostrado na Figura 6.2, que exhibe os valores de

consumos e demandas resultantes da solução proposta pelo algoritmo. Essas grandezas intensivas são apresentadas separadas para cada sub-sistema envolvido no estudo, dando oportunidade aos gestores de simular várias combinações de classes tarifárias e escolher a mais conveniente, financeiramente, para a empresa de abastecimento.

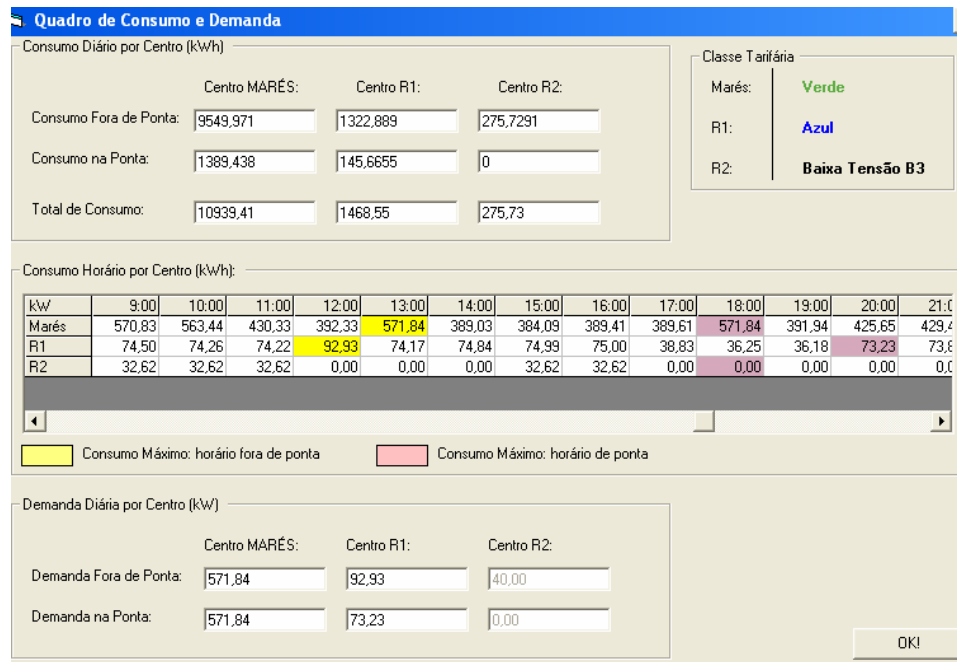


Figura 6.2 – Exemplo de resultado das grandezas elétricas calculadas

Na faixa central do quadro acima é mostrado o consumo horário verificado em cada elevatória, dando-se destaque aos valores máximos registrados na ponta e fora dela. Na região superior e inferior da Figura 6.2, mostra-se a totalização do consumo de energia e da demanda de potência nos horários de ponta e fora de ponta, o que proporciona uma visão geral do comportamento energético das estações de bombeamento, facilitando a definição do melhor valor de demanda a ser contratada à empresa concessionária de energia.

Portanto, o programa oferece ao usuário três oportunidades de decisão na busca da eficiência energética em linhas adutoras: 1) regra operacional de menor custo energético; 2) definição da modalidade tarifária mais econômica; 3) facilitação da melhor escolha do valor da demanda de potência a ser contratada.

6.2 - Teste de validade do modelo

Para testar a validade da convergência dos Algoritmos Genéticos com a destinação de encontrar uma solução eficiente em termos de energia elétrica e que seja factível de ser aplicada ao sistema adutor real de Marés, diversas aplicações da rotina OTIMIZE foram implementadas, cujas soluções foram posteriormente levadas à simulação no EPANET2, das quais foram selecionadas três para serem feitas análises dos resultados. O planejamento diário dessas três aplicações está exposta nos formulários da Figura 6.3, Figura 6.4 e Figura 6.5, obtidas a partir dos mesmos valores iniciais.

6.2.1 - Apresentação das regras operacionais

Todas as regras obtidas foram para o mesmo cenário de operação e mesma classe tarifária (Verde-Convencional-Convencional B3), considerando o estado inicial dos reservatórios como estando com 80% da sua lâmina útil e os parâmetros genéticos ótimos encontrados no Capítulo 5 deste trabalho. Mais a frente se apresenta resultados para outras combinações tarifárias. O critério de parada foi definido como sendo o tempo de processamento correspondente a 30 minutos (1800 segundos).

OTIMIZE - OTIMIZAÇÃO DE ESTRATÉGIAS OPERACIONAIS DE SISTEMAS ADUTORES															
Configurações Ferramentas Sobre...															
Conf... Gráficos... Tabelas... Custos... Salvar... Executar															
Parâmetros do AG:				Operadores Genéticos:				Relatório:							
Gerações: 900	População: 100	Mutação: 0,009	Cruzamento: 0,7	Seleção: Torneio	Cruzamento: Uniforme	Mutação: Simples	Função Aftidão (R\$): 9313,68	Geração: 153	Tempo (min): 30						
Modo de Finalização: Tempo Limite: 1800 Segundos				Classe Tarifária: MARÉS: Verde				URCC: UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE				Totais Diários:			
				R1: Convencional				Custo Bomb. (R\$): 9283,68				Vol. Aduzido (litros): 13394,47		Pot. Acumulada (kW): 11006,58	
				R2: Baixa Tensão B3				Executar OTIMIZE							
Processamento da Simulação:															
Hr:Min.	CENTRO MARÉS			CENTRO R1				CENTRO R2			RESULTADOS				
	Bomba 3	Bomba 4	Bomba 5	Bomba 1	Bomba 2	Bomba 3	Válvula 5	Poço	Válvula A	Válvula B	Vazão (l/s)	Potência (kW)	Custo (R\$)		
0:00	Closed	Open	Closed	Closed	Open	Closed	20%	Open	Closed	Open	486,62	452,91	51,73		
1:00	Closed	Open	Closed	Closed	Open	Closed	20%	Open	Open	Closed	489,21	452,91	51,71		
2:00	Closed	Closed	Closed	Open	Open	Closed	100%	Closed	Open	Open	283,34	97,56	15,78		
3:00	Closed	Open	Closed	Closed	Open	Closed	20%	Closed	Closed	Open	471,23	421,15	42,23		
4:00	Closed	Open	Closed	Closed	Open	Closed	100%	Closed	Closed	Open	337,53	369,02	33,58		
5:00	Closed	Open	Closed	Closed	Open	Closed	20%	Closed	Open	Open	393,10	360,84	36,63		
6:00	Closed	Closed	Closed	Open	Open	Closed	100%	Closed	Closed	Open	289,91	96,30	15,67		
7:00	Closed	Open	Open	Open	Open	Closed	20%	Closed	Closed	Open	702,79	627,63	64,05		
8:00	Closed	Open	Open	Open	Open	Closed	20%	Closed	Open	Open	703,57	627,40	64,02		
9:00	Closed	Open	Closed	Open	Open	Closed	100%	Closed	Open	Open	619,22	467,00	49,41		
10:00	Closed	Open	Open	Open	Open	Closed	20%	Closed	Closed	Open	707,03	627,50	64,01		
11:00	Closed	Open	Open	Open	Open	Closed	20%	Closed	Closed	Open	707,73	626,82	63,94		
12:00	Closed	Open	Closed	Open	Closed	Open	100%	Closed	Open	Closed	477,29	412,61	49,67		
13:00	Closed	Open	Open	Open	Closed	Open	100%	Open	Open	Open	727,09	613,88	74,50		
14:00	Closed	Open	Open	Open	Open	Closed	20%	Open	Open	Open	862,74	857,86	73,32		
15:00	Closed	Open	Closed	Open	Open	Closed	100%	Closed	Open	Closed	625,92	464,88	49,15		
16:00	Closed	Open	Closed	Open	Closed	Closed	20%	Closed	Closed	Open	472,73	408,54	40,25		
17:00	Closed	Open	Closed	Open	Open	Closed	20%	Closed	Closed	Closed	616,99	457,34	48,45		
18:00	Closed	Closed	Closed	Open	Open	Closed	20%	Open	Closed	Closed	302,60	129,61	25,28		
19:00	Closed	Open	Closed	Open	Open	Closed	20%	Closed	Open	Closed	615,53	464,60	33,29		
20:00	Closed	Open	Closed	Open	Open	Closed	20%	Open	Closed	Closed	606,74	492,00	33,57		
21:00	Closed	Open	Open	Open	Open	Closed	100%	Closed	Closed	Open	578,49	593,70	57,89		
22:00	Closed	Open	Open	Open	Open	Closed	20%	Closed	Closed	Open	709,89	625,58	63,80		
23:00	Closed	Open	Closed	Open	Open	Closed	20%	Closed	Closed	Closed	608,18	458,32	48,61		

Figura 6.3 – Regra da Alternativa Operacional 1.

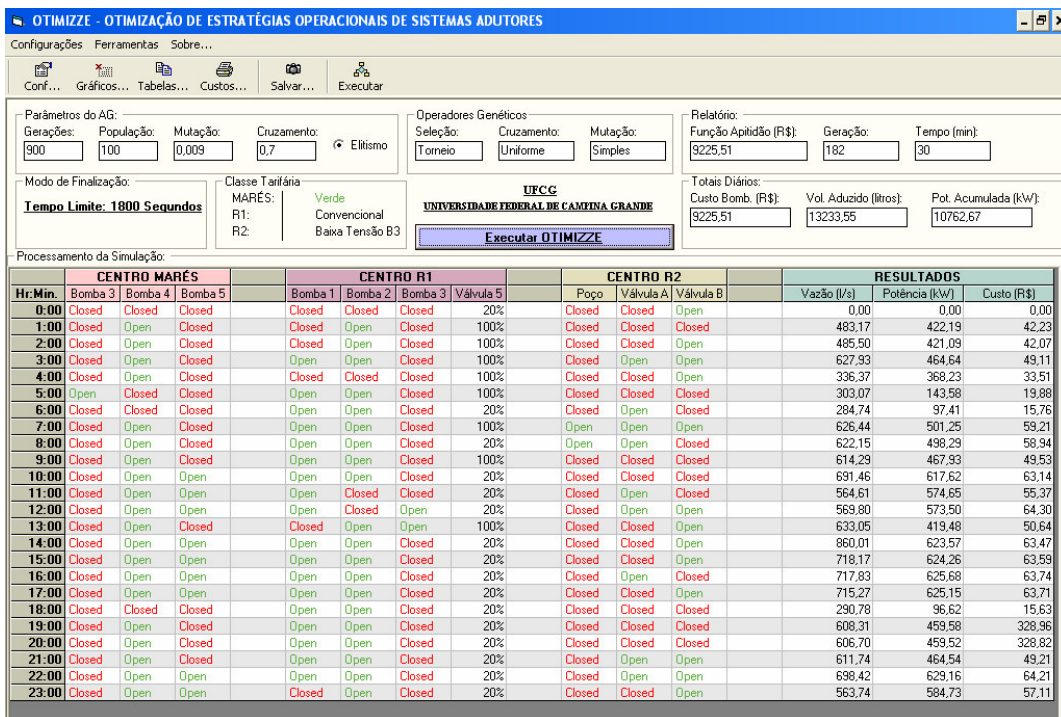


Figura 6.4 – Regra da Alternativa Operacional 2.

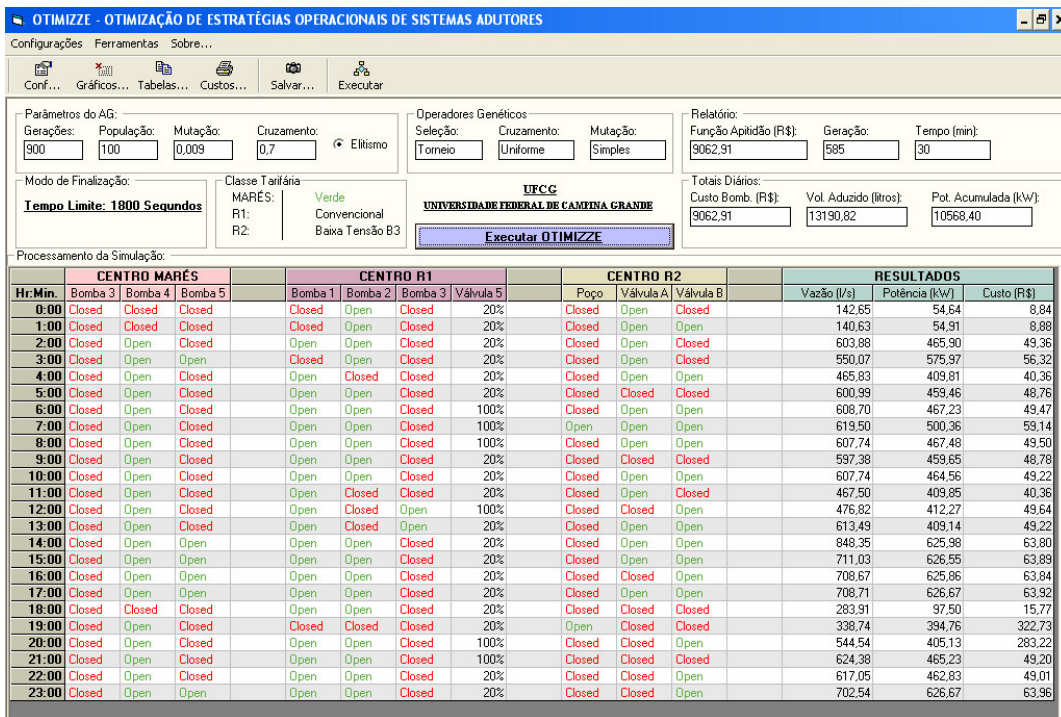


Figura 6.5 – Regra da Alternativa Operacional 3.

O preenchimento completo destes formulários demonstra, desde logo, a virtude e a robustez do Algoritmo Genético Simples em convergir com sucesso para uma solução da função objetivo que busca a regra ótima de operação para um sistema adutor completo. O caráter estocástico do modelo matemático permite encontrar, a cada aplicação do programa, uma solução diferente para o problema com um custo energético próximo do ótimo global e tempo computacional compatível com a prática operacional do sistema.

A Tabela 6.1 apresenta as principais grandezas extraídas das três Aplicações apresentadas nesse trabalho.

Tabela 6.1 – Informações técnicas produzidas pelas simulações

Alternativa	Número de Gerações	Volume Aduzido (m ³)	Potência Acumulada (kW)	Custo de Bombeamento (R\$)	Custo por Volume Aduzido (R\$/m ³)
1	153	13.394	11.006	9.283,68	0,6931
2	182	13.233	10.762	9.225,51	0,6972
3	185	13.190	10.568	9.062,91	0,6871

Dessa forma, conclui-se pela exequibilidade dos Algoritmos Genéticos, na sua forma canônica, para investigar combinações de estados operacionais de bombas e válvulas que resultem em soluções ótimas para serem aplicadas a sistemas adutores de abastecimento de água com escala semelhante ao sistema estudado. Para um sistema adutor de maior complexidade, estudos complementares devem ser desenvolvidos para se comprovar a sua adaptabilidade a situações onde se verifique um maior número de variáveis de decisão e consequentemente um maior tempo computacional para o modelo alcançar a convergência.

6.2.2 - Resultados das Simulações Hidráulicas

As regras operacionais resultantes das aplicações da interface computacional são admitidas nos Controles Simples do programa EPANET2, onde simulações estendidas são realizadas no arquivo Sistema_Adutor.net que representa o modelo físico do sistema adutor Marés. Após o processo de simulação não foram apresentadas

nenhuma mensagem de advertência ou de erro decorrente da violação das leis do equilíbrio hidráulico, o que significa em Simulações Válidas.

As aplicações 1, 2 e 3 apresentadas anteriormente deram origem às simulações 1, 2 e 3, respectivamente, cujo comportamento dos níveis de água entre os limites operacionais para os cinco reservatórios que compõem o sistema adutor pode ser visto na seqüência das Figuras 6.6 a 6.10.

Para essas simulações, o EPANET2 foi ajustado para apresentar resultados de pressão e vazão a cada meia hora de operação, sempre a partir da 0 hora.

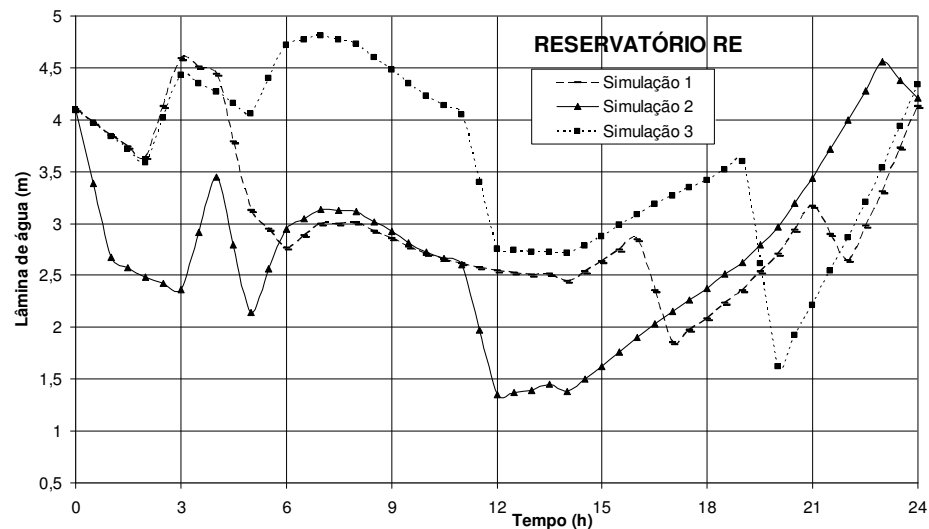


Figura 6.6 – Comportamento da carga hidráulica no reservatório RE

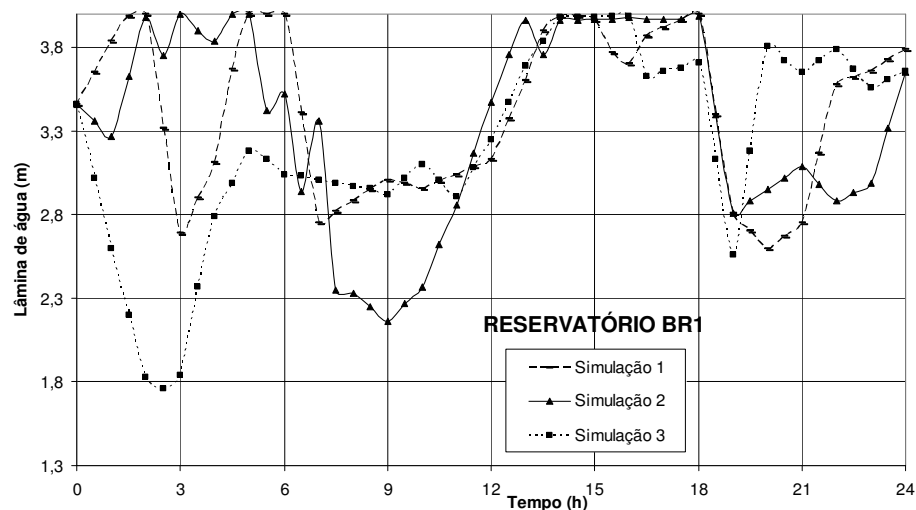


Figura 6.7 – Comportamento da carga hidráulica no reservatório BR1

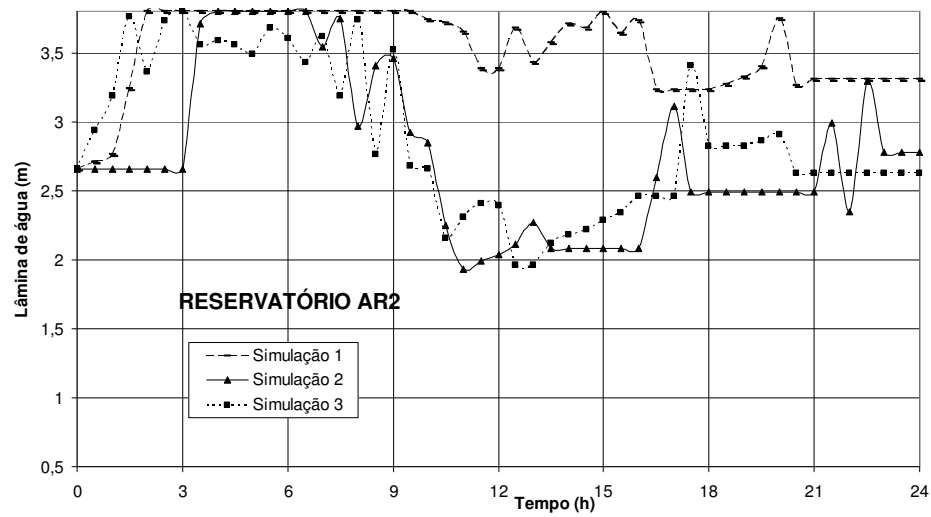


Figura 6.8 – Comportamento da carga hidráulica no reservatório AR2.

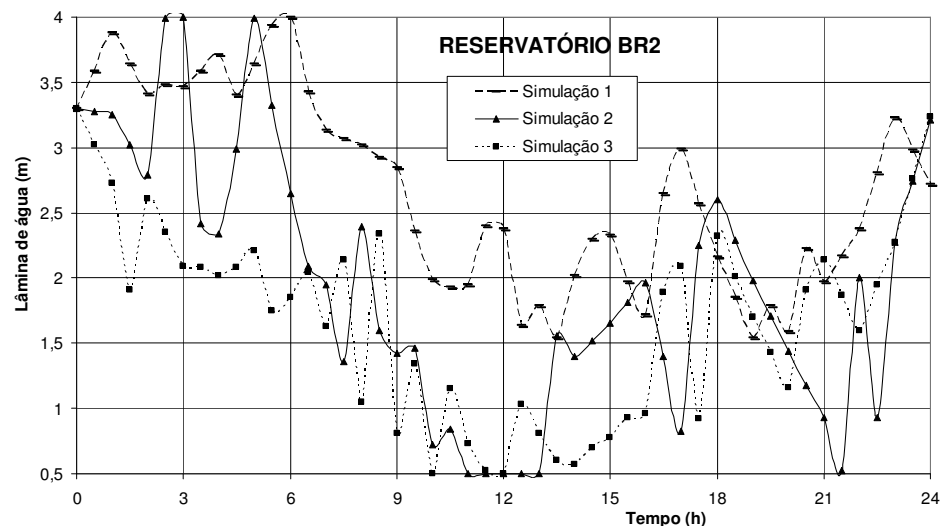


Figura 6.9 – Comportamento da carga hidráulica no reservatório BR2.

O reservatório AR1, por ser uma unidade especial, conforme comentado no item 4.2.2.1 do Capítulo 4, apresenta uma característica típica de operação para qualquer simulação realizada, traduzida pelo abaixamento do nível de água enquanto a bomba B3R1 funciona apenas uma hora por dia. A Figura 6.10 exemplifica a conduta da superfície livre da água no reservatório.

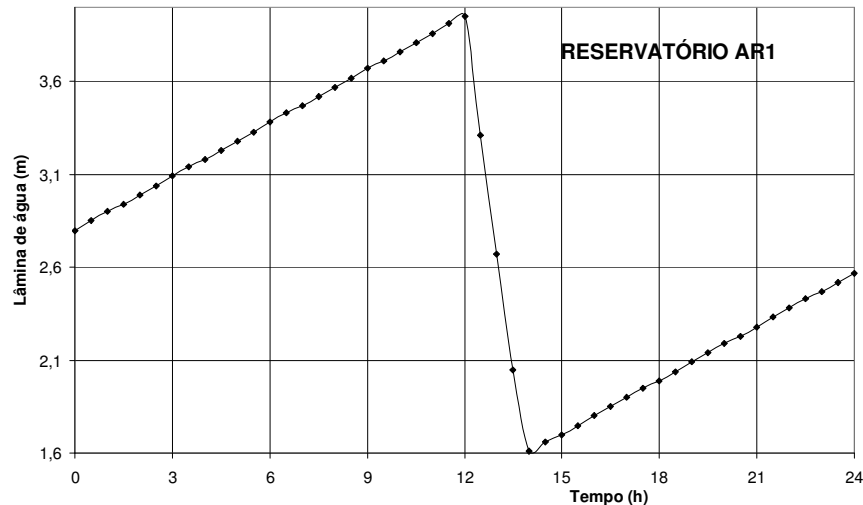


Figura 6.10 – Comportamento da carga hidráulica no reservatório AR1.

Uma análise inicial das regras operacionais apresentadas mostra que o AG possibilita encontrar várias soluções viáveis de serem praticadas no campo da engenharia, o que resulta em gráficos mostrando o comportamento do líquido nos reservatórios com conformações variadas, embora em alguns intervalos de operação se possa definir uma linha de tendência de pressão nessas unidades de reservação.

Uma análise visual desses gráficos demonstra a presença de uma quantidade maior de picos e depressões na linha que representa a superfície livre dos reservatórios ao longo do horizonte de operação, contrastando com o comportamento mais suave verificado no modelo tradicional, conforme exemplo mostrado na Figura 6.11 para o reservatório elevado (RE) do Centro R1.

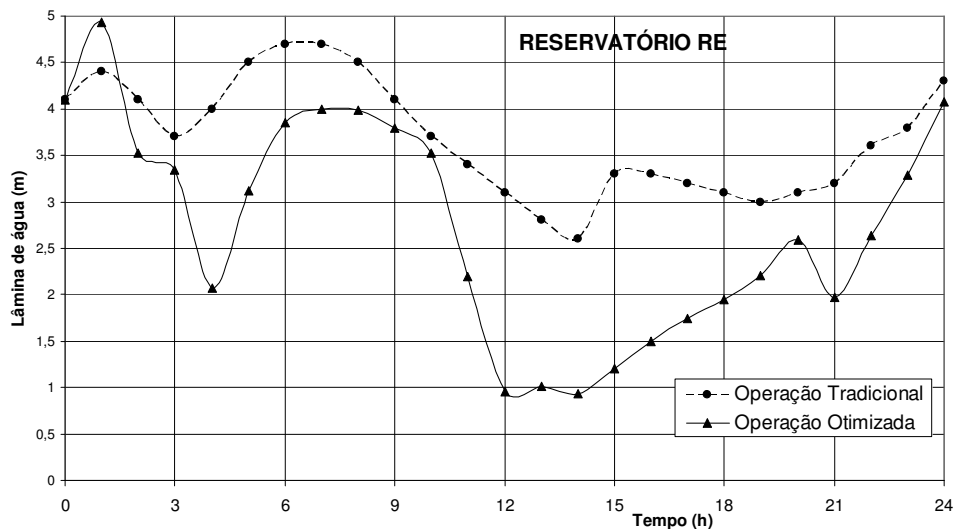


Figura 6.11 – Nível de água no RE para operação tradicional e otimizada.

A forma de conduta mais acidentada que se verifica no perfil correspondente à regra de operação otimizada reflete a reação do sistema a maior quantidade de manobras de bombas e/ou válvulas, definidas pelo algoritmo, necessárias para se aproximar da solução de custo mínimo, procurando satisfazer restrições de ordem física e operacional imposta ao modelo. Na prática tradicional a quantidade de manobras desses equipamentos é comparativamente bem menor, já que essa ação tem como fundamento de decisão a posição do nível de água nos reservatórios. Por esse motivo, a evolução temporal da carga hidráulica obtida pelo modelo matemático resulta diferente daquela convencionalmente observada numa regra operacional simples.

No exemplo mostrado na Figura 6.11, observa-se que o modelo hoje praticado acumula uma maior quantidade de água no reservatório ao longo do dia, que pode ser interpretado como a comprovação da falta de compromisso com a eficiência energética, bem como, um acautelamento dispensado pelo gestor do sistema para garantir o atendimento das demandas da rede. Na política operacional proposta, essa insegurança humana torna-se despropositada devido a forte restrição imposta ao modelo matemático com o intuito de garantir o suprimento de água à rede a qualquer tempo, evitando-se dessa forma, o colapso temporário do abastecimento.

6.2.3 – Análise dos Resultados

Os resultados das três simulações hidráulicas apresentadas, tomadas como representativas da investigação deste trabalho, comprovam a grande eficácia de convergência dos Algoritmos Genéticos na direção da definição de estratégias operacionais ótimas que possam vir a ser aplicáveis ao sistema real estudado, demonstrando a viabilidade do método em sistemas de pequena e média escala.

O modelo de otimização proposto foi formulado com base numa função mono-objetivo representativa dos custos de bombeamento, além de três funções restritivas diretas, nos termos das justificativas apresentadas no Capítulo 4 deste trabalho: a) função custo de manutenção das bombas; b) função custo de recuperação do estado inicial dos níveis dos reservatórios; c) função custo de garantia da demanda.

Uma análise do atendimento destas restrições dentro da função de aptidão é apresentada a seguir:

▪ **Limitação do Número Máximo de Acionamentos.**

Foi definido que o número máximo de acionamentos dos motores seria de no máximo três em um período de 24 horas, que em princípio corresponde ao critério de permitir ligar determinada bomba no máximo uma vez por turno de trabalho. Essa limitação é uma tentativa de reduzir os custos com manutenção desses equipamentos.

No programa principal foi criada uma sub-rotina que penaliza a solução analisada com uma intensidade, tanto maior quanto mais a bomba tenha sido acionada além do permitido. Deve-se ressaltar que no início de cada simulação hidráulica o estado operacional das bombas é definido como desligado (*closed*) no EPANET2, de forma que quando no formulário de apresentação da regra operacional, (Figura 6.1), uma bomba apresenta-se como ligada (*open*) no primeiro horário, deve ser contabilizado mais um acionamento além daqueles previamente definidos.

Considerando o valor limite imposto no modelo, observa-se na Figura 6.3 que essa restrição foi levemente violada apenas na Alternativa Operacional 1 por intermédio da bomba B5MARES que foi acionada 4 vezes ao longo do dia. Nas demais Aplicações as bombas foram ligadas no máximo três vezes, enquadrando-se dentro da região de domínio da função de aptidão. O número de acionamentos de cada bomba nas três Aplicações registradas anteriormente está retratado na Tabela 6.2 a seguir.

Tabela 6.2 – Número de acionamentos das bombas no horizonte operacional

Bomba	B3Marés			B4Marés			B5Marés			B1R1			B2R1			Poço		
Alternativa Operacional	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Acionamentos	0	1	0	3	3	2	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	2

Pelos números apresentados na tabela acima pode-se concluir que a única violação observada se torna insignificante e não compromete a validade do modelo.

Do ponto de vista prático o acionamento e a parada de bombas de média e grande pressão em sistema de abastecimento de água, exigem um estudo complementar e criterioso já que provoca interferência nas grandezas relacionadas ao desempenho elétrico da unidade de consumo, bem como, altera a rotina operacional da estação de tratamento que alimenta o sistema.

Portanto, é recomendável que sejam levantadas as curvas de funcionamento dos conjuntos motor-bomba, tais como, curvas das rotações na partida e desligamento do motor em função do tempo, curvas das tensões de partida e desligamento do motor em função do tempo, curvas das correntes de partida e desligamento do motor em função do tempo, que revelarão aspectos importantes quanto a eficiência energética. Alguns sistemas apresentam desperdício de energia pela elevação do consumo de potência durante o arranque do motor e podem gerar aquecimento excessivo do motor e comprometer a sua vida útil.

▪ **Recuperação do Estado Inicial dos Reservatórios.**

Pode-se observar pelas figuras que fazem a representação gráfica do comportamento do nível de água, que o modelo matemático tem dificuldade de enquadrar os resultados dentro desse condicionante, não obstante a aplicação de valores mais severos para o coeficiente de penalidade que faz parte da função de restrição. A esse respeito, Goldman e Mays (1999) comentam que para uma simulação de 24 horas o conceito dos reservatórios retornarem a seus níveis iniciais, pressupõe que as bombas recalcam um volume de água igual à soma das demandas nodais. Isto acontece se existir apenas um reservatório de distribuição. Mesmo se o bombeamento for igual à soma das demandas, o sistema pode não retornar ao estado original se há vários reservatórios no sistema, a menos que eles comecem completamente cheios.

No Sistema Adutor Marés quando num determinado intervalo de tempo, a regra operacional estabelece o desligamento das três bombas da elevatória Marés, o sistema adutor principal perde a carga de pressão sustentada pelas bombas, fazendo com que a água de um reservatório possa migrar para outro segundo a carga piezométrica de cada um naquele instante. Essa transferência de água ocorre com mais facilidade entre os dois reservatórios vizinhos do Centro de Distribuição R2, ambos semi-enterrados, mas construídos em planos diferentes, o que facilita o deslocamento de água do de maior carga piezométrica (B2R2) para o mais enterrado (A2R2), embora essa transferência envolva também o reservatório B1R1 do Centro R1, distante 480 m do Centro R2 e construído praticamente na mesma cota topográfica. Esse refluxo da água pode ser visualizado nos trechos T9, T10, T19 e T25 da Figura 6.12 que mostra o sentido de escoamento da água na rede no intervalo entre 1 e 2 horas da manhã, correspondente à Alternativa Operacional 3 (Figura 6.5). O trecho T7, logo após a saída

do Centro Marés, apresenta-se sem escoamento pelo fato das suas bombas estarem desligadas naquele horário.

Em todas as aplicações da interface foram verificadas no máximo três paradas completas das bombas da elevatória Marés em horários aleatórios. Apesar da redução do número de horas trabalhadas pelas bombas ser um intento perseguido pelo modelo de eficiência energética, ela precisa ser melhor gerenciada pois reflete diretamente nos procedimentos operacionais das unidades a montante da elevatória.

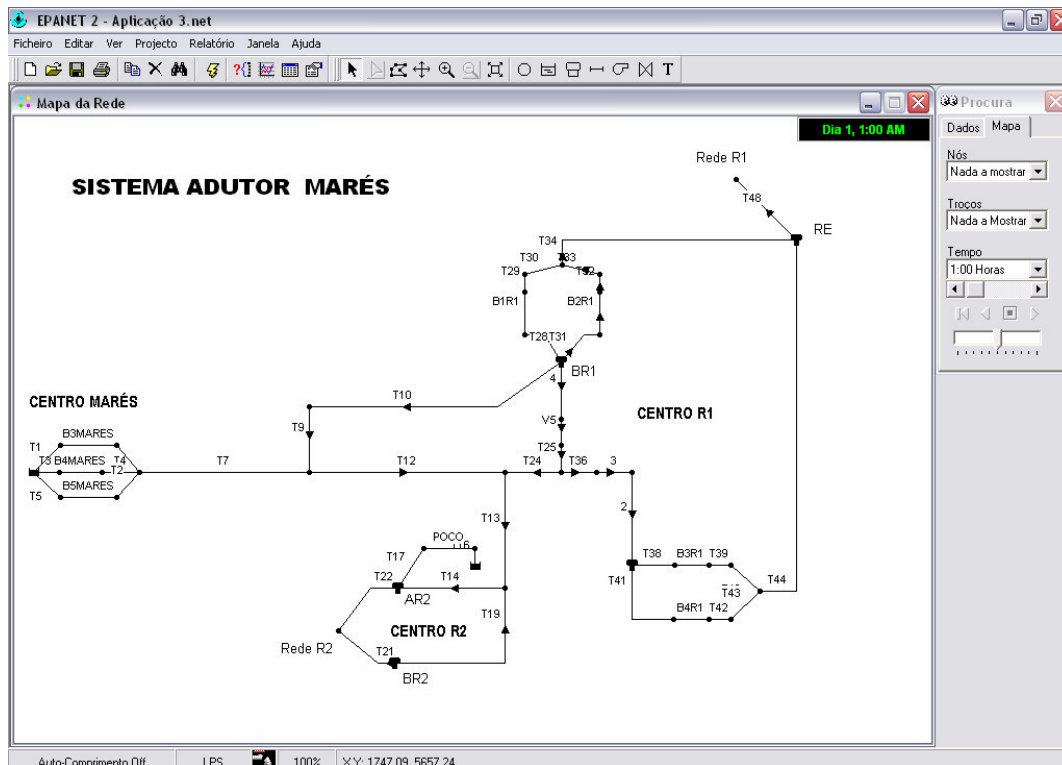


Figura 6.12 – Alternativa Operacional 3: Sentido do fluxo na rede .entre 1 e 2 horas.

Neste caso, o volume total armazenado nos reservatórios será o mesmo, mas certa quantidade de água migrou de um para outro, dificultando a igualdade das cargas piezométricas no instante inicial e final da simulação. Dessa maneira, é mais proveitoso comparar as cargas de pressão no primeiro nó da rede alimentado pelos reservatórios de distribuição. Nas Figuras 6.13 e 6.14, observa-se uma boa concordância entre aqueles valores comprovando que o déficit de volume em um reservatório, em relação a carga inicial, pode ser compensado pelo excesso de volume no outro no instante final do ciclo

operacional. A Tabela 6.3 mostra a carga de pressão inicial e final para as três aplicações apresentadas nesse trabalho.

Tabela 6.3 – Pressão inicial e final nos nós de partida da rede.

	Pressão inicial (m)	Pressão final (m)	Diferença (m)	Pressão inicial (m)	Pressão final (m)	Diferença (m)
Nome Nó	Rede_R1			Rede_R2		
Aplic. 1	18,33	17,67	- 0,66	19,40	18,63	- 0,77
Aplic. 2	18,33	18,44	+ 0,11	19,40	19,30	- 0,10
Aplic. 3	18,33	18,57	+ 0,24	19,40	19,33	- 0,07

▪ **Garantia de Suprimento Contínuo a Rede**

A restrição imposta ao problema da não existência de pressão negativa na rede é satisfeita em todas as simulações levadas a efeito, o que garante a continuidade do abastecimento ao longo de todo alcance de operação, não havendo custos de penalidades a serem considerados. O atendimento a essa restrição pode ser visualizada na Figura 6.13 e Figura 6.14, nas quais a pressão nos nós iniciais da rede assumem valores sempre positivos e coerentes com o mínimo operacional recomendado pela NB 594/77 da ABNT.

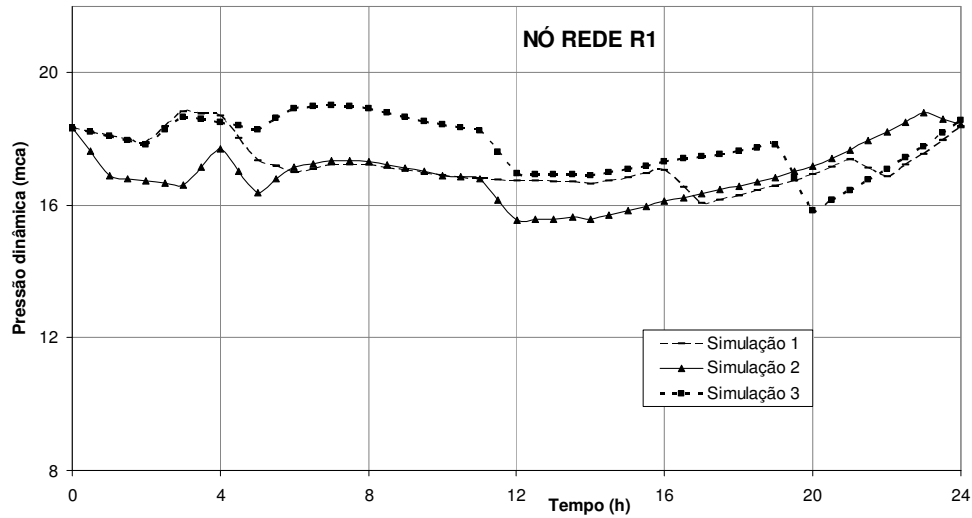


Figura 6.13 – Distribuição de pressão no nó Rede_R1

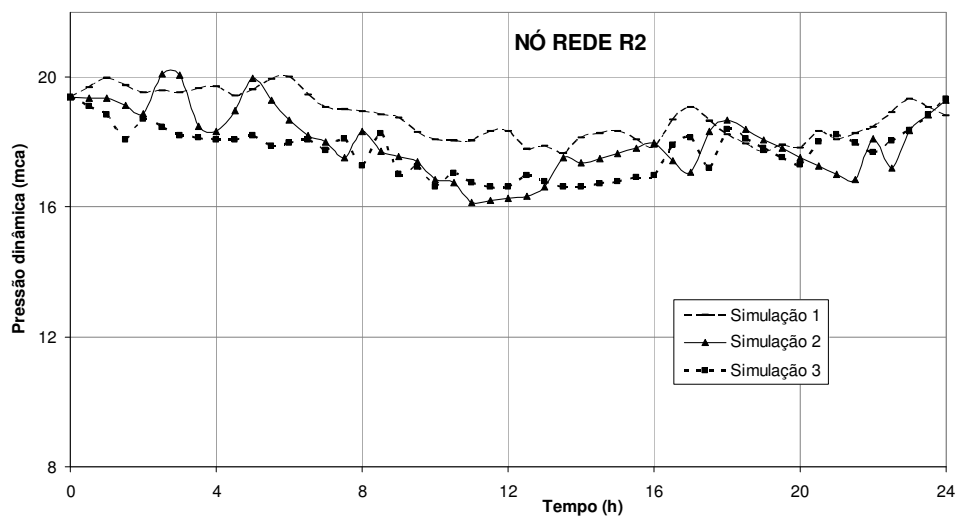


Figura 6.14 – Distribuição de pressão no nó Rede_R2

6.2.1.1 – Condições de Extravasamento

Pode-se afirmar que as violações de algumas restrições não prejudicam, nem inviabiliza o funcionamento regular do sistema, requerendo apenas do operador manobras adicionais em algumas válvulas, de forma a não permitir a ultrapassagem dos níveis de água além dos limites máximos estabelecidos para cada reservatório. Como exemplo, na Simulação 1 da Figura 6.8, o nível de água no reservatório AR1 atinge seu nível máximo operacional às 2:00 horas, fato que pode ensejar perda física de água por

extravasamento. Em situações como essa, a arquitetura interna do EPANET2 interrompe automaticamente o fluxo pelo tubo que alimenta o reservatório, sem no entanto, desligar as bombas do recalque. Na operação de um sistema real, pode-se facilmente imitar o modelo computacional, promovendo o fechamento, da válvula de controle existente à entrada de cada reservatório.

No caso citado da Figura 6.8, a válvula deveria ser fechada às 2 horas, devendo voltar ao estado programado às 9:30 horas, em conformidade com o comportamento do nível de água mostrado naquela figura. Neste intervalo, as bombas do Centro Marés continuariam funcionando normalmente para alimentar os demais reservatórios do sistema, e apenas o fluxo para o reservatório BR1 estaria momentaneamente interrompido.

Para situações semelhantes em outros reservatórios, aplicar-se-ia idêntico procedimento, sempre em concordância com o comportamento hidráulico do sistema mostrado pelo EPANET2.

6.3 – Pesquisa da Melhor Estrutura Tarifária

Em complemento ao estudo de otimização das regras operacionais em sistemas adutores, a interface computacional criada foi incorporada com instruções para receber informação da estrutura tarifária a ser aplicada a cada Centro de Distribuição para posterior processamento do programa. Assim, mais uma ferramenta de busca da melhor solução fica disponível aos gestores do sistema para promover simulações com várias combinações possíveis e tomar uma decisão segura da mais rentável financeiramente.

Para reproduzir uma investigação com esse enfoque, o programa OTIMIZE foi alimentado com várias combinações de classes tarifárias para os sub-sistemas Marés e R1, mantendo-se invariável o enquadramento tarifário do poço do R2 (baixa tensão B3). O resultado da pesquisa para cinco simulações com cada combinação de tarifas é mostrado na Tabela 6.4, considerando um tempo de processamento de 30 minutos e os melhores parâmetros genéticos definidos anteriormente nesse trabalho.

Segundo Resolução da ANEEL, a unidade consumidora Marés deve ser compulsoriamente incluída na estrutura tarifária horo-sazonal pelo fato de apresentar um nível de demanda de potência superior a 300 kW.

Tabela 6.4 – Valores de custo de bombeamento para vários arranjos tarifários

Simulação	Custo de Bombeamento (R\$)		
	Verde x Convencional	Azul x Convencional	Verde x Verde
1	9.283,68	18.475,75	8.932,37
2	9.225,51	18.468,29	9.069,41
3	9.062,91	18.527,79	9.137,46
4	9.088,22	18.431,22	9.188,84
5	9.117,74	19.282,62	9.144,01
MÉDIA	9.155,61	18.637,13	9.094,42

Torna-se evidente pelos números apresentados na Tabela 6.4, que a estrutura horo-sazonal com tarifa Verde é a mais atrativa financeiramente para ser aplicada às unidades consumidoras Marés e R1, continuando a tarifa Convencional do Grupo B3 (baixa tensão) a ser aplicada à unidade R2 para aferir o consumo elétrico do conjunto elevatório do poço profundo. Esta combinação de classes tarifárias é apenas 0,67 % mais vantajosa que a combinação Verde x Convencional para Marés e R1, respectivamente, devendo, portanto ser feito um estudo com maior número de simulações que englobe, também as tarifas horo-sazonais de outros períodos do ano.

O enquadramento na tarifa horo-sazonal Azul para a unidade Marés e Convencional para a unidade R1 revelou-se a menos atrativa dentre as combinações pesquisadas, podendo-se justificar esse baixo rendimento com os seguintes argumentos:

a) a capacidade dos reservatórios do sistema é insuficiente para dispensar o bombeamento no horário de tarifa mais cara;

b) o bombeamento no horário de ponta, na tarifa Azul, se dá com um custo unitário de demanda, R\$ 29,76/kW, considerado elevado quando comparado com outras classes tarifárias, tal como a de demanda na tarifa Verde (R\$ 11,545/kW);

c) a potência instalada na unidade consumidora Marés é significativamente superior àquela instalada na unidade R1, fazendo com que o regime tarifário adotado para aquela região prevaleça no valor do custo final apurado.

Essa análise demonstra que o potencial da interface OTIMIZE em proporcionar simulações do desempenho elétrico para as principais modalidades tarifárias reguladas pela resolução 456/2000 da ANEEL, constitui-se num importante fator gerador de economia para as companhias de saneamento, evitando-se que a

escolha da melhor modalidade seja feita em função de estimativas operacionais das unidades consumidoras abrangidas pelo sistema.

A regra de operação para a simulação de menor custo encontrada (Simulação 1, Verde x Verde) apresentada na Tabela 6.4 é mostrada na Figura 6.15, tendo as correspondentes grandezas elétricas resultantes apresentadas na Figura 6.16.

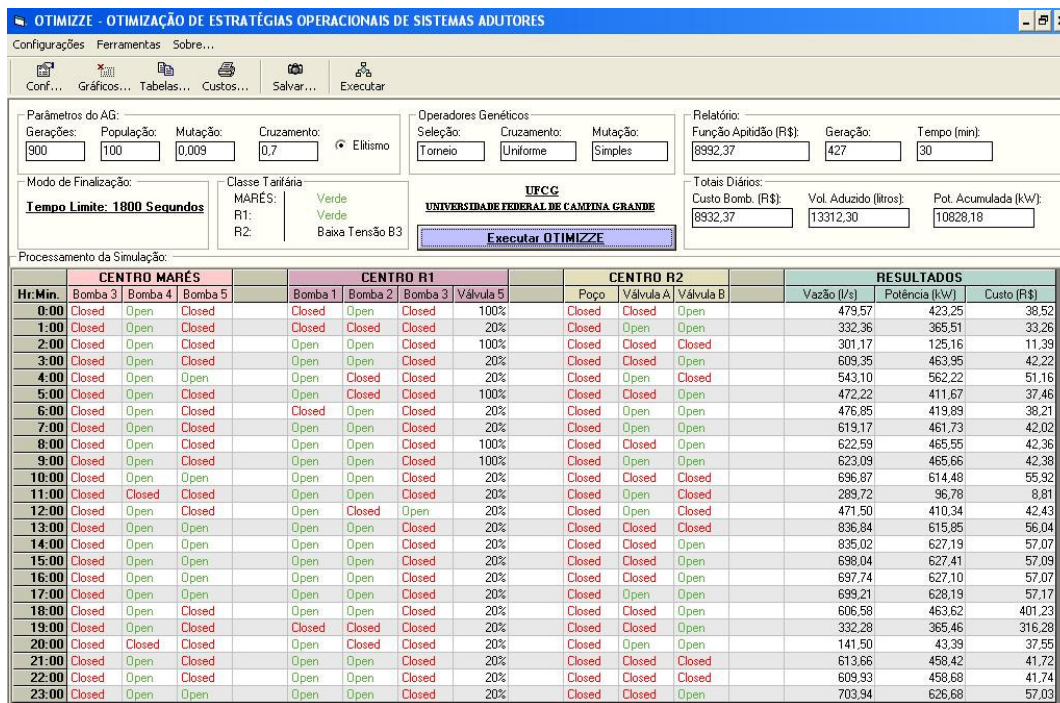


Figura 6.15 – Regra de operação da Alternativa mais econômica.

Essa regra operacional ótima proposta pelo modelo desenvolvido revela alguns aspectos que merecem ser destacados:

1) no Centro Marés, o motor de acionamento da bomba B3, o de maior potência nominal, permanece desligado durante todo horizonte de operação, privilegiando os motores de menor potência;

2) o modelo consegue identificar uma combinação de bombas e válvulas de forma a se permitir desligar todas as bombas da elevatória de Marés durante 2 horas do dia, configuração nunca alcançada pelas regras convencionais;

3) uma das horas que a elevatória de Marés fica desativada corresponde ao horário de ponta;

4) a bomba do poço não é acionada nas 24 horas da operação, demonstrando a sua condição de unidade de reforço de produção;

5) o desligamento de todas as bombas da elevatória de Marés requer um planejamento operacional diferente da estação de tratamento de água que deverá reduzir naqueles horários o volume de água a ser tratada;

6) no horário das 12 às 13 horas, quando a bomba B3R1 é ligada para rebaixar o nível do reservatório AR1, a bomba B2R1 é desligada de forma que apenas duas bombas permanecem operativas reduzindo o nível de demanda faturável;

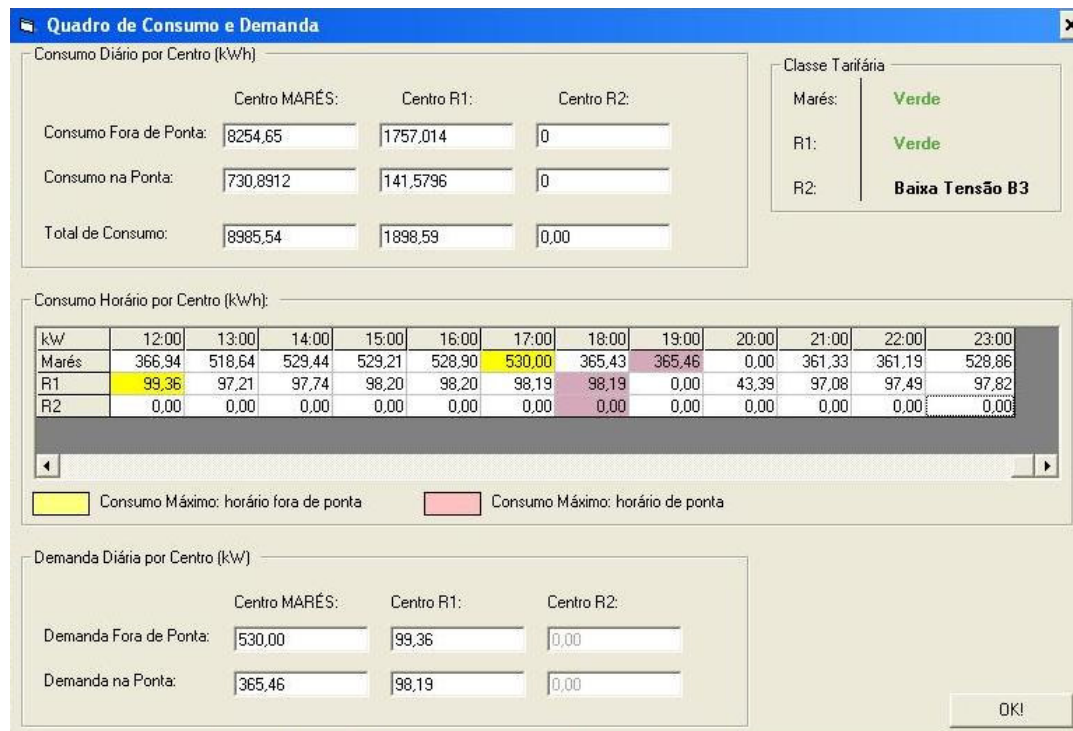


Figura 6.16 - Consumo e demanda da Alternativa Operacional mais econômica.

A Figura 6.17 revela a evolução temporal do valor da função de aptidão ao longo do processo de convergência do AG e demonstra que o tempo computacional dispensado pelo algoritmo para alcançar valores estáveis, foi de 22 minutos, compatível com o tempo de 60 minutos reservado para efetuar eventual mudança na política operativa do sistema. Esse tempo pode facilmente ser otimizado com o uso de um equipamento de *hardware* com características técnicas mais adequadas ao processamento rápido de grandes volumes de cálculos matemáticos. Os resultados apresentados foram obtidos com um microcomputador equipado com um processador AMD Duron rodando com apenas 1,19 Ghz de clock.

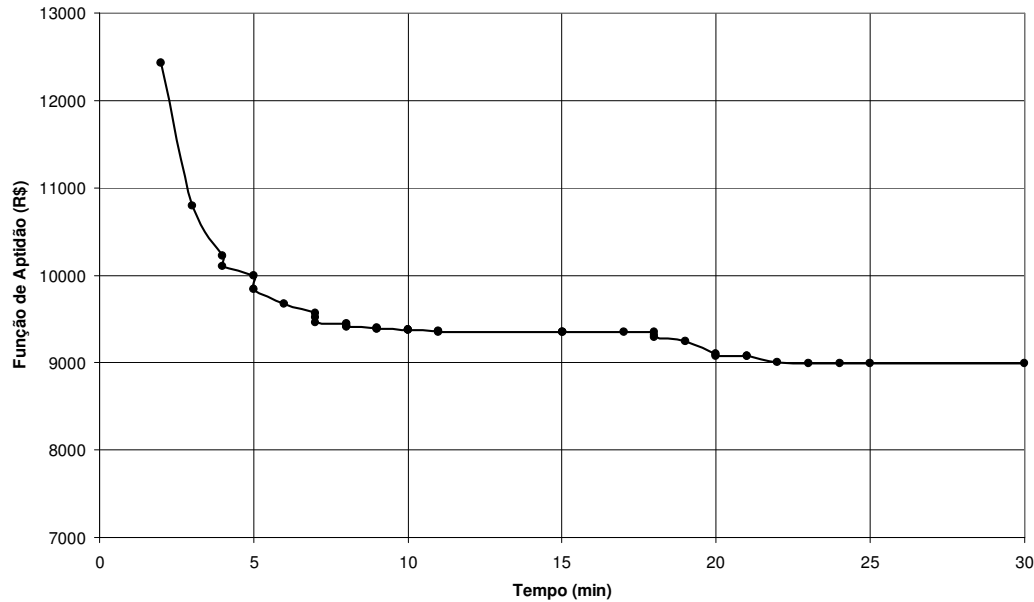


Figura 6.17 – Evolução da função de aptidão da melhor solução.

6.3.1 – Estimativa da redução do consumo elétrico

6.3.1.1 – Para o centro Marés

Um cotejo dos valores obtidos da simulação ótima com aqueles valores medidos pela concessionária de energia elétrica fica prejudicado para o Centro Marés pelo fato de que um único quadro concentra a medição do consumo de três elevatórias, da ETA e dos blocos administrativos. Uma estimativa do consumo de cada grupo moto-bomba da elevatória de Marés é feita a seguir tendo como base a potência nominal do motor e o número de horas de funcionamento de cada conjunto, apresentado na Tabela 6.5 para os meses de janeiro a abril de 2004.

Tabela 6.5 – Tempo de operação mensal das bombas do Centro Marés. (Ano 2004)

Conjunto Moto-Bomba	Tempo de Operação Mensal (h)			
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril
B3MARÉS	0,0	0,0	0,0	0,0
B4MARÉS	582,1	499,6	523,6	526,5
B5MARÉS	0,0	0,0	0,0	0,0
B4 + B5	129,1	120,8	171,7	121,6
N ^o dias observados	31	29	31	30

Fonte: CAGEPA

Os registros da Tabela 6.5 não fazem distinção entre horário de ponta e fora de ponta, o que impossibilita uma pormenorização de análise do consumo com tarifação horo-sazonal (Azul ou Verde), mas os dados apresentados dão origem a Tabela 6.6 que apresenta uma estimativa do consumo diário de cada conjunto elevatório, exemplificada para a bomba B4MARÉS no mês de Janeiro.

Potência nominal das bombas:

B3MARÉS: 750 CV (559,5 kW)

B4MARÉS: 500 CV (373,0 kW)

B5MARÉS: 500 CV (373,0 kW)

Consumo estimado diário:

B4MARÉS : $(373 \times 582,1)/31 = 7.003,98$ kWh

Tabela 6.6 – Estimativa do consumo diário das bombas do Centro Marés. (ano 2004)

Conjunto Moto-Bomba	Consumo Médio Diário (kWh)			
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril
B5MARÉS	7.003,98	6.425,89	6.300,09	6.546,15
B4 + B5	3.106,73	3.107,48	4.131,88	3.023,79
Total	10.110,71	9.533,37	10.431,97	9.569,94

Com base nos totais de consumo da Tabela 6.6 e no valor de consumo total diário do Centro Marés (8.985,84 kWh), apresentado na Figura 6.16 para a simulação ótima, resulta nos percentuais de redução de consumo apresentado na Tabela 6.7.

Tabela 6.7 – Percentual de redução de consumo elétrico para o Centro Marés

Mês	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril
Redução de Consumo (%)	12,52	6,09	16,09	6,50

Tomando por base os números da Tabela 6.7, chega-se à conclusão que a implantação da estrutura tarifária horo-sazonal Verde no Centro Marés e no Centro R1, além da adoção da regra operacional otimizada proposta neste trabalho, pode-se estimar

uma economia média de 10,3% no consumo de energia elétrica para os quatro meses pesquisados.

6.3.1.2 – Para o centro R1

Para o Centro de Distribuição R1, o consumo elétrico registrado no medidor de energia exclusivo da elevatória é listado na Tabela 6.8 para os meses de janeiro a abril de 2004. Os dados apresentados são da Nota Fiscal/Conta de Energia Elétrica da SAELPA.

Tabela 6.8 – Valores do consumo de energia medido no Centro R1

Mês de referência	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril
Período de consumo	10/12 - 08/01	09/01 - 08/02	09/02 - 09/03	10/03 - 11/04
Consumo mensal (Kwh)	68.306	58.384	62.156	68.060
N ^o dias de medição	30	31	30	33
Consumo médio diário (Kwh)	2.276,87	1.883,35	2.071,87	2.062,42

Fonte: SAELPA

A Figura 6.16 mostra que o consumo diário de energia elétrica calculado para o Centro R1 corresponde a 1.898,59 kWh, que confrontado com os consumos médio diário constante na Tabela 6.8, resulta nos percentuais de variação de consumo de energia constantes da Tabela 6.9, demonstrando a eficiência do modelo de otimização proposto.

Tabela 6.9 – Variação de consumo de energia para o Centro R1

Mês	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril
Redução/Acréscimo	-19,92 %	+0,81 %	-9,13 %	-8,63 %

Pelos números apresentados na tabela acima pode-se estimar uma redução média de consumo de energia para o Centro de Distribuição R1 da ordem de 9,22 % pela simples alteração da regra operacional empregada e implantação da tarifa Verde em substituição a tarifa Convencional atualmente empregada.

6.3.1.3 – Para o centro R2

A Figura 6.13 revela que pelo planejamento operacional ótimo proposto pelo programa o poço profundo existente no Centro R2 passa a ser considerado como uma unidade de reserva técnica, devendo todo o suprimento de água ter origem no manancial de superfície formado pela barragem Marés. Com essa política de operação, o consumo de energia nessa unidade consumidora seria nulo.

A Tabela 6.10 apresenta o consumo elétrico dessa unidade medido pela SAELPA entre os meses de janeiro a abril de 2004.

Tabela 6.10 – Valores do consumo de energia medido no Centro R2.(Fonte: SAELPA)

Mês de referência	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril
Período de consumo	15/12 - 13/01	14/01 - 10/02	11/02 - 14/03	15/03 - 13/04
Consumo mensal (Kwh)	12.939	6.059	8.678	9.357
N ^o dias de medição	30	28	33	30
Consumo médio diário (Kwh)	431,30	216,39	262,97	311,90

Pelos números da Tabela acima, o consumo médio de energia elétrica apurado, nesses quatro meses de observação foi de 305,64 kWh, enquanto que com a adoção do regime otimizado, esse consumo resultaria nulo, conforme mostra a Figura 6.16, com redução de 100% nos gastos com energia elétrica nessa unidade consumidora.

Os custos da CAGEPA com energia elétrica, nas unidades R1 e R2, nos 4 meses analisados (121 dias) foi de R\$ 41.557,09 , equivalente a uma média diária de R\$ 343,45 . Pelo modelo proposto, este valor diário é reduzido para R\$ 282,14, acarretando uma economia diária de 21,73%, só com a parcela de consumo. Em termos anuais essa economia alcança o valor de R\$ 22.378,15. A este benefício deve ser acrescentado o valor da parcela de redução da demanda de potência, resultante de uma possível renegociação do valor contratado, conforme já discutido anteriormente. Análise semelhante deixa de ser feita para a unidade Marés, devido à concentração de três elevatórias e ETA na mesma unidade consumidora.

Com essa análise, fica demonstrada a eficiência do modelo proposto, no sentido de reduzir o custo com energia elétrica em sistemas de abastecimento de água,

com mudanças dos procedimentos operacionais e adequado enquadramento tarifário, sem a necessidade de investimentos em novos equipamentos.

6.4 – Formas práticas de aplicação da rotina OTIMIZE

Comprovada a aplicabilidade dos Algoritmos Genéticos no processo de eficiência energética em sistemas adutores, pode-se sugerir a aplicação prática do programa OTIMIZE de quatro formas distintas:

1) definição de uma regra operacional alguns minutos antes do início de um novo ciclo de trabalho estimando as condições dos reservatórios para o instante $t = 0$, introduzindo os dados no EPANET2. Neste caso, pode-se definir uma regra ótima para determinado dia em função dos níveis de água ao final do horizonte de operação do dia anterior;

2) definição de uma regra, em caráter emergencial, após pane em alguma das bombas;

3) após uma interrupção temporária no fornecimento de energia a uma unidade consumidora;

4) construção de um grande banco de dados de regras operacionais contemplando várias condições de reservação inicial. Neste caso, as regras de operação desse conjunto de opções poderiam ser obtidas a partir da fixação de tempos de processamento mais longos, como por exemplo, 12 horas, uma tentativa de obter soluções mais econômicas pela maior atuação dos operadores genéticos no processo de convergência.

Desta forma, o CCO passaria a dispor de um amplo conjunto de regras ótimas operacionais, devendo ser escolhida aquela que mais se aproximasse dos níveis de água registrados nos reservatórios no início de cada jornada.

Ajustes pontuais de procedimento devem sempre ser feitos pelos operadores quando, eventualmente, alguma restrição mais forte estiver na iminência de ser violada, como exemplo, uma brusca mudança nas características de consumo do setor abastecido.

Como exemplo dessa última alternativa, apresenta-se a seguir duas regras operacionais, considerando 3 horas como o tempo de parada para o processamento do Algoritmo Genético, a partir das seguintes condições iniciais:

Cenário A: todos os reservatórios com 80% da sua carga útil no início do horizonte de operação (meia-noite);

Cenário B: o reservatório de armazenamento semi-enterrado, BR1, com 90% da sua capacidade útil e os reservatórios de distribuição com 50% daquela capacidade no instante inicial (meia-noite).

Para estas simulações foram escolhidas as estruturas tarifárias que resultaram mais econômicas nos testes de combinação feitos anteriormente, ou seja, horo-sazonal Verde tanto para a unidade consumidora Marés, como para a unidade R1. Para o poço profundo da unidade consumidora R2 foi mantido seu enquadramento na tarifação Convencional de baixa tensão B3.

Os resultados obtidos pelo OTIMIZE para esses dois cenários são apresentados nas Figuras 6.18 e 6.19.

The screenshot shows the OTIMIZE software interface. The title bar reads "OTIMIZE - OTIMIZAÇÃO DE ESTRATÉGIAS OPERACIONAIS DE SISTEMAS ADUTORES". The interface includes a menu bar with options like "Configurações", "Ferramentas", and "Sobre...". Below the menu, there are several control panels:

- Parâmetros do AG:** Gerações: 9000, População: 100, Mutação: 0,009, Cruzamento: 0,7, Elitismo (selected).
- Operadores Genéticos:** Seleção: Torneio, Cruzamento: Uniforme, Mutação: Simples.
- Relatório:** Função Aplicado (R\$): 7336,27, Geração: 900, Tempo (min): 180.
- Modo de Finalização:** Tempo Limite: 10800 Segundos.
- Classe Tarifária:** MARE'S: Verde, R1: Verde, R2: Baixa Tensão B3.
- Totais Diários:** Custo Bomb. (R\$): 7336,27, Vol. Aduzido (litros): 13226,70, Pot. Acumulada (kW): 10150,66.

At the bottom, there is a table titled "Processamento da Simulação:" showing the operational status of various components over a 24-hour period. The table is organized into columns for different centers and their respective components, along with summary results.

Hr:Min.	CENTRO MARÉS			CENTRO R1				CENTRO R2			RESULTADOS		
	Bomba 3	Bomba 4	Bomba 5	Bomba 1	Bomba 2	Bomba 3	Válvula 5	Popo	Válvula A	Válvula B	Vazão (l/s)	Potência (kW)	Custo (R\$)
0:00	Closed	Open	Closed	Open	Closed	Closed	20%	Closed	Open	Closed	468,28	409,45	37,26
1:00	Closed	Open	Closed	Open	Closed	Closed	20%	Closed	Closed	Open	469,17	408,49	37,17
2:00	Closed	Open	Closed	Open	Open	Closed	20%	Closed	Open	Open	615,84	462,87	42,12
3:00	Closed	Closed	Closed	Closed	Open	Closed	100%	Closed	Closed	Open	142,51	54,66	4,97
4:00	Closed	Open	Closed	Open	Closed	Closed	20%	Closed	Open	Open	465,15	408,91	37,21
5:00	Closed	Open	Closed	Open	Closed	Closed	20%	Closed	Open	Open	466,95	408,58	37,18
6:00	Closed	Open	Closed	Open	Closed	Closed	20%	Closed	Closed	Open	469,55	408,26	37,15
7:00	Closed	Open	Closed	Closed	Open	Closed	20%	Closed	Open	Open	479,67	417,94	38,03
8:00	Closed	Open	Closed	Open	Open	Closed	100%	Closed	Open	Open	541,34	402,56	36,63
9:00	Closed	Open	Closed	Open	Open	Closed	20%	Closed	Open	Open	627,29	460,65	41,92
10:00	Closed	Open	Closed	Open	Open	Closed	20%	Closed	Open	Closed	619,80	456,66	41,56
11:00	Closed	Open	Closed	Open	Open	Closed	20%	Closed	Closed	Open	627,23	461,25	41,97
12:00	Closed	Open	Closed	Open	Closed	Open	20%	Closed	Open	Open	476,90	409,24	42,33
13:00	Closed	Open	Closed	Open	Open	Closed	20%	Closed	Closed	Closed	765,12	455,71	41,47
14:00	Closed	Open	Closed	Open	Open	Closed	20%	Closed	Closed	Open	795,51	462,08	42,05
15:00	Closed	Open	Closed	Open	Open	Closed	20%	Closed	Closed	Open	617,50	462,94	42,13
16:00	Closed	Open	Closed	Open	Open	Closed	20%	Closed	Closed	Open	614,98	463,45	42,17
17:00	Closed	Open	Closed	Open	Open	Closed	20%	Closed	Closed	Open	612,83	463,83	42,21
18:00	Closed	Open	Closed	Closed	Open	Closed	20%	Closed	Closed	Closed	469,65	416,03	36,04
19:00	Closed	Open	Closed	Open	Open	Closed	20%	Closed	Closed	Closed	613,76	457,58	39,00
20:00	Closed	Open	Closed	Open	Open	Closed	20%	Closed	Closed	Open	619,06	462,69	40,42
21:00	Closed	Open	Closed	Open	Open	Closed	20%	Closed	Open	Closed	614,79	463,73	42,20
22:00	Closed	Open	Closed	Open	Open	Closed	20%	Closed	Closed	Open	609,03	464,05	42,23
23:00	Closed	Open	Closed	Open	Closed	Closed	20%	Closed	Closed	Open	464,78	409,04	37,22

Figura 6.18 - Regra operacional para o Cenário A.

OTIMIZZE - OTIMIZAÇÃO DE ESTRATÉGIAS OPERACIONAIS DE SISTEMAS ADUTORES													
Configurações Ferramentas Sobre...													
Conf... Gráficos... Tabelas... Custos... Salvar... Executar													
Parâmetros do AG:				Operadores Genéticos				Relatório:					
Gerações: 9000	População: 100	Mutação: 0,009	Cruzamento: 0,7	Seleção: Torneio		Cruzamento: Uniforme		Mutação: Simples		Função Aplicação (R\$): 8870,14	Geração: 3401	Tempo (min): 180	
Modo de Finalização:				Classe Tarifária				Totais Diários:					
Tempo Limite: 10800 Segundos				MAREs: Verde R1: Verde R2: Baixa Tensão B3				Custo Bomb. (R\$): 8870,14 Vol. Aduzido (litros): 13092,90 Pot. Acumulada (kW): 10218,07					
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE													
Executar OTIMIZZE													
Processamento da Simulação:													
Hr:Min.	CENTRO MARÉS			CENTRO R1				CENTRO R2			RESULTADOS		
	Bomba 3	Bomba 4	Bomba 5	Bomba 1	Bomba 2	Bomba 3	Válvula 5	Popo	Válvula A	Válvula B	Vazão (l/s)	Potência (kW)	Custo (R\$)
0:00	Closed	Closed	Closed	Closed	Open	Closed	100%	Closed	Open	Open	147,84	53,53	4,87
1:00	Closed	Open	Closed	Open	Open	Closed	20%	Closed	Closed	Open	616,37	464,05	42,23
2:00	Closed	Open	Closed	Open	Open	Closed	20%	Closed	Closed	Open	608,72	464,59	42,28
3:00	Closed	Open	Closed	Open	Open	Closed	20%	Closed	Open	Open	334,69	367,10	33,41
4:00	Closed	Open	Closed	Open	Open	Closed	20%	Closed	Open	Open	615,92	463,62	42,13
5:00	Closed	Open	Closed	Open	Open	Closed	100%	Closed	Open	Open	612,26	467,37	42,53
6:00	Closed	Open	Closed	Open	Open	Closed	20%	Closed	Open	Closed	602,91	464,71	42,29
7:00	Closed	Open	Closed	Open	Open	Closed	20%	Closed	Open	Closed	600,96	464,69	42,29
8:00	Closed	Open	Closed	Open	Closed	Closed	20%	Closed	Closed	Open	463,53	409,45	37,26
9:00	Closed	Open	Closed	Open	Closed	Closed	20%	Closed	Closed	Open	469,79	409,31	37,25
10:00	Closed	Open	Closed	Open	Open	Closed	20%	Closed	Open	Closed	624,13	462,38	42,08
11:00	Closed	Open	Closed	Open	Closed	Closed	20%	Closed	Closed	Open	475,28	409,48	37,26
12:00	Closed	Open	Closed	Open	Closed	Open	20%	Closed	Open	Closed	480,48	409,26	42,33
13:00	Closed	Open	Closed	Open	Open	Closed	100%	Closed	Closed	Open	780,89	462,57	42,09
14:00	Closed	Open	Closed	Open	Open	Closed	100%	Closed	Open	Closed	629,13	464,91	42,31
15:00	Closed	Open	Closed	Open	Open	Closed	20%	Closed	Closed	Open	622,25	462,64	42,10
16:00	Closed	Open	Closed	Open	Open	Closed	100%	Closed	Closed	Closed	622,78	465,59	42,37
17:00	Closed	Open	Closed	Open	Open	Closed	100%	Closed	Closed	Open	623,27	466,07	42,41
18:00	Closed	Open	Closed	Closed	Open	Closed	20%	Closed	Closed	Closed	472,17	415,07	39,21
19:00	Closed	Closed	Closed	Closed	Open	Closed	20%	Closed	Closed	Open	151,20	52,48	45,42
20:00	Closed	Open	Closed	Closed	Open	Closed	20%	Closed	Closed	Closed	476,98	414,12	39,38
21:00	Closed	Open	Open	Open	Open	Closed	20%	Closed	Closed	Open	724,88	623,69	56,76
22:00	Closed	Open	Open	Open	Open	Closed	20%	Closed	Closed	Open	719,65	624,30	56,81
23:00	Closed	Open	Closed	Open	Open	Closed	20%	Closed	Closed	Closed	616,82	457,09	41,60

Figura 6.19 – Regra operacional para o cenário B.

Estes resultados mostram que a regra operacional do Cenário 1 resultou em significativa melhora no custo de bombeamento (R\$ 7.336,27), em comparação àquele obtido para um tempo de parada de 30 minutos apresentado na Figura 6.15 (R\$8.932,37), muito embora, em outras Aplicações do mesmo Cenário, os resultados não tenham sido tão favoráveis. A regra operacional resultante do Cenário B não resultou em ganhos econômicos e apresenta-se menos eficiente que o Cenário A.

Uma característica comum observada em todas as aplicações apresentadas nesse trabalho refere-se ao funcionamento de apenas duas bombas da Região R1 por ocasião da operação de rebaixamento de nível do reservatório AR1. Esse feito demonstra que o algoritmo desliga a bomba B1R1 ou a bomba B2R1 no instante que a bomba B3R1 é acionada. O benefício dessa ação é traduzido pela ocorrência de uma demanda máxima de 99,36 kW (Figura 6.16), valor bem abaixo dos 170 kW contratados à concessionária de energia elétrica.

Vale destacar que a política operacional proposta no Cenário A (Figura 6.18) apresenta-se com uma programação de bombas mais uniforme, reduzindo-se a ação do operador sobre esses equipamentos para manobras de liga/desliga e conseqüentemente os seus custos de manutenção.

Uma comparação do comportamento dos níveis de água nos reservatórios BR1 e BR2 mostrados nas Figuras 6.20 e 6.21 com aqueles verificados nos mesmos reservatórios nas Figuras 6.7 e 6.9, respectivamente, mostra que a regra mais econômica do Cenário A tende a enquadrar melhor os níveis de água dentro dos limites operacionais pré-estabelecidos, reduzindo-se o número de manobras nas válvulas de entrada nesses reservatórios. Deve-se ressaltar que o nível máximo operacional pode ser fixado com um valor um pouco menor que nível de transbordamento do reservatório, medida que evita o fechamento das válvulas quando a carga hidráulica se avizinhasse daquele limite.

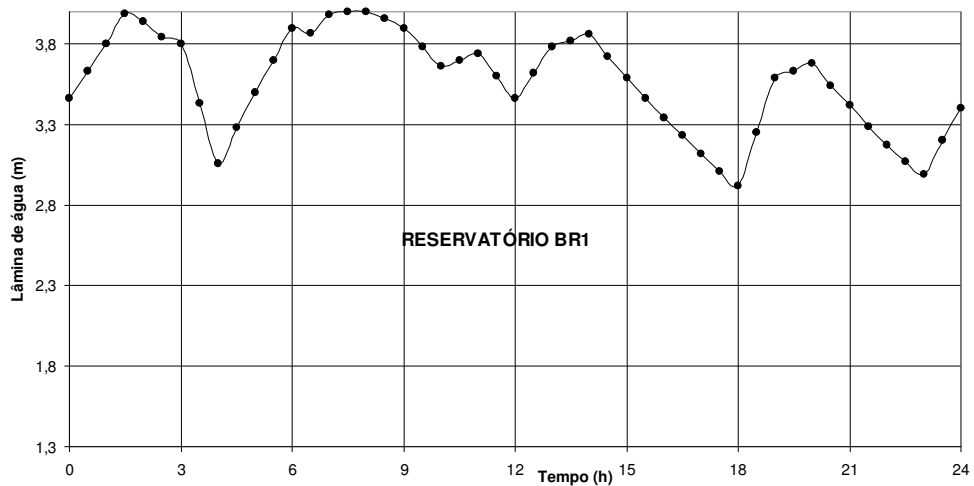


Figura 6.20 – Variação temporal do nível de água no reservatório BR1

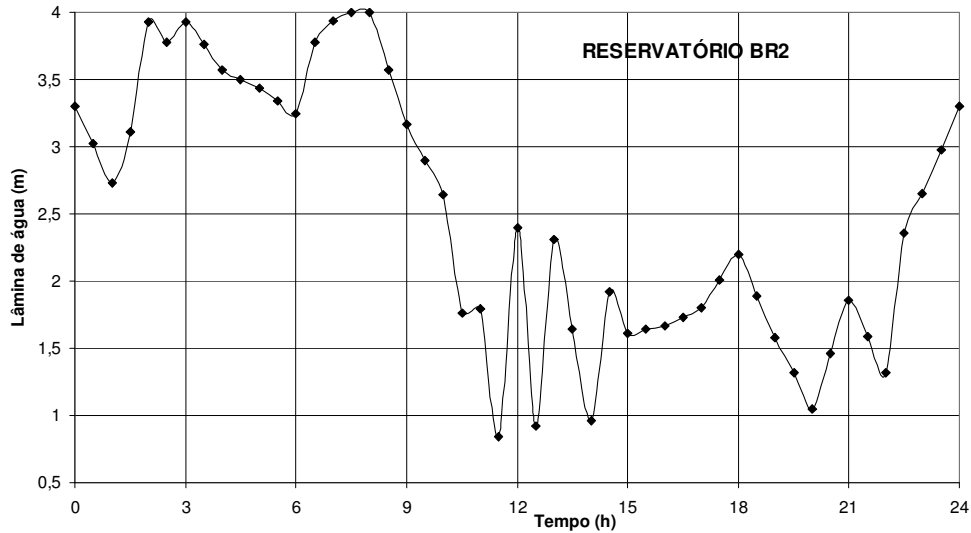


Figura 6.21 – Variação temporal do nível de água no reservatório BR2.

Com os resultados apresentados nesse Capítulo pode-se concluir que o potencial da interface computacional OTIMIZE com vistas à eficiência energética se traduz, resumidamente, nos seguintes aspectos:

- 1) apresenta ao usuário uma combinação de bombas e válvulas que resulta num custo de energia elétrica próximo do ótimo global para um ciclo operacional de 24 horas;
- 2) possibilita ao gestor do sistema a escolha da melhor combinação de estruturas tarifárias a ser implantadas nas unidades de consumo;
- 3) torna mais precisa o cálculo das demandas máximas medidas, facilitando a definição do nível da demanda contratada.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho explorou-se a viabilidade, a performance e os benefícios de usar o Algoritmo Genético Simples (AGS) acoplado ao simulador hidráulico EPANET2, como técnica de alcançar uma política factível de programação de bombas e válvulas, com um custo operacional mínimo ao longo de um horizonte operacional de 24 horas.

Considerou-se o problema como de minimização de uma função não-linear com objetivo único, representada pelos custos de demanda e consumo de energia elétrica, tratando as restrições inerentes ao sistema pelo Método das Penalidades. Como estudo de caso, a metodologia foi aplicada a um modelo de um sistema adutor real (sistema Marés) constituído de múltiplas estações de bombeamento e reservatórios.

O acoplamento dos módulos de otimização e de simulação propiciou a criação de uma interface computacional de fácil relação máquina-usuário, denominada OTIMIZE, escrita na linguagem *Visual Basic 6*, com características para ser assimilada pelos gestores dos sistemas de abastecimento de água, como forma de combater o desperdício de energia elétrica, sem comprometer a qualidade e a produtividade do sistema.

7.1 – Conclusões

As simulações realizadas e apresentadas neste trabalho mostram a viabilidade de sua aplicação no setor de engenharia das empresas concessionárias de água, porquanto os resultados alcançados se amoldam aos procedimentos normais das regras de operação rotineiras, não apresentando, portanto, comportamentos que pudessem inviabilizar sua materialização no sistema adutor estudado. A rotina criada demonstrou ser eficiente como ferramenta de auxílio para tomada de decisão apresentando ao usuário, de forma simples, regra de operação otimizada de bombas e válvulas a cada

hora do ciclo de trabalho. Os planejamentos propostos para diversas aplicações do modelo, quando submetidas ao EPANET2, revelaram-se como simulações válidas, comprovando a robustez da técnica empregada e a sua adaptabilidade aos sistemas de produção de água para abastecimento que contenham vários reservatórios e tipos de bombas com possibilidade de trabalharem combinadas.

As funções de penalidade escolhidas para representar as restrições físicas e operacionais mostraram-se importantes e bem ajustadas para o êxito do modelo, ajudando na sua boa funcionalidade para alcançar os objetivos desejados. No processo de busca da solução de menor custo o Algoritmo Genético não conseguiu atender a totalidade das restrições impostas ao modelo, embora as violações ocorressem em grau e quantidade toleráveis, podendo algumas delas serem contornadas, no curso da operação, pela ação do operador através de manobras de válvulas. Apenas a recuperação do nível de água inicial em todos os reservatórios se mostrou de difícil atendimento, devido a migração de água de um reservatório para outro em algumas horas do dia, conforme discussão apresentada no Capítulo 6 deste trabalho.

Do ponto de vista computacional, o tempo de 30 minutos dispensado ao modelo para dar a conhecer a melhor combinação de genes mostrou-se suficiente para o processamento atingir a convergência da função de aptidão criada. Mostrou-se que num tempo de 22 minutos já atinge um nível de estabilidade capaz de produzir soluções factíveis, podendo ter esse valor reduzido se um equipamento tecnologicamente mais avançado puder ser empregado. O bom êxito desse baixo tempo computacional e do agendamento resultante deve ser creditado a eficiência do simulador EPANET2, através das suas funções do *Toolkit*, que corresponderam satisfatoriamente aos vários cenários a que o sistema hidráulico foi submetido nas milhares de proposições sugeridas pelo Algoritmo Genético. Esse módulo auxiliar do problema de otimização demonstrou ser um elemento crítico na velocidade do processo de convergência alcançada.

A qualidade da resposta do AG mostrou-se fortemente influenciada pelos valores dos coeficientes de penalidade aplicados às restrições do sistema, podendo produzir soluções inviáveis em termos operativos se valores inadequados forem levados a efeito. A análise de sensibilidade aplicada mostrou-se suficiente para produzir a convergência do algoritmo. Para estudos que se busque solução mais próxima do ponto ótimo, outras metodologias deverão ser consideradas para identificar um melhor balanceamento entre os coeficientes de penalidades.

A boa performance da programação matemática empregada para um sistema de porte intermediário (192 *bits*), qualifica a metodologia para uso em sistemas de maior escala, onde mais variáveis de decisão possam ser incorporadas ao problema de otimização. Para sistemas de elevada complexidade, a possibilidade do modelo encontrar uma solução ótima pode tornar-se computacionalmente impraticável, a menos que se introduzam melhoramentos no algoritmo genético simples na busca de uma maior eficiência na taxa de convergência ou se promova o aumento do intervalo de discretização de tempo para valores inteiros superiores a 1 hora.

Complementando o estudo de otimização, objetivo principal desse trabalho, a interface computacional, OTIMIZE, mostrou-se eficiente, também, na definição da escolha da melhor estrutura tarifária a ser aplicada a cada centro de consumo, fato que aumenta a sua importância na busca da eficiência energética do sistema estudado. A associação de regras de operação otimizadas com regimes tarifários adequados, redundou em uma economia de 21,73% nos custos com energia elétrica, considerando, apenas, a parcela de consumo de duas unidades estudadas.

Desta forma, concluímos pelo sucesso da aplicabilidade dos Algoritmos Genéticos como ferramenta de otimização de políticas operacionais em sistemas adutores completos com vistas à redução do consumo de energia elétrica. A praticidade e a confiabilidade da metodologia abordada na investigação podem ser traduzidas como um avanço tecnológico na área de abastecimento de água, ao propor modificações nos padrões tradicionais de gerenciamento operacional com significativa redução dos custos com energia elétrica.

7.2 – Recomendações

Como trabalhos futuros utilizando essa linha de pesquisa, seria importante realizar as seguintes pesquisas no sistema adutor estudado:

1) estudar a otimização energética do sistema pela introdução de inversores de frequência como ferramenta de controle das vazões de bombeamento;

2) ampliar a escala do modelo pela introdução de válvulas borboleta na entrada de cada sub-sistema e incorporação da elevatória do reservatório AR1 compondo o conjunto de variáveis de decisão;

3) fazer um re-estudo do problema utilizando técnicas de otimização multi-objetivo, incorporando uma função de custo de manutenção de bombas mais realista como um dos objetivos a serem minimizados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, R.; BARBOSA, P. S. F. - Efeito da Reservação Inicial Sobre o Desempenho Operacional de Sistemas de Abastecimento de Água. In: SEMINÁRIO - Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água: O Estado da Arte e Questões Avançadas, 2002, João Pessoa-PB, Brasil. Anais do II SEREA, CD-ROM.
- ALONSO, J. M.; ALVARRUIZ, F.; GUERRERO, D.; HERNÁNDEZ, V.; RUIZ, P. A.; VIDAL, A. M.; MARTÍNEZ, J. V.; ULANICKI, B. - Parallel Computing in Water Network Analysis and Leakage Minimization. Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 126, N^o4, p.251-260, 2000.
- BARBOSA, J. M. S. G. - Simulação da Operação de Bombas em Sistemas de Abastecimento de Água. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande - PB, 2001.
- BARCELLOS, J. C. - Algoritmos Genéticos Adaptativos: Um Estudo Comparativo. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo-USP, São Paulo, 2000.
- BHAVE, P. R. - Calibrating Water Distribution Network Models. Journal of Environmental Engineering Division, Vol. 114, N^o1, p.120-136, 1988
- BRAILEY, D; JACOBS, A. - Energy Management in the Water Works Industry. Journal of the New England Water Works Association, Vol. 103, N^o2, p.97-108, 1980.
- BRASILEIRO, E. V. - Um Algoritmo Genético para Otimização do Controle de Redes de Escoamento de Petróleo. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Paraíba, 2005.
- BREE JR , D. W.; RAO, H. S. - Extended Period Simulation of Water Systems – Part A. Journal of the Hydraulics Division, Vol. 126, N^o4, p.251-260, 1977.
- CALIMAN, R. O.; REIS, L. F. R.; SILVA, F. G. B.; PORTO, R. M.; CHAUDHRY, F. H. - Determinação dos Parâmetros do Modelo Pressão x Vazamento para um Sub-Sector da Cidade de São Carlos, SP, com a Utilização de Algoritmos Genéticos. In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2001, Aracajú - SE. Anais do XIV SBRH, CD-ROM.
- CARRIJO, I. B. - Extração de Regras Operacionais Ótimas de Sistemas de Distribuição de Água Através de Algoritmos Genéticos Multiobjetivo e Aprendizado de Máquina. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo - USP - EESC, São Paulo, 2004.
- CHEUNG, P. B. - Investigação dos Métodos Clássicos de Calibração de Redes Hidráulicas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS, Campo Grande, 2001.

- CHEUNG, P. B – Análise de Reabilitação de Redes de Distribuição de Água de Abastecimento via Algoritmos Genéticos Multiobjetivo. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo- USP - EESC , São Paulo, 2004.
- COHEN, G. – Optimal Control of Water Supply Networks, Chapter 8 in Optimization and Control of Dynamic Operational Research Models, Vol. 4, ed., North-Holland, Amsterdam, p.251-276, 1982.
- DANDY, G. C.; SIMPSON, A. R.; MURPHY, L. J. - An Improved Genetic Algorithm for Pipe Network Optimization. *Water Resources Research*, Vol. 32, N^o2, p.449-458, 1996.
- ELETROBRÁS/PROCEL – Manual de Tarifação da Energia Elétrica, 2002.
- GOLDBERG, D. E. – Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley, Reading, Mass, 1989.
- GOLDBERG, D. E.; KUO, C. H. - Genetic Algorithms in Pipeline Optimization. *Journal of Computing in Civil Engineering*. Vol. 1, N^o2, p.128-141, 1987.
- GOLDMAN, F. E.; MAYS, L. W. – The Application of Simulated Annealing to the Optimal Operation of Water Systems. ASCE Conference Proceedings. 29th Annual Water Resources Planning and Management Conference. Erin M. Wilson - Editor, June 6–9, 1999, Tempe, Arizona, USA.
- GOMES, H. P. – Sistemas de Abastecimento de Água. 1^a edição. João Pessoa: Editora Universitária - UFPB, 2002. 192p.
- GOULTER, I. C. - Systems Analysis in Water-Distribution Network Design from Theory to Practice. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 118, N^o3, p.238-248, 1992.
- HALHAL, D., WALTERS, G. A., OUZAR, D., AND SAVIC, D. A. – Water Network Rehabilitation With a Structured Messy Genetic Algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 123, N^o3, p.137-146, 1997.
- KARMELI, D.; GADISH, Y.; MEYERS, S. - Design of Optimal Water Distribution Systems. Proceeding American Society Civil Engineering. Vol. 94, N^o PL1, p.1-10, 1968.
- HOLLAND, J. H., - Adaptation in Natural and Artificial Systems. 183 pp., University Michigan Press, Ann Arbor, 1975.
- LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL – LNEC. Departamento de Hidráulica e Ambiente. <http://www.dha.lnec.pt/nes/epanet/>, 2000.
- LANNUZEL, P.; ORTOLANO, L. – Evaluation of Heuristic Program for Scheduling Treatment Plant Pumps. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 115, N^o4, p.457- 471, 1989.

- LANSEY, K. E.; AWUMAH, K., Optimal Pump Operations Considering Pump Switches. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 120, N^o1, p. 17-35, 1994.
- LANSEY, K. E., DUAN, N., MAYS, L. W., AND TUNG, Y. - Water Distribution System Design Under Uncertainties. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 115, N^o5, p.630-645, 1989.
- LANSEY, K. E.; MAYS, L. W. - Optimization Model for Water Distribution System Design. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 115, N^o10, p. 1401-1418, 1989.
- LEITE, D.U. - Panorama do uso de energia elétrica na CAGEPA, Relatório Técnico, p.1-32, 2003.
- LEÓN, C.; MARTÍN, S; ELENA, J. M.; LUQUE, J. – Explore-Hybrid Expert System for Water Networks Management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 126, N^o2, p.65-74, 2000.
- LIPPAI, I.; HEANEY, J. P.; LAGUNA, M. – Robust Water System Design With Commercial Intelligent Search Optimizers. *Journal of Computing in Civil Engineering*. Vol. 13, N^o3, p.135-143, 1999.
- LÓPEZ-IBÁÑEZ, M.; PRASAD, T. D.; PAECHTER, B. - Optimal Pump Scheduling: Representation and Multiple Objectives. *Proceedings of the Eighth International Conference on Computing and Control for the Water Industry*, Vol. 1, p. 117-122, University of Exeter, UK, 2005.
- LÜCKEN, C.; BARÁN, B.; SOTELO, A. – Pump Scheduling Optimization Using Asynchronous Parallel Evolutionary Algorithms. *Clei Electronic Journal*, Vol. 7, N^o2, 20p, 2004. <http://www.clei.cl/cleiej/papers/v7i2p2.pdf>
- LÜCKEN, C.; HERMOSILLA, A.; BARÁN, B. – Algoritmos Evolutivos para Optimización Multiobjetivo: Um Estudo Comparativo em un Ambiente Paralelo Assíncrono. Congresso Argentino de Ciências de la Computación. CACIC'2004. Bs. Aires – Argentina <http://www.cnc.una.py/invest/paper2/lucCACIC.pdf>.
- MACINTYRE, A. J. – Bombas e Instalações de Bombeamento. 2^a edição. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois S.A., 1987. 782p.
- MACKLE, G., SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. – Application of Genetic Algorithms to Pump Scheduling for Water Supply. *Proc., IEEE GALEZIA Conf.*, p.400-405, 1995.
- MINISTÉRIO DAS CIDADES - <http://www.cidades.gov.br/index.php?option=content&task=view&id=195&Itemid=0>
- ORMSBEE, L. E.; LANSEY, K. E. - Optimal Control of Water Supply Pumping Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 120, N^o2, p.237-252, 1994.
- ORMSBEE, L. E.; WOOD, D. J. - Explicit Pipe Network Calibration. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 112, N^o2, p.166-182, 1986.

- PEDROSA FILHO, L.; GOMES, H. P.; REY, P. L. I. - In: SEMINÁRIO – Planificación, Proyecto y Operación de Sistemas de Abastecimiento de Agua, 2005, Valência, Espanha. Anais do V SEREA, CD-ROM.
- PIZZO, H. S.; LUVIZOTTO JR, E. – Calibração de Modelos de Distribuição de Água Através do Algoritmo de Nelder-Mead. 21^o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária, CD-ROM, João Pessoa, 2001.
- PORTO, R. M. – Hidráulica Básica. EESC/USP, Projeto REENGE, São Carlos, 540p, 1998.
- PROCEL – Eficiência Energética nos Sistemas de Saneamento – Guia Técnico. 76p. 1998.
- PROCEL SANEAR - Programa Nacional de Conservação de Energia no Saneamento Ambiental. 2006/2007
- REY, P. L. I.; SOLANO, F. J. M.; MIQUEL, V. S. F.; GARCIA, R. P. – Algoritmo Genético Modificado Para Diseño de Redes de Abastecimiento de Água. *Seminário: Combate ao Desperdício de Água e Energia em Saneamento*. João Pessoa/Brasil, CD-ROM, 2004.
- RIBEIRO, G. P. - Custos de produção de águas subterrâneas com operação otimizada via algoritmos genéticos para o abastecimento urbano de Araraquara/SP. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo - USP - EESC, São Paulo, 2000.
- RIGHETTO, A. M. – Calibração de Modelo Hidráulico de Rede de Distribuição de Água. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Vol. 6, N^o3, p.33-44, 2001.
- RIGHETTO, A. M. – Operação Ótima de Sistema Urbano de Distribuição de Água. *Seminário: Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água. O Estado da Arte e Questões Avançadas*. João Pessoa/Brasil, CD-ROM, 2002.
- ROSSMAN, L. – Epanet2 Programmer's Toolkit. Water Supply and Water Resources Division. U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati, USA., 2000. <http://www.epa.gov/ORD/NRMRL/wswrd/epanet.html>
- SAKARYA, B. A.; MAYS, L. W. – Optimal Operation of Water Distribution Pumps Considering Water Quality. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 126, N^o4, p. 210 -220, 2000.
- SCHOENAUER, M.; MIRCHALEWICZ, Z. - (1996). 'Evolutionary Computation at the Edge of Feasibility.' In W. Ebeling & H.-M. Voigt (Eds.), *Proceeding of the Fourth Conference on Parallel Problem Solving from Nature*, Berlin: Springer-Verlag, (1996).
- SIMPSON, A. R.; DANDY, G. C.; MURPHY, L. J. – Genetic Algorithms Compared to Other Techniques for Pipe Optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 120, N^o4, p. 423-443, 1994.

- SOTELO, A.; BARÁN, B.; VON LÜCKEN, C. – Pump Sheduling Optimization Using Parallel Evolutionary Algorithms. *Clei Elcetronic Journal*, Vol. 7 N⁰2, Paper 2, 2004.
- SOTELO, A.; MASULADO, J.; DOLDÁN, P.; BARÁN, B. – Algoritmos Evolutivos Multiobjetivos Combinados para la Optimización de la Programación de Bombeo em Sistemas de Suministro de Agua. Jornadas de Informática y Telecomunicaciones - Conferencia de Informática y Tecnología Aplicada (JIT-CITA 2001). Asunción-Paraguay 2001.
- SU, Y. C.; MAYS, L. W.; DUAN, N.; LANSEY, K. E. – Reliability-Based Optimization Model for Water Distribution System. *Journal Hydraulic Engineering*, Vol. 114, N⁰12, p. 1539-1556, 1987.
- TODINI, E.; PILATI, S. - A Gradient Method for the Analysis of Pipe Networks. *Intenational Conference Applications for Water Supply and Distribution*, Leicester Polytechnic, UK N⁰. 9, p.8-10, 1987.
- TSUTIYA, M. T. – Redução do Custo de Energia Elétrica em Sistemas de Abastecimento de Água. ABES, 2001. 185p.
- TSUTIYA, M. T. - Abastecimento de Água. 2^a edição. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária - USP, 2004. 643p.
- VAN VELDHUIZEN, D. A.; ZYDALLIS, J. B.; LAMONT, G. B. – Issues in Parallelizing Multiobjective Evolutionary Algorithms for Real World Applications. Symposium on Applied Computing. Proceedings of the 2002 ACM Symposium on Applied Computing, 2002.
- WALL, M. - Galib: A C++ Library of Genetic Algorithm Components. Mechanical Engineering Department, Massachussets Institute of Tecnology, 1996.
- WALSKY, T. M. - Technique for Calibrating Network Models. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 109, N⁰4, p. 360-372, 1983.
- WALSKY, T. M. - Tips for Saving Energy in Pumping Operations. *Journal of American Water Works Association*, Vol. 85, N⁰7, p.49-53, 1993.
- WOOD, D. J.; RAYES, A. G., - Reliability of Algorithms for Pipe Network Analysis. *Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 107, N⁰ HY10, p. 1145-1161, NY, 1981.
- WU, Y. Z.; BOULOS, P. F.; ORR, C. H.; RO, J. J. - Using Genetic Algorithms to Rehabilitate Systems. *Journal of American Water Works Association*, Vol. 93, N⁰11, p.74-85, 2001.
- WU, Y. Z.; SMPSON, A. R. - Competent Genetic-Evolutionary Optimization of Water Distribution Systems - *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 15, N⁰ 2, p.89-101, 2001.
- WU, Y. Z.; SMPSON, A. R. - A Self-Adaptive Boundary Search Genetic Algorithm and Its Application to Water Distribution Systems. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 40, N⁰ 2, p.191-203, 2002.

ZYL, J. V; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. - Operational Optimization of Water Distribution Systems Using a Hybrid Genetic Algorithm Method. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 130, N^o2, p.160-170, 2004.

APÊNDICE

CLASSIFICAÇÃO DOS CONSUMIDORES

No Brasil, as tarifas de energia elétrica podem ser classificadas quanto ao nível de tensão de atendimento ao consumidor e quanto à estruturação tarifária, segundo Resolução 456 da ANEEL.

Quanto aos níveis de tensão, os consumidores são classificados de acordo com o Quadro abaixo. No Grupo A, a tarifa é binômia, pois a cobrança é feita em termos de consumo de energia ativa (kWh) e da demanda faturável (kW).

Grupo A - Alta Tensão	Grupo B - Baixa Tensão
A1 - 230 kV ou mais A2 - 88 a 138 kV A3 - 69 kV A3a - 30 a 44 kV A4 - 23 a 25 kV AS - Subterrâneo	B1 - Residencial; B1 - Residencial Baixa Renda; B2 - Rural; B3 - Não Residencial Nem Rural; e B4 - Iluminação Pública.

Fonte: COPEL

CONCEITOS

Demanda – é a potência que o sistema elétrico da Concessionária deve dispor para atender às instalações elétricas da unidade consumidora.

Potência de Demanda – média das potências elétricas ativas solicitadas ao sistema elétrico pela parcela da carga instalada e em operação na unidade consumidora, durante um intervalo de tempo especificado. É expressa em kW.

Demanda Contratada – é a demanda de potência ativa continuamente disponibilizada pela Concessionária, no ponto de entrega, conforme valor e período fixado no contrato de fornecimento.

No segundo Grupo, a cobrança ao consumidor pode ser feita em dois sistemas: o convencional e o horo-sazonal.

A tarifação convencional está estruturada para aplicação de um preço único de demanda de potência e consumo de energia elétrica, independentemente dos períodos do ano e das horas de utilização do dia.

A tarifação horo-sazonal tem preço diferenciado de acordo com a utilização da hora do dia (ponta e fora de ponta), e durante os períodos do ano (úmido e seco). A

diferenciação de preços sinaliza a maior ou menor disponibilidade do sistema elétrico. Essa tarificação é dividida em AZUL e VERDE.

Tarificação horo-sazonal AZUL – Tarifa estruturada para aplicação de preços diferenciados para consumo de energia e demanda de potência de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano. Compulsória para aqueles atendidos em tensão igual ou superior a 69 kV.

Tarificação horo-sazonal VERDE – Tarifa estruturada para aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano, bem como de uma única de demanda de potência.

Divisão do Ano:

- Período Seco: compreende o intervalo situado entre os meses de maio a novembro de cada ano (sete meses).
- Período Úmido: compreende o intervalo situado entre os meses de dezembro de um ano a abril do ano seguinte (cinco meses).

Divisão do Dia:

- Período de Ponta: período de tempo de 3 horas consecutivas, definido pela Concessionária, situado diariamente no intervalo compreendido entre 17 e 22 horas, exceção feita aos sábados, domingos e feriados.
- Período Fora de Ponta: composto pelas 21 horas diárias complementares ao horário de ponta.
-

FATURAÇÃO

- Tarificação Convencional:

Parcela de consumo= tarifa de consumo x consumo medido

Parcela de demanda= tarifa de demanda x demanda contratada

Nos casos em que a demanda medida ultrapasse mais de 10% a demanda contratada, o consumidor paga uma parcela de ultrapassagem, calculada da seguinte forma:

Parcela de ultrapassagem= tarifa de ultrapassagem x (demanda medida – demanda contratada)

- Tarificação Horo-Sazonal Verde:

A fatura dessa modalidade é composta de duas parcelas referentes ao consumo (na ponta e fora dela), demanda e ultrapassagem.

Parcela de consumo= tarifa de consumo na ponta x consumo medido na ponta +
tarifa de consumo fora de ponta x consumo medido fora
de ponta

Parcela de demanda= tarifa de demanda x demanda contratada

Parcela de ultrapassagem= tarifa de ultrapassagem x (demanda medida –
demanda contratada).

- Tarifação Horo-Sazonal Azul:

A fatura dessa modalidade é composta de duas parcelas referentes ao consumo (na ponta e fora dela), duas parcelas referentes a demanda (na ponta e fora dela) e ultrapassagem.

Parcela de consumo= tarifa de consumo na ponta x consumo medido na ponta +
tarifa de consumo fora de ponta x consumo medido fora
de ponta.

Parcela de demanda= tarifa de demanda na ponta x demanda contratada na ponta
+ tarifa de demanda fora de ponta x demanda contratada
fora de ponta

A parcela de ultrapassagem é cobrada quando a demanda medida ultrapassa a demanda contratada em 5% para os sub-grupos A1, A2 e A3, e de 10% para os demais grupos.

Parcela de ultrapassagem= tarifa de ultrapassagem na ponta x (demanda medida
na ponta – demanda contratada na ponta) + tarifa de
ultrapassagem fora de ponta x (demanda medida
fora de ponta – demanda contratada fora de ponta).