

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**OTIMIZAÇÃO OPERACIONAL DE SISTEMAS DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA COM OBJETIVO DE REDUÇÃO DE
CUSTO DE ENERGIA ELÉTRICA**

DIOGO VALADÃO DE BRITO GEBRIM

ORIENTADOR: SERGIO KOIDE

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E
RECURSOS HÍDRICOS**

**PUBLICAÇÃO: 157/2013
BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO – 2013**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**OTIMIZAÇÃO OPERACIONAL DE SISTEMAS DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA COM OBJETIVO DE REDUÇÃO DE
CUSTO DE ENERGIA ELÉTRICA**

DIOGO VALADÃO DE BRITO GEBRIM

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS HÍDRICOS.**

APROVADA POR:

**Prof. Sergio Koide, PhD (ENC-UnB)
(ORIENTADOR)**

**Prof. Dirceu Silveira Reis Junior, PhD (ENC-UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**Prof. Alexandre Kepler Soares, Doutor (UFG)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

BRASÍLIA-DF, 13 DE DEZEMBRO DE 2013.

FICHA CATALOGRÁFICA

GEBRIM, DIOGO VALADÃO DE BRITO

Otimização Operacional de Sistemas de Abastecimento de Água com Objetivo de Redução de Custo de Energia Elétrica [Distrito Federal] 2013.

xiv, 120p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2013).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Abastecimento de Água

2. Otimização Operacional

3. Algoritmos Genéticos

4. EPANET

I. ENC/FT/UnB

II. Título (Série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Gebrim, D. V. B. (2013). **Otimização Operacional de Sistemas de Abastecimento de Água com Objetivo de Redução de Custo de Energia Elétrica**. Dissertação de Mestrado, Publicação PTARH.DM-157/2013, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 120p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Diogo Valadão de Brito Gebrim

TÍTULO: Otimização Operacional de Sistemas de Abastecimento de Água com Objetivo de Redução de Custo de Energia Elétrica.

GRAU: Mestre em Ciências

ANO: 2013

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Diogo Valadão de Brito Gebrim

SQSW 305, Bloco "B", Apt. 302, Sudoeste

CEP.: 70673-422 – Brasília / DF – Brasil

*Para minha querida Luana,
pelo apoio e compreensão.*

*À pequena Sofia,
pela motivação para seguir em frente.*

*Aos meus pais, Eduardo e Telca,
pela dedicação dispensada à minha formação pessoal.*

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Sergio Koide, por todo conhecimento repassado, pela paciência e pela dedicação que possibilitou o desenvolvimento dessa dissertação.

À Superintendente de produção de água da Caesb, Tânia Baylão, pela confiança depositada, pelo apoio irrestrito e por ter acreditado nesse projeto.

Ao colega de trabalho e amigo, Luiz Itonaga, pelo entusiasmo demonstrado em relação ao trabalho, pelas ideias compartilhadas, pelo incentivo, discussões e contribuições valorosas.

Aos José Bandeira, Eleison e Lúcio, pelo apoio inestimável ao desenvolvimento do código computacional utilizado no trabalho.

Aos professores do PTARH, Oscar Cordeiro Netto, Cristina Brandão, Marco Antônio Souza, Dirceu Reis, Conceição Alves, Yovanka Pérez, Carlos Lima, Lenora Gomes, Ariuska Carla, Ricardo Minoti, João Bosco e Nestor Campana, pelos conhecimentos transmitidos, pelas dúvidas sanadas e pela contribuição à formação técnica e humana obtida nesse período.

Aos colegas de mestrado Leonardo Piau, Maria Elisa, Olga Caminha e Diana Jimena, pela ajuda e companheirismo.

Ao amigo Elton Gonçalves, pelo incentivo.

Aos colegas da Gerência de Planejamento e Controle Operacional da Caesb, pela ajuda no bom andamento dos trabalhos durante todo esse período em que precisei me dedicar ao mestrado.

À direção da Caesb, por possibilitar a realização desse objetivo pessoal e profissional.

RESUMO

OTIMIZAÇÃO OPERACIONAL DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA COM OBJETIVO DE REDUÇÃO DE CUSTO DE ENERGIA ELÉTRICA

Autor: Diogo Valadão de Brito Gebrim

Orientador: Sergio Koide

Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos

Brasília, novembro de 2013

O trabalho desenvolveu um modelo de otimização, com foco na redução dos custos de energia elétrica, para aplicação no planejamento operacional de sistemas de abastecimento de água. O modelo foi aplicado ao caso do sistema de abastecimento do Rio Descoberto, no Distrito Federal, que é de um sistema de grande porte, com capacidade de produção de 5.300 l/s, onde foram considerados 32 elementos, entre bombas e válvulas, que podem ser comandados para que o abastecimento seja realizado com sucesso. O modelo utiliza o simulador EPANET para representação do comportamento hidráulico e a técnica de algoritmos genéticos para a busca da solução otimizada. Foi desenvolvido um código computacional em linguagem C++, que implementa a biblioteca de algoritmos genéticos apresentado por Wall (1996), em conjunto com as rotinas da *Tollkit Library* do EPANET, de forma a testar diversas soluções de operação e encontrar a que produz os melhores resultados. Cada solução encontrada foi avaliada por uma função aptidão, que considerou, além do custo de energia, o atendimento às restrições operacionais expressas em termos de penalidade. Para a demanda de água foram adotados valores médios mensais que representaram o comportamento característico do sistema estudado para um período de 24h. Apesar da dimensão e da complexidade do sistema de abastecimento, os resultados demonstraram que o modelo de otimização é capaz de encontrar regras operacionais condizentes com as adotadas pelo Centro de Controle Operacional da CAESB, com redução do custo de energia, porém com um número excessivo de acionamentos de bombas e válvulas. A otimização consumiu um tempo computacional elevado, o que inviabilizaria a aplicação do modelo na operação em tempo real. A qualidade dos resultados obtidos indica que existe viabilidade de aplicação do modelo no auxílio à operação de sistemas de abastecimento, porém há necessidade de ajustes na abordagem para que se reduza o número de acionamentos de bombas e válvulas.

Palavras-chaves: abastecimento de água, otimização operacional, algoritmos genéticos.

ABSTRACT

OPERATIONAL OPTIMIZATION OF WATER SUPPLY SYSTEMS WITH PURPOSE OF REDUCING THE COST OF ELECTRICITY

Author: Diogo Valadão de Brito Gebrim

Supervisor: Sergio Koide

Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos

Brasília, November of 2013

This work presents an optimization model with a focus on reducing energy costs for application in operational management in the Descoberto river water supply system in Federal District – Brazil. It is a large water supply system, with production capacity of $5.3 \text{ m}^3/\text{s}$, in which were considered 32 elements, including pumps and valves, that can be triggered in order to successfully accomplish the water supply. The optimization model uses the EPANET simulator for representation of the hydraulic behavior and genetic algorithms to minimize pumping costs. A C++ computer code was developed to test the alternatives and find a near-optimal solution. Each solution was evaluated by a fitness function that considered, in addition to energy cost, the compliance with operational constraints expressed in terms of penalties. The water demand in the network was represented by the average behavior of the system studied for a period of 24h. Despite the water supply system size and complexity, the results show that the optimization model is able to find operating rules compatible with the rules adopted by the Operational Control Center of CAESB, with energy cost reduction, but leading to excessive pump/valve switches. Large computation time was required by the optimization which impair the application of the model for real time operation. The quality of the results obtained indicates that there is feasibility in applying the model to assist the operational planning, but there is need to improve the model to reduce the pumps and valves switches.

Keyword: water supply systems, operational optimization, genetic algorithm

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	1
2 - OBJETIVOS	4
3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 - PLANEJAMENTO OPERACIONAL	5
3.2 - CONTROLE OPERACIONAL	6
3.3 - MODELOS DE SIMULAÇÃO HIDRÁULICA	8
3.3.1 - Principais elementos e informações dos modelos hidráulicos	11
3.3.2 - Calibração	12
3.4 - OTIMIZAÇÃO OPERACIONAL DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	13
3.4.1 - Regras operacionais de longo, médio e curto prazo	13
3.4.2 - Algoritmos genéticos	15
3.4.3 - Técnicas de otimização e de representação do sistema hidráulico	19
4 - METODOLOGIA	28
4.1 - MODELO HIDRÁULICO	28
4.1.1 - Descrição do sistema de abastecimento	28
4.1.2 - Construção e adequação do modelo hidráulico	37
4.1.3 - Calibração	39
4.2 - OTIMIZAÇÃO	41
4.2.1 - Delimitação do problema e definição das variáveis de decisão	42
4.2.2 - Função aptidão	45
4.2.3 - Desenvolvimento do código computacional	55
4.2.4 - Definição dos operadores genéticos e parâmetros do problema	58
4.3 - VERIFICAÇÃO DA SOLUÇÃO OTIMIZADA	60
5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
5.1 - CALIBRAÇÃO	61
5.2 - DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS – PRIMEIRA ETAPA	62
5.2.1 - Critério de parada e tamanho da população	62
5.2.2 - Coeficientes de penalidade	63
5.2.3 - Resultados preliminares da primeira etapa de avaliação	64
5.2.4 - Análise de sensibilidade dos coeficientes λ_4 -g3 e λ_4 -g4	66
5.3 - DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS – SEGUNDA ETAPA	69
5.3.1 - Níveis iniciais dos reservatórios	69
5.3.2 - Tipo de seleção	70
5.3.3 - Demais parâmetros	70
5.4 - COMPARAÇÃO ENTRE OPERAÇÃO REAL E OPERAÇÃO OTIMIZADA	71
5.4.1 - Comportamento dos reservatórios	72
5.4.2 - Quantidade de acionamentos	75
5.4.3 - Energia elétrica	78
5.5 - TEMPO COMPUTACIONAL	79

6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	82
6.1 - RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85

APÊNDICES

Apêndice A - Dados utilizados na construção do modelo hidráulico	90
A.1 - Nós de consumo.....	90
A.2 - Padrões de consumo normalizados	91
A.3 - Elevatórias e Bombas.....	92
A.4 - Válvulas	93
A.5 - Reservatórios	93
Apêndice B - Código do modelo otimizador.....	94
Apêndice C - Dados da calibração do modelo HIDRÁULICO.....	114
C.1 - Relatório de estatísticas de calibração.....	114
C.2 - Gráfico de correlação entre valores observados e simulados	115
C.3 - Gráficos dos níveis de reservatórios ao final do processo de calibração	115
Apêndice D - Demais resultados da análise de sensibilidade	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Código das unidades operacionais do sistema Descoberto	33
Tabela 4.2 - Tarifa de energia elétrica por elevatória analisada	35
Tabela 4.3 - Variáveis de decisão do problema	43
Tabela 4.4 - Divisão dos equipamentos para aplicação da Penalidade 4	53
Tabela 4.5 - Parâmetros avaliados na segunda etapa	59
Tabela 5.1 - Resumo dos valores envolvidos no processo de calibração	62
Tabela 5.2 - Valores de critério de parada e tamanho de população adotados	63
Tabela 5.3 - Cenários de aplicação dos coeficientes das penalidades	64
Tabela 5.4 - Operadores e parâmetros genéticos adotados na primeira etapa.....	65
Tabela 5.5 - Resultados obtidos na primeira etapa de definição dos parâmetros	65
Tabela 5.6 - Valores adotados para os coeficientes de penalidade da Otimização 5	67
Tabela 5.7 - Resultado da análise de sensibilidade dos coeficientes da Penalidade 4 na Otimização 5	67
Tabela 5.8 - Valores adotados para os coeficientes de penalidade da Otimização 14	67
Tabela 5.9 - Resultado da análise de sensibilidade dos coeficientes da Penalidade 4 na Otimização 14	67
Tabela 5.10 - Parâmetros definidos na primeira etapa	68
Tabela 5.11 - Resultado da análise de sensibilidade dos níveis iniciais.....	69
Tabela 5.12 - Resultado da análise de sensibilidade dos tipos de seleção	70
Tabela 5.13 - Comparação entre Operação de Referência e Operação Otimizada	71
Tabela 5.14 - Comparação dos custos de energia	79
Tabela 5.15 - Duração do processo de simulação.....	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Processo básico de funcionamento dos AGs	17
Figura 3.2 - Representação da solução por valores de tempo	18
Figura 3.3 - Representação da solução por valores absolutos de tempo com três acionamentos..	18
Figura 3.4 - Representação da solução por valores relativos de tempo com três acionamentos....	19
Figura 4.1 - Sistema de abastecimento do Descoberto mostrado sobre mapa do DF	30
Figura 4.2 - Sistema de abastecimento com a indicação das principais unidades.....	31
Figura 4.3 - Fluxograma de adução do sistema de abastecimento do Descoberto	32
Figura 4.4 - Representação de um nó de consumo ligado a um reservatório apoiado	38
Figura 4.5 - Vetor solução com três bombas, duas válvulas e período de otimização T	45
Figura 4.6 - Fluxograma do processo de otimização	56
Figura 5.1 - Evolução de função aptidão para os diferentes tipos de cruzamento	70
Figura 5.2 - Comportamento do nível do reservatório M Norte 1.....	72
Figura 5.3 - Comportamento do nível do reservatório de Ceilândia	73
Figura 5.4 - Comportamento do nível do reservatório Gama 2.....	73
Figura 5.5 - Comportamento do nível do reservatório M Norte 2.....	74
Figura 5.6 - Comportamento do nível do reservatório Recanto das Emas	74
Figura 5.7 - Comportamento do nível do reservatório Sítio do Gama	74
Figura 5.8 - Comportamento do nível do reservatório Samambaia 1	75
Figura 5.9 - Diagrama de acionamentos das bombas na operação de referência e na operação otimizada.....	77

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

AG	Algoritmo Genético
AMALGAM	<i>A Multialgorithm Genetically Adaptive Method</i>
AMS	<i>Adaptive Metropolis Search</i>
Apt F	Função Aptidão
ARIMA	<i>AutoRegressive Integrated Moving Average</i>
B	Número total de bombas
CAESB	Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
Cb	Custo total de energia elétrica gasto com bombeamento;
CC	Custo de consumo de energia elétrica
CD	Custo de demanda de energia elétrica
CECOP	Centro de Controle Operacional
CLP	Controlador Lógico Programável
C1	Variável booleana para aplicação da Penalidade 1
C2	Variável booleana para aplicação da Penalidade 2
C3	Variável booleana para aplicação da Penalidade 3
C4	Variável booleana para aplicação da Penalidade 4
C5	Variável booleana para aplicação da Penalidade 5
D	Quantidade de períodos tarifários do dia
DE	<i>Differential Evolution</i>
D_i	Demanda de água do nó de índice i
EAB	Elevatória de Água Bruta
EAT	Elevatória de Água Tratada
FO	Função Objetivo
G	Nó de consumo
GAlib	Biblioteca de algoritmos genético do MIT
G1	Grupo 1 de equipamentos
G2	Grupo 2 de equipamentos
G3	Grupo 3 de equipamentos
G4	Grupo 4 de equipamentos
H	Altura manométrica
MAE	<i>Mean Absolute Error</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
NA	Número de acionamentos
N_i	Nível de água do reservatório de índice i
$N_{i\max}$	Nível máximo de água do reservatório de índice i
$N_{i\text{ inicial}}$	Nível de água inicial do reservatório de índice i
$N_{i\text{ final}}$	Nível de água final do reservatório de índice i
NSGA-II	<i>Nondominated Sorting Genetic Algorithm II</i>

Otim	Otimização
P1	Penalidade 1
P2	Penalidade 2
P3	Penalidade 3
P4	Penalidade 4
P5	Penalidade 5
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
Q	Vazão
r	Coefficiente de Correlação
R	Quantidade total de reservatórios
Re	Número de Reynolds
RAP	Reservatório Apoiado
RNA	Redes Neurais Artificiais
Sabesp	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SCADA	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>
TC	Tarifa de consumo de energia elétrica
TC _{ponta}	Tarifa de consumo de energia elétrica no horário de ponta
TC _{fponta}	Tarifa de consumo de energia elétrica no horário fora de ponta
TCV	<i>Throttle Control Valves</i>
TD	Tarifa de demanda de energia elétrica
TD _{verde}	Tarifa de demanda de energia elétrica da modalidade tarifária verde
TD _{ponta}	Tarifa de demanda de energia elétrica no horário de ponta na modalidade tarifária azul
TD _{fponta}	Tarifa de demanda de energia elétrica no horário fora de ponta na modalidade tarifária azul
THS	Tarifa horo-sazonal
U	Total de unidades consumidoras (elevatórias) de energia;
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
V	Número total de válvulas;
Var	Variação
VCN	Válvula Controladora de Nível
Δt	Intervalo de tempo
ϵ	Rugosidade absoluta
ϵ/D	Rugosidade relativa
f	Fator de atrito
λ_1	Coefficiente da Penalidade 1
λ_2	Coefficiente da Penalidade 2
λ_3	Coefficiente da Penalidade 3
λ_5	Coefficiente da Penalidade 5

$\lambda_4\text{-g1}$	Coeficiente do Grupo 1 da Penalidade 4
$\lambda_4\text{-g2}$	Coeficiente do Grupo 2 da Penalidade 4
$\lambda_4\text{-g3}$	Coeficiente do Grupo 3 da Penalidade 4
$\lambda_4\text{-g4}$	Coeficiente do Grupo 4 da Penalidade 4
η	Rendimento de conjunto de bombeamento
γ	Peso específico da água

1 - INTRODUÇÃO

As empresas de saneamento do País têm se deparado cada vez mais com uma maior cobrança por eficiência da prestação de seus serviços. Em contraposição a um pensamento até pouco tempo predominante, que valorizava a expansão da cobertura de atendimento e exigia basicamente o cumprimento de padrões mínimos de continuidade e de qualidade da água fornecida, atualmente as empresas do setor se deparam com uma sociedade mais consciente e com nível de exigência mais elevado. A disponibilidade de informações, a conscientização ambiental e até mesmo a recente implantação de órgãos de regulação do setor, vêm gerando demandas por níveis de eficiência outrora ignorados e que de alguma forma deverão ser atendidas. Dentro desse novo cenário não há como postergar a necessidade de evolução nas rotinas de operação e, dentro destas, não há como ignorar o aspecto do consumo de energia elétrica, principalmente no que se refere aos sistemas de abastecimento de água.

A importância da energia elétrica nos sistemas de saneamento pode ser evidenciada pelos dados do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica para o saneamento (PROCEL SANEAR, 2011), que demonstram que pouco mais de 2,6% do consumo total do Brasil, que equivale a aproximadamente 10,2 bilhões de kWh/ano (projeção a partir do SNIS referência 2008), são utilizados por prestadores de serviços de água e esgotamento sanitário em todo o País. Dentre os serviços de saneamento, as atividades de abastecimento de água se destacam como grande consumidora de energia, em especial a adução de água por bombeamento. Estima-se que pelo menos 90% desses custos com energia elétrica devem-se às elevatórias dos sistemas de abastecimento de água (Tsutiya, 1989 *apud* Tsutiya, 2006).

Se considerarmos ainda que a crescente demanda por água, principalmente nos grandes centros urbanos, tem levado a necessidade de busca por fontes de abastecimento cada vez distantes, conclui-se que existe uma tendência de que os gastos com eletricidade aumentem.

Dentro dessa realidade, diversos trabalhos têm sido desenvolvidos na busca de soluções de otimização e melhoria da eficiência da operação de sistemas reais de abastecimento de água (Ormsbee *et al.*, 1989; Carrijo, 2004; Vicente, 2005; Ribeiro 2005; López-Ibáñez, 2009; Odan, 2013). Grande parte desses trabalhos se apoiam no uso de simuladores hidráulicos acoplados a modelos de otimização, que recebem informações atualizadas do sistema de abastecimento e geram as regras para a operação dos elementos de controle, como bombas e válvulas. Desse modo, a técnica busca, a partir do conhecimento das condições do sistema, traçar as regras de operação que melhor atendam aos objetivos propostos.

Normalmente o objetivo é minimizar o custo marginal de fornecimento de água, mantendo o funcionamento dentro das restrições físicas e operacionais, tal como garantir água suficiente nos reservatórios para atender as exigências dos consumidores.

Mackle *et al.* (1995) afirmam que estudos teóricos e aplicações práticas de regras operacionais otimizadas, voltadas à programação ótima de bombeamento em vários tipos de sistemas de abastecimento, sugerem que 10% do gasto total com energia poderiam ser economizados se métodos de otimização adequados fossem utilizados.

No entanto, no Brasil, a adoção de programas de uso eficiente da energia elétrica no setor de saneamento, apoiados por regras de operação otimizadas, ainda é incipiente. Raros são os sistemas que transmitem dados em tempo real e possibilitam a implantação de operações automáticas centralizadas dos processos de abastecimento. Também não é tarefa fácil encontrar situações em que as informações operacionais geradas em campo são transmitidas e armazenadas de forma adequada. Algumas tentativas têm sido feitas com o uso de simuladores hidráulicos para definição de regras operacionais otimizadas, porém, esse tipo de aplicação depende de uma boa infraestrutura de dados, o que também não é muito comum.

No Distrito Federal, a própria CAESB (Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal), que possui suas estruturas instaladas em uma área geográfica relativamente pequena e é comumente citada como referência nacional na prestação de serviços, não possui nenhum sistema com operação automática centralizada. A maioria dos sistemas dessa companhia são operados com controle centralizado e acionamentos remotos. Nesses casos, os acionamentos são em grande parte realizados por um centro de controle e transmitidos por telecomando para os equipamentos em campo.

Diante desse cenário, entende-se que existe um grande tema a ser explorado no estudo de técnicas de otimização de sistemas de abastecimento. Um melhor conhecimento do assunto poderá identificar oportunidades de melhoria para diversos operadores do País, contribuindo para desenvolver a eficiência energética dos sistemas operados e a prestação de seus serviços.

Assim, buscando desenvolver um modelo de otimização que contribua para a redução do consumo de energia elétrica, essa dissertação é apresentada em seis capítulos, incluindo este capítulo introdutório. Os demais capítulos que compõem o trabalho e os assuntos abordados em cada um deles são:

- Capítulo 2 - Apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho.
- Capítulo 3 - Apresenta uma fundamentação teórica e revisão bibliográfica sobre os aspectos de planejamento e controle operacional, modelagem hidráulica e otimização operacional. Trata questões relacionadas ao uso do programa de simulação hidráulica EPANET, incluindo aspectos de funcionamento, construção e calibração de modelos hidráulicos. Trata também da otimização operacional, abordando as

principais questões envolvidas e técnicas utilizadas. Faz, ainda, uma apresentação das principais características da técnica de otimização por algoritmos genéticos e, por fim, apresenta uma revisão de diversos trabalhos de otimização já publicados.

- Capítulo 4 - Descreve o sistema de abastecimento estudado e aborda os aspectos de construção e calibração do modelo hidráulico utilizado. Também trata do processo de otimização, delimitando o problema, descrevendo o modelo desenvolvido e apresentando o código computacional implementado. Por fim, descreve a metodologia adotada para avaliar a solução otimizada encontrada.
- Capítulo 5 - Primeiramente são apresentados os resultados do processo de calibração do modelo hidráulico e, em seguida, são abordados os resultados do modelo de otimização, incluindo a definição dos parâmetros envolvidos. Trata também dos resultados da operação otimizada, comparando a regra operacional encontrada pelo modelo otimizador com a regra adotada pelos operadores do sistema de abastecimento real.
- Capítulo 6 – Apresenta as principais conclusões e aborda os aspectos críticos encontrados. São sugeridos tópicos considerados relevantes e que podem ser abordados em estudos futuros.

2 - OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal desenvolver e testar um modelo de otimização que seja capaz de estabelecer regras operacionais que permitam reduzir o custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água dotados de bombeamento.

Os objetivos específicos são:

- Desenvolver um modelo de otimização aplicável ao sistema de abastecimento de água do Descoberto, capaz de definir regras operacionais que atendam à uma condição típica de funcionamento e que possa ser utilizado em situações de planejamento operacional de médio e longo prazo.
- Avaliar a aplicabilidade de modelos de otimização em sistemas de abastecimento reais, complexos e de grande porte, considerando a experiência prática de operadores como base de comparação, usando como estudo de caso o sistema Descoberto da CAESB.

3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo abordará os principais temas relacionados ao processo de desenvolvimento de um modelo de otimização operacional de um sistema de abastecimento de água. Com esse enfoque a revisão será segmentada da seguinte maneira:

- A operação dos sistemas de abastecimento de água, incluindo aspectos de planejamento e controle operacional;
- Modelos de simulação hidráulica, abordando problemas de construção e calibração desses modelos;
- Otimização operacional, onde será feita uma revisão de diversos trabalhos já realizados, abordando as técnicas de otimização adotadas, incluindo aspectos da técnica de otimização por algoritmos genéticos.

3.1 - PLANEJAMENTO OPERACIONAL

Um sistema de abastecimento de água é composto por diversas estruturas e equipamentos que se interligam e operam de forma conjunta para transportar água dentro de padrões de qualidade, do manancial até o usuário. Captações, adutoras, estações elevatórias, estações de tratamento, reservatórios e redes de distribuição devem funcionar de maneira integrada para que a população receba água de qualidade, com continuidade e dentro de limites de pressão admissíveis.

Para planejar a execução das tarefas inerentes à operação dos sistemas de abastecimento, as empresas operadoras normalmente contam com a participação de diversos profissionais, que recebem os dados de monitoramento e tentam prever as necessidades e ações futuras para que o abastecimento seja mantido em nível satisfatório.

Baseado no aspecto temporal das tarefas que devem ser executadas na operação de um sistema de abastecimento, Obrandovic e Lonsdale (1998) classificaram o planejamento das atividades operacionais em três níveis distintos de planejamento: longo, médio e curto prazo.

O planejamento de longo prazo é a atividade que dá suporte à definição de novos sistemas de abastecimento. Considera o uso de novas fontes e sua implantação costuma ser composta de ações que envolvem obras de engenharia de porte considerável. Deve ser integrado ao planejamento urbano, de forma a atender as demandas futuras nos momentos em que elas ocorrem, evitando a sobrecarga dos sistemas existentes e a ociosidade dos recém implantados. As informações utilizadas nesse tipo de análise são baseadas em dados de projeção populacional e valores referenciais de consumo per capita. Os dados normalmente são oriundos de planos diretores e utilizam como referência os horizontes finais de projeto.

O planejamento de médio prazo é a atividade que contempla basicamente a análise dos sistemas já em operação. Busca definir melhorias operacionais para o atendimento das demandas já existentes, ou mudanças operacionais para o atendimento dos incrementos de demanda a serem absorvidos nos sistemas já instalados. Envolve principalmente a análise das capacidades das estruturas já implantadas e, normalmente, propõe alterações nos contratos de energia elétrica, aumento nas capacidades de bombeamento e reservação. Sua execução pode contemplar algumas obras e adaptações, mas está fundamentado na melhoria do sistema já existente. Suas análises normalmente são feitas com base em padrões médios de demanda e de custos médios de operação e podem definir regras operacionais de nível estratégico.

O planejamento de curto prazo consiste basicamente na definição das regras operacionais que serão adotadas nas próximas horas ou nos próximos dias. Essa análise deve considerar as previsões futuras e as variações instantâneas de consumo. Deve ser capaz de reagir aos eventos de falhas no sistema de abastecimento. Suas análises devem ser feitas com base em dados instantâneos, fornecidos em tempo real, e as regras operacionais devem possibilitar aplicação imediata. A eficiência desse gerenciamento está intimamente ligada à forma de controle adotada no sistema, dependendo da estrutura de transmissão de dados e do nível de automação implantado.

3.2 - CONTROLE OPERACIONAL

Existem diversas formas de executar a operação de sistemas de abastecimento de água e sua escolha depende de diversos fatores. Questões como a complexidade do sistema, a infraestrutura de transmissão de dados, a confiabilidade dos equipamentos, as consequências em caso de falhas, a disponibilidade de banco de dados e modelos, entre outras, podem definir a forma de controle operacional que será adotada em cada caso.

A classificação das formas de operação comumente adotadas varia bastante nos diversos trabalhos que tratam do assunto (Borges, 2003, Carrijo, 2004 e Cunha, 2009). Para o presente trabalho optou-se por classificá-las da seguinte maneira: operação manual local; operação automática local; operação centralizada com acionamentos remotos; e operação centralizada com acionamentos automáticos.

- Na operação manual local, um operador comanda algum equipamento baseado apenas em informações locais e possui pouca ou nenhuma informação sobre o restante do sistema. São exemplos dessa forma de operação o uso de um operador que liga um equipamento em determinado horário fixo ou liga uma bomba quando o nível de um reservatório atinge determinada altura.
- A operação automática local também ocorre sem que se tenha informações gerais

dos componentes do sistema. Os comandos são dados de forma automática, sem interferência humana e sob análise apenas de condições locais. Um exemplo dessa forma de operação é o uso de boia de nível, para o ligamento ou desligamento de uma bomba. Essa forma de comando pode avaliar apenas um parâmetro local (utilizando boias, sensores de nível, pressostatos, fluxostatos, etc.), ou pode também ser mais elaborada, incluindo a análise de mais de um parâmetro e incorporando rotinas programáveis aplicadas em CLP (Controladores Lógicos Programáveis). O que define essa operação é o fato de haver apenas a análise das condições locais, não dependendo da quantidade de parâmetros analisados, nem da existência de programação computadorizada.

- A operação centralizada com acionamentos remotos ocorre quando o acionamento de algum equipamento é definido por um operador, de forma centralizada, levando-se em consideração as condições gerais do sistema. A realização do comando pode ser feita por telemetria ou mesmo por um outro operador em campo que recebe a ordem. O que define essa forma de operação é a tomada de decisão humana e centralizada, avaliando o sistema. A forma como o comando é transmitido ao equipamento de campo, seja por telemetria ou seja manualmente, não é o fator determinante.
- A operação centralizada com acionamentos automáticos é a forma de operação onde os dados do sistema são transmitidos para uma central e a tomada de decisão é feita de forma automática, avaliando todas as condições envolvidas. Essa forma de operação deve contar com uma estrutura de transmissão e armazenamento de dados, além de sistemas informatizados que sejam capazes de receber informações, traçar regras de operação e aplicá-las. Dentre as formas de operação apresentadas essa é a mais avançada.

Quando o sistema não é operado da forma automática centralizada, as regras de operação são traçadas conforme a experiência dos operadores. Os acionamentos de bombas e válvulas e o controle dos níveis dos reservatórios obedecem regras empíricas que consideram as variações locais e temporais de consumo. Essas regras buscam atender a demanda de água e reduzir os custos de operação, principalmente os de energia elétrica. Em alguns casos pode-se contar com uma equipe de planejamento ou uma supervisão que atua junto aos operadores, avaliando o desempenho do sistema e propondo alterações nas regras para melhorar o atendimento dos objetivos.

Na medida em que os sistemas de abastecimento crescem em complexidade e custo, torna-se interessante que a operação baseada em comandos locais evolua para uma operação centralizada. Para que essa evolução ocorra é necessário a instalação de um sistema de comunicação e supervisão que permita transmitir dados, acompanhar as condições operacionais

do abastecimento e acionar remotamente os diversos componentes envolvidos. Esses sistemas são conhecidos por SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) e, apesar de possibilitarem uma operação centralizada, não são suficientes para que os comandos sejam feitos de forma automática.

A implantação de uma operação automática centralizada requer maior aprimoramento, sendo necessário a estruturação de bancos de dados para armazenar as informações de campo transmitidas pelo sistema SCADA. Essas informações armazenadas serão utilizadas na construção dos modelos de simulação hidráulica e de otimização.

Coulbeck e Orr (1993) falam da aplicação do controle computacional na operação e gerenciamento dos sistemas de abastecimento de água, apontando aspectos de gestão de custos, de qualidade de água e de perdas no sistema. Os autores ressaltam que ferramentas como simulação hidráulica, modelos de previsão de demanda e modelos de otimização podem ser utilizados “*off-line*”, com o enfoque de gerenciamento de médio e longo prazo. Mas a aplicação do controle automático necessita da utilização de sistemas de transmissão, monitoramento e análise de dados em tempo real, além da definição de regras operacionais otimizadas e execução de comandos remotos.

Mesmo quando um sistema atinge o estágio de operação centralizada com acionamentos automáticos, a presença do operador ainda é necessária. Segundo Carrijo (2004), ainda que o objetivo seja a adoção de um controle totalmente automático, será necessária a presença do operador, cuja função será a de censor das regras operacionais definidas pelo computador e de responsável pela operação do sistema em situações anômalas. O autor também enfatiza que a transição para uma operação centralizada com acionamentos automáticos deverá ser acompanhada por operadores com experiência, para que, caso necessário, as regras de operação propostas pelos modelos de otimização sejam avaliadas e criticadas.

Como se pode ver, a busca por uma operação automática centralizada procura obter uma maior confiabilidade e eficiência nos resultados, mas não elimina o conhecimento nem a necessidade dos operadores do sistema. Procura-se incorporar os conhecimentos do homem a uma metodologia formal e aliviá-lo das tarefas repetitivas, permitindo com isso o uso de seu intelecto para analisar criticamente a operação e introduzir novos conceitos e ideias. O operador passa a atuar como supervisor do sistema (Zahed, 1990, *apud* Vicente, 2005).

3.3 - MODELOS DE SIMULAÇÃO HIDRÁULICA

O termo simulação geralmente refere-se à representação do comportamento de um sistema físico de interesse. No caso específico dos sistemas de abastecimento de água, modelos matemáticos que representam as leis físicas que regem o fenômeno do escoamento de fluidos sob pressão são

utilizados para fins de simulação. Nesse caso, as simulações visam reproduzir a dinâmica de um sistema existente ou proposto, e são comumente utilizadas na fase de projeto, para o dimensionamento das unidades e, após o início de operação, para avaliação de seu desempenho (Carrijo, 2004).

Nas empresas de saneamento, o uso de simuladores hidráulicos pode ser bastante amplo, atendendo necessidades presentes nos planejamentos de longo, médio e curto prazo. Com objetivos de longo prazo, as áreas de projetos podem utilizar esse recurso para verificar o funcionamento de novos sistemas e sua integração com os já existentes, testando arranjos e configurações variadas. Com objetivos de médio prazo, as áreas de operação podem simular novas demandas absorvidas pelos sistemas em funcionamento, avaliar o comportamento no caso de elevações sazonais de consumo, testar variações no funcionamento dos conjuntos de bombeamento, verificar possíveis impactos de uma paralisação de manutenção e até mesmo simular parâmetros de qualidade da água ao longo da rede de distribuição. Com objetivos de curto prazo, podem ser testadas regras operacionais que considerem previsões de demandas futuras, de forma a possibilitar implantação de um sistema de abastecimento dotado de operação automática e centralizada com execução de comandos em tempo real.

Nas últimas décadas houve uma grande evolução nos programas de simulação. Técnicas de importação de dados cadastrais, uso de interfaces gráficas e geração de relatórios de informação facilitaram bastante o uso dos modelos hidráulicos e a interpretação de seus resultados.

Em relação ao funcionamento, em geral os modelos de simulação hidráulica consideram as condições de escoamento em regime permanente. Para isso, utilizam as equações de continuidade nos nós e as equações de energia ao longo dos trechos. Outros modelos podem utilizar as equações que descrevem o comportamento da água em regime transiente, contudo são mais largamente aplicados no dimensionamento de estruturas de proteção contra transientes hidráulicos, sendo pouco utilizados no auxílio ao planejamento operacional.

Mesmo dentro das condições de escoamento permanente, alguns modelos hidráulicos apresentam opção de análise do sistema ao longo do tempo. Quando as variações temporais são consideradas, costuma-se dizer que se trata de uma simulação em tempo estendido. Quando não são consideradas, costuma-se dizer que o modelo representa uma condição instantânea de funcionamento, para a qual são calculados valores de pressão e vazão em um determinado instante.

Normalmente, nas análises em tempo estendido, são realizadas sucessivas simulações instantâneas, onde as condições finais de uma simulação representam as condições iniciais da simulação seguinte. Nessa situação, a cada simulação realizada obtém-se os valores de pressão e vazão nos trechos e nós do modelo. Para determinação dos níveis dos reservatórios são

calculadas as diferenças entre as vazões de entrada e de saída, acumulando-se os valores ao longo do tempo.

A simulação de uma condição instantânea de funcionamento é de grande utilidade para estudos e planejamentos de longo prazo, testando situações extremas de funcionamento e auxiliando no desenvolvimento de novos sistemas. Nessas simulações podem ser testadas, por exemplo, condições de pico de consumo, onde normalmente as pressões atingem os valores mínimos.

Já a simulação em tempo estendido pode ser bastante útil no apoio ao planejamento operacional, tanto de médio quanto de curto prazo. Seu uso possibilita testar diferentes regras operacionais, comparando-as sob aspectos de custos e de eficiência de atendimento.

EPANET

Nesse contexto, existem no mercado diversos programas de modelagem matemática que auxiliam na análise do comportamento hidráulico de sistemas submetidos à escoamentos em condutos forçados. Ribeiro (2005) e Cunha (2009) apresentam uma vasta revisão dos vários tipos de programas disponíveis, dentre os quais pode-se destacar o EPANET (Rossman, 2000).

O EPANET é um programa de grande utilização em todo o mundo, capaz de realizar simulações em tempo estendido (*extended period*), do comportamento hidráulico e da qualidade da água em redes de tubulação pressurizada. No EPANET, a rede é representada por tubos, nós (junções de tubulação), bombas, válvulas e tanques de armazenamento ou reservatórios. O programa simula o fluxo de água em cada tubo, a pressão em cada nó, a altura da água em cada reservatório, e a concentração de uma espécie química através da rede durante um período de simulação. Além de espécies químicas, a idade da água e o rastreamento da fonte de abastecimento também podem ser simulados.

O EPANET é gratuito, desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) e disponibilizado sob duas formas: executável e código fonte (*Toolkit Library*). A forma executável é fornecida com interface gráfica e é aplicável a estudos que envolvem apenas o processo de simulação. A forma de código fonte é recomendada para estudos que envolvem o acoplamento de outros modelos (calibração, vazamentos, otimização operacional, entre outros), onde normalmente é necessária a alteração de valores e a consulta de resultados durante o processo de simulação.

3.3.1 - Principais elementos e informações dos modelos hidráulicos

Para que os modelos de simulação funcionem é necessário que contenham, da forma mais fiel possível, os dados representativos da configuração física do sistema em estudo. Cesário (1995) *apud* Borges (2003), dividem esses dados em três tipos:

- Dados de rede hidráulica – topologia;
- Dados operacionais; e
- Dados de consumo.

A topologia do sistema com a correta disposição de trechos e nós é uma condição essencial ao bom desempenho do modelo. Elementos especiais como reservatórios, bombas e válvulas, podem ser representados por nós ou trechos e conter características próprias. No caso das bombas, pode-se descrever a curva de funcionamento do equipamento; no caso dos reservatórios, pode-se indicar a curva de volume de armazenamento em função do nível; e no caso das válvulas, dependendo do tipo utilizado, poderão ser atribuídos valores de perda de carga localizada, pressão de jusante ou vazão de saída.

Outra informação fundamental na construção de um modelo de simulação para uso em problemas de otimização é o conhecimento dos valores de demanda de água em cada nó de consumo. É com base nesses valores que toda rotina operacional deverá ser traçada. Ou seja, não há sentido em otimizar um sistema de abastecimento se não se conhece os consumos que deverão ser atendidos.

A definição dos dados de demanda que alimentarão o modelo hidráulico deve ser orientada em função do objetivo proposto. Isso significa dizer que um modelo desenvolvido para simulação de uma condição instantânea deverá utilizar dados instantâneos de demanda referentes à situação de interesse. Um modelo de simulação em tempo estendido deverá utilizar dados de demanda do período considerado, incluindo-se nesse caso a variação temporal.

Em decorrência do princípio de utilizar no modelo hidráulico dados de demanda alinhados ao propósito do problema, pode-se concluir que modelos destinados ao planejamento de curto prazo, com definição de regras operacionais em tempo real, deverão ser alimentados com dados de demandas futuras. Nesse mesmo raciocínio, modelos destinados ao planejamento de médio prazo, com definição de regras operacionais de nível estratégico, devem utilizar demandas que representem uma condição pré-estabelecida como, por exemplo, padrões médios de consumo.

E por fim, mesmo que o modelo de simulação conte com todas as informações necessárias para representar o sistema, ainda assim ele não deve ser considerado uma representação fiel da realidade. É necessário que o modelo construído seja calibrado para garantir que seus resultados representem de forma satisfatória o funcionamento do sistema real.

3.3.2 - Calibração

De forma geral, o processo de calibração pode ser conceituado como o ajuste dos parâmetros de um modelo, objetivando melhorar a concordância entre os valores observados e calculados.

No caso dos sistemas de abastecimento de água, o processo de calibração ajusta as demandas de água do sistema, a rugosidade das tubulações, as curvas de operação das bombas e outras características do modelo, de forma que os valores calculados para as variáveis de interesse (pressões ou vazões) correspondam aos valores observados no sistema real, para um determinado conjunto de condições operacionais.

Ostfeld *et al.* (2012) descrevem que o desenvolvimento de um processo de calibração envolve tipicamente os seguintes passos: (1) definição das variáveis, coeficientes e equações do modelo; (2) seleção de uma função objetivo para medir a qualidade da calibração; (3) seleção do conjunto de dados que será utilizado no processo de calibração; e (4) seleção de um procedimento, manual ou “automatizado”, para alterar os valores dos coeficientes no sentido de melhorar a função objetivo.

Braga da Silva *et al.* (2003) classificam os procedimentos para calibração de modelos aplicados em redes de distribuição de água em três categorias:

- Iterativos;
- Explícitos ou diretos; e
- Implícitos ou inversos.

O procedimento iterativo geralmente é baseado em tentativa e erro. Os parâmetros de calibração são avaliados e podem ser alterados a cada iteração, usando comparações entre valores medidos e simulados. O processo deve durar até que os valores simulados sejam satisfatórios. Entre os trabalhos que adotaram esse procedimento estão Walski (1983), Bhave (1988) *apud* Braga da Silva *et al.* (2003), além de Itonaga (2005).

Os procedimentos explícitos, também chamados analíticos ou diretos, atuam na solução das equações que descrevem o comportamento hidráulico da rede (Ormsbee e Wood, 1986, Boulos e Wood, 1990 e Ferreri *et al.*, 1994, *apud* Braga da Silva *et al.*, 2003).

Os procedimentos implícitos, também conhecidos como métodos inversos, adotam processos de busca que têm como objetivo encontrar parâmetros do problema que minimizem as diferenças entre valores simulados e observados de pressão e vazão. Devido à forma de atuação, esse tipo de calibração favorece o uso de algoritmos que trabalhem para minimizar funções objetivo, com a vantagem de possibilitar uma calibração rápida e realizada dentro de um processo automatizado.

Esse método vem sendo abordado em diversos trabalhos ultimamente (Soares, 2003, Braga da Silva *et al.*, 2004, Neves, 2007 e Viera 2008).

3.4 - OTIMIZAÇÃO OPERACIONAL DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Como foi dito anteriormente, um sistema de abastecimento de água é composto de diversas estruturas, que cumprem diferentes funções, mas atuam de forma integrada para atender os requisitos propostos por seus operadores. Comumente, o principal requisito proposto é a manutenção da continuidade do abastecimento em todos os pontos do sistema. As características de estruturação dos sistemas de abastecimento de água permitem uma infinidade de combinações de funcionamento de seus componentes, gerando inúmeras possibilidades de acionamentos de bombas e válvulas, havendo diversas formas de atender ao objetivo de abastecer a população.

Se há diversas possibilidades de operar sistemas de abastecimento atendendo aos requisitos impostos, não haveria entre essas possibilidades alguma que cumprissem os requisitos com menores custos? Baseado nesse questionamento diversos estudos já foram realizados com o objetivo de desenvolver sistemas de otimização capazes de definir regras operacionais otimizadas aplicáveis a sistemas de abastecimento de água.

3.4.1 - Regras operacionais de longo, médio e curto prazo

A definição das regras operacionais otimizadas pode ser encarada sob os enfoques dos planejamentos de longo, médio e curto prazo. Embora em todas as situações o objetivo seja determinar regras operacionais otimizadas, apontando para a condição de funcionamento de cada componente do sistema a cada passo de tempo analisado, as abordagens tratam de necessidades e aplicações práticas distintas.

De forma geral, a otimização operacional com enfoque nos planejamentos de médio e longo prazo utiliza dados de referência para cada situação abordada, apoiando-se em curvas típicas de demanda e podendo utilizar valores característicos dos períodos analisados, como vazões médias ou máximas. A principal característica dessas abordagens é a busca de uma regra operacional otimizada para uma condição pré-determinada e já conhecida.

As regras operacionais obtidas sob esses enfoques possibilitam a avaliação do desempenho dos componentes dos sistemas de abastecimento, existentes ou projetados. É possível avaliar reservatórios, adutoras, elevatórias e diferentes modalidades de tarifa de energia elétrica. Apesar dos resultados desses modelos poderem apontar benefícios operacionais na construção e ampliação de estruturas, ou na mudança de tarifas de energia, não se pode dizer que as

estratégias definidas são diretamente aplicáveis à operação cotidiana dos sistemas de abastecimento.

Para que os modelos de otimização possam gerar regras operacionais aplicáveis ao planejamento de curto prazo, que sejam utilizadas pelos operadores dos centros de controle, é necessário que recebam as informações em tempo real dos sistemas abordados. Essa necessidade ocorre, pois não há como garantir que modelos de otimização, submetidos a padrões estáticos de demanda, gerem regras operacionais otimizadas que sejam aplicadas a sistemas que, na prática, estão submetidos a condições distintas daquelas preconizadas.

Assim, para atender às necessidades presentes no planejamento operacional de curto prazo, o modelo de otimização deve estar preparado para tratar de forma contínua as variações que ocorrem a todo instante no sistema de abastecimento. O primeiro ponto que deve estar disponível é uma infraestrutura de transmissão de dados em tempo real. Também é fundamental que haja um modelo de previsão de demandas futuras.

Cunha (2009) tratou de forma detalhada essas abordagens de otimização e denominou os planejamentos de médio e longo prazo como “Planejamento em Nível Estratégico” e o planejamento de curto prazo como “Operação em Tempo Real”. O trabalho utilizou em conjunto os diferentes enfoques de otimização, de maneira que os níveis dos reservatórios determinados pela otimização em Nível Estratégico foram utilizados como referência para a definição das regras operacionais otimizadas aplicadas à Operação em Tempo Real.

Considerando que os sistemas de abastecimento são operados com o propósito de atender às demandas da população, o comportamento hidráulico só será reproduzido de forma satisfatória se a condição simulada for compatível com as demandas de abastecimento consideradas. Portanto, modelos de otimização que irão definir regras de operação aplicáveis em tempo real deverão contar com valores confiáveis de demanda futura, que deverão gerados por modelos previsionais.

As técnicas adotadas na geração de séries de demandas futuras variam bastante na literatura especializada. Jain e Ormsbee (2002) classificam as técnicas em dois grupos:

- Métodos convencionais;
- Métodos de sistemas inteligentes.

Os métodos convencionais são baseados na análise da série temporal (Smith, 1988; Miaou, 1990; Zhou *et al.*, 2000; Borges, 2003; Vicente, 2005; Zahed, 1990 *apud* Vicente, 2005 e Adamowski, 2008). Como exemplos dessa técnica pode-se citar: Regressão Linear Simples, Regressão Linear Múltipla, Auto Regressão Integrada de Média Móvel (ARIMA) e Séries de Fourier.

Entre os métodos de sistemas inteligentes, as técnicas mais comuns se baseiam em Redes Neurais Artificiais (Joo *et al.*, 2002 e Odan, 2010) e Sistemas Especialistas.

Diversos trabalhos têm também apresentados modelos híbridos de previsão de demanda que consistem basicamente em combinar métodos convencionais com métodos de sistemas inteligentes (Odan, 2010 e Azadeh *et al.*, 2012).

3.4.2 - Algoritmos genéticos

Os algoritmos genéticos (AGs) fazem parte de uma classe de algoritmos de busca conhecida por algoritmos evolucionários. Essas técnicas são caracterizadas por utilizarem algoritmos de pesquisa probabilística inspirados no modelo de evolução observado na natureza. Carrijo (2004) cita como principais representantes da classe de algoritmos evolucionários: as estratégias evolutivas, a programação evolucionária e os algoritmos genéticos.

Os algoritmos genéticos podem então ser definidos como métodos de otimização por busca, que procuram reproduzir matematicamente os mesmos mecanismos observados na natureza e que regem a evolução das populações de seres vivos. Estes algoritmos seguem o princípio da seleção natural e sobrevivência dos mais aptos, declarado em 1859, pelo naturalista e fisiologista inglês Charles Darwin.

De acordo com a literatura, o primeiro trabalho publicado sobre AG foi em 1975, nos Estados Unidos, com o título: *Adaptation in Natural and Artificial Systems* de autoria de John Holland. Este livro foi o marco para o desenvolvimento e aplicação dos AGs na resolução de vários problemas na área de engenharia (Carrijo, 2004).

Os AGs conseguem resolver problemas complexos de maneira simples. Como ocorre na natureza, o algoritmo não sabe o tipo de problema que está sendo resolvido, ele apenas busca selecionar, dentro de uma determinada população, os indivíduos que estão melhor adaptados ao ambiente. Essa aptidão é medida por uma função matemática e os indivíduos que tem melhor aptidão possuem mais oportunidades de reprodução, imitando o processo evolucionário natural.

Pelo fato dos processos utilizados nos AGs serem análogos aos fenômenos observados na natureza, é comum que o termos utilizados sejam originários da biologia. Portanto, para um melhor entendimento no desenvolvimento do trabalho, apresenta-se a seguir uma lista com os principais termos utilizados na literatura:

- Cromossomo e genoma – é a estrutura de dados que codifica (representa) uma solução qualquer. Representam um simples ponto no espaço de busca, ou seja, uma possível solução do problema;
- Gene – é uma parte do código que representa a solução (cromossomo).

Normalmente representa uma variável de decisão do problema;

- Indivíduo – é uma solução qualquer do problema. É um simples membro da população, representado por um cromossomo e seu respectivo valor de aptidão;
- Genótipo – representa a informação contida no cromossomo ou genoma;
- Fenótipo – representa o objeto, estrutura ou organismo construído a partir das informações do genótipo. É o cromossomo decodificado;
- Alelo – representa os valores que as variáveis de decisão do problema (genes) podem assumir;
- População – conjunto de soluções possíveis para o problema, onde cada solução é um indivíduo da população;
- Geração – é uma fase do processo de busca (processo evolutivo) formada por um conjunto de soluções (população);
- Elitismo – é uma estratégia comum utilizada nos AGs e baseia-se na transferência da melhor solução de uma geração para a geração seguinte, sem que haja alteração. Essa estratégia visa evitar que o melhor elemento de uma determinada geração falhe na produção de um descendente e acabe por produzir uma próxima geração pior que a anterior. Essa estratégia aumenta a velocidade de convergência do AG.

Outros termos comuns que são utilizados para denominar os procedimentos adotados no processo de busca são:

- Seleção – é o processo pelo qual as soluções (indivíduos) são escolhidas para gerar descendentes que comporão a próxima geração do problema;
- Cruzamento – é o processo que gera os descendentes de uma população, em que os códigos de duas soluções (pais) se combinam para gerar dois novos códigos (duas novas soluções – filhos);
- Mutação – é o processo que possibilita a introdução de novas características às soluções existentes pela alteração de elementos do código que representa a solução (cromossomo).

O funcionamento dos algoritmos genéticos se dá basicamente com a criação de um conjunto de soluções iniciais, chamado população inicial, que dará início ao processo de busca. Esse conjunto de soluções iniciais pode ser criado de maneira aleatória, ou definido pelo próprio usuário do algoritmo. Após criada, cada solução (indivíduo) integrante da população inicial é avaliada e seu respectivo valor de aptidão é atribuído.

Após definida as aptidões dos indivíduos da população inicial, são aplicados os processos de Seleção, Cruzamento e Mutação para que sejam gerados novos indivíduos que formarão o próximo conjunto de soluções do problema (próxima população). No processo de criação de novas populações, as soluções mais aptas são mantidas e as menos qualificadas são descartadas, mantendo-se o tamanho da população inicial. O processo se repete até que o critério de parada

seja atingido. Normalmente utiliza-se um número máximo de gerações como critério de parada do processo de busca.

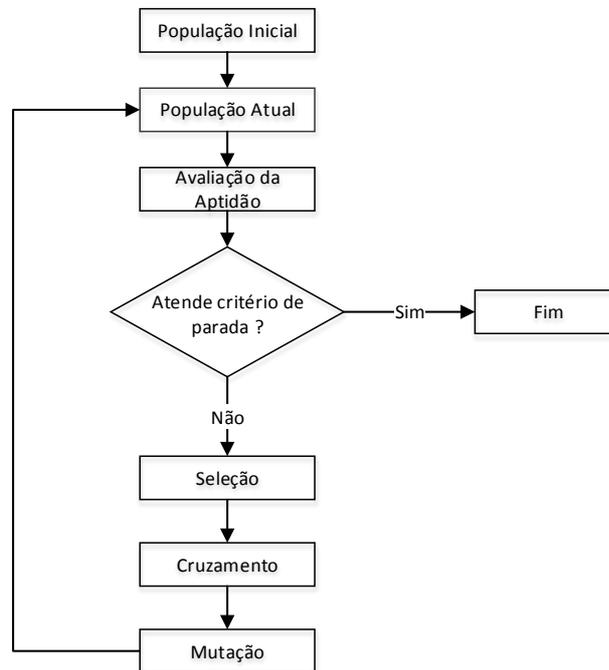


Figura 3.1 - Processo básico de funcionamento dos AGs

3.4.2.1 - Definição dos parâmetros

A otimização por algoritmos genéticos requer a determinação de diversos parâmetros que regem o funcionamento do processo de busca. Dentre as técnicas citadas pela literatura especializada para determinação desses parâmetros, destaca-se a técnica de análise de sensibilidade (Pedrosa, 2006 e Cunha, 2009). Contudo, alguns trabalhos vem adotando algoritmos específicos para a determinação dos parâmetros do modelo otimizador. Moraes (2008) utilizou *Particle Swarm Optimization* – PSO para determinar os parâmetros de um algoritmo genético aplicado na otimização de um sistema de abastecimento de água. Zeferino *et al.* (2009) também utilizaram PSO para determinação dos parâmetro de uma otimização por *Simulated Annealing* em um sistema de esgotamento sanitário.

3.4.2.2 - Representação das soluções

A representação é a maneira como cada solução é descrita (codificada) para o problema e constitui um importante aspecto que deve ser observado na utilização de AGs. As técnicas de representação utilizadas podem variar de acordo com problema e com o tipo de algoritmo genético adotado, sendo que nos problemas de otimização operacional de sistemas de abastecimento, as soluções podem ser representadas de forma explícita ou implícita (López-Ibáñez, 2009).

A representação explícita define de forma direta o estado de cada variável do problema (bombas e válvulas), indicando a condição de cada elemento em cada período de tempo analisado (Mackle *et al.*, 1995, Savic *et al.*, 1997, Cunha, 2009 e Odan, 2013). O tipo de representação explícita mais utilizada na literatura é a binária, em que o estado de cada elemento recebe o valor 0 (desligado/fechado) ou 1 (ligado/aberto).

Já a representação implícita é definida em função de outros componentes do sistema de abastecimento, tais como níveis de reservatórios (Atkinson, 2000 e van Zyl *et al.*, 2004). Nessa forma de codificação, bombas podem ser desligadas caso algum reservatório atinja um determinado nível limite (nível alto), ou válvulas podem ser abertas quando níveis baixos de reservação forem atingidos.

López-Ibáñez (2009) propôs um tipo de representação explícita, denominada “*time-controlled trigger*”, que além de controlar o funcionamento de bombas e válvulas, por meio de valores de tempo, também é capaz de limitar explicitamente a quantidade de acionamentos admitidos em cada equipamento. Para tanto, o estado de cada elemento durante o período análise é representado por pares de variáveis de decisão t_i e t'_i , conforme ilustrado na Figura 3.2, em que o número n de pares utilizados determina a quantidade máxima de acionamentos. A representação temporal proposta pode ser feita de forma absoluta ou relativa:

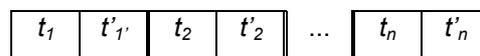


Figura 3.2 - Representação da solução por valores de tempo

- Na representação absoluta, as variáveis de decisão são períodos de tempo contados a partir do início da programação. Assim, em cada par (t_i, t'_i) , o primeiro elemento indica o instante que o equipamento deve ser acionado e o segundo indica o instante em que deve ser desativado. A representação temporal absoluta e seu correspondente na representação binária são demonstrados na Figura 3.3.

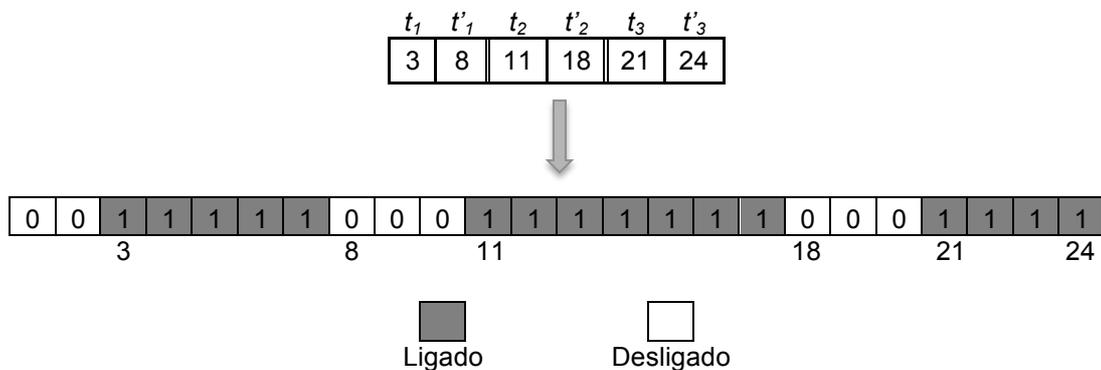


Figura 3.3 - Representação da solução por valores absolutos de tempo com três acionamentos

- Na representação relativa as variáveis de decisão são períodos de tempo considerados a partir do último acionamento, ou seja, cada par (t_i, t'_i) indica o período que cada equipamento permanecerá desligado e ligado, e não necessariamente o instante da simulação em que isso ocorre. A representação temporal relativa e seu correspondente na representação binária são demonstrados na Figura 3.4.

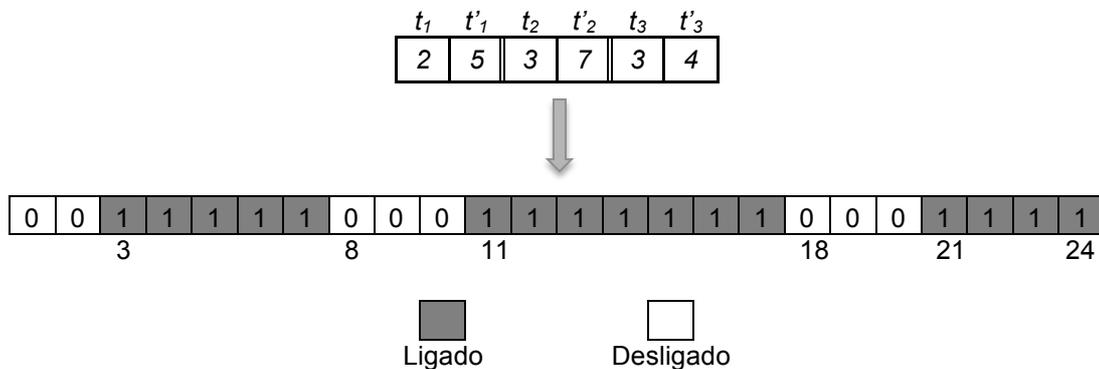


Figura 3.4 - Representação da solução por valores relativos de tempo com três acionamentos

Ao limitar a quantidade de pares t_i, t'_i , e, por consequência, o número máximo de acionamentos de cada elemento, a representação proposta por López-Ibáñez (2009) acaba reduzindo de forma significativa o universo de soluções do problema. Essa redução pode contribuir de forma significativa para a melhoria do tempo computacional, principalmente nos casos em que o número de variáveis é grande e as restrições do problema, em termos de números de acionamentos, são severas.

3.4.3 - Técnicas de otimização e de representação do sistema hidráulico

Em meados da década de 1970, alguns trabalhos surgiram buscando a definição de regras operacionais otimizadas. Fallside e Perry (1975) descreveram um contexto que existia no Reino Unido, onde sistemas de abastecimento regionais estavam se reorganizando em sistemas cada vez maiores e complexos. Fallside e Perry (1975) e Coulbeck e Sterling (1978) apresentaram trabalhos para implementação de controle automático centralizado com comandos em tempo real. Na representação do sistema hidráulico utilizaram o método da linearização para determinar as vazões nos trechos e as pressões nos nós. Para o cálculo dos volumes dos reservatórios utilizaram cálculos de balanço de massa. Para a solução do problema de otimização foram adotadas técnicas de abordagem hierárquica, que consistiram em decompor o sistema em subsistemas menores, que foram solucionados pelo método dos multiplicadores de Lagrange.

Sabet e Helweg (1985) propuseram um modelo de otimização destinado a redução do consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento atendidos por água subterrânea. Foi utilizada a técnica de Newton-Raphson para solução das equações que descrevem o sistema hidráulico e um algoritmo de programação dinâmica para o modelo de otimização. Os autores reconheceram que

o modelo é mais adequado para sistemas pequenos e que situações de maior porte deveriam utilizar técnicas de decomposição do problema. Essa ponderação dos autores demonstra que, naquele momento, a questão da dimensão e da complexidade dos sistemas já havia se tornado um obstáculo à aplicação das técnicas de otimização.

Coulbeck *et al.* (1990) apresentaram um sistema de controle automatizado com comandos em tempo real para redução de custo operacional. O sistema incluía módulos de previsão de demanda, simulação hidráulica, calibração e programação ótima de bombeamento. A simulação hidráulica foi realizada por um pacote de sistemas computacionais capazes de reproduzir o comportamento de redes abastecimento de diferentes dimensões e gerar resultados instantâneos ou em tempo estendido. A otimização operacional foi executada por dois programas diferentes: um deles foi utilizado em sistemas que possuíam um único reservatório e uma única fonte de abastecimento; o outro em sistemas com múltiplas fontes de abastecimento e um único reservatório. A previsão de demanda foi realizada por um sistema que utilizava os dados atuais e passados para extrapolar a tendência do comportamento e gerar os valores futuros de demanda. Os autores citaram a aplicação com sucesso do sistema de otimização em diversas localidades do Reino Unido e apontaram uma redução de custos de aproximadamente 10%.

Ormsbee *et al.* (1989) aplicaram para a cidade de Washington, nos Estados Unidos, uma metodologia de otimização de bombeamento baseada em duas etapas, que eram: definição da trajetória ótima do nível do reservatório; e definição da programação ótima de bombeamento para atingir essa trajetória. Para resolver o problema, os autores utilizaram programação dinâmica para definir a trajetória ótima dos reservatórios, considerando as restrições de bombeamento e os limites máximos e mínimos de armazenamento. Após definida a trajetória ótima, foi feito o cálculo do volume de bombeamento necessário a cada passo de tempo e, conseqüentemente, a programação das bombas. O estudo foi realizado para apenas uma única zona de pressão abastecida por duas elevatórias que totalizaram sete conjuntos de bombeamento. Foram utilizados os valores de demanda de quatro dias distintos de forma a avaliar o potencial de redução de custo de energia elétrica. Os autores afirmaram que as operações otimizadas apontaram uma economia de cerca de 7% quando comparadas às operações reais adotadas.

Zessler e Shamir (1989) propuseram a definição de regras operacionais otimizadas para um horizonte futuro de 24h de operação com valores de demanda apontados por um modelo de previsão. O estudo foi aplicado em um sistema relativamente pequeno, composto por oito reservatórios e sete estações de bombeamento, com produção média anual de 174 l/s. Para simular o funcionamento do sistema hidráulico foi feita uma segmentação por trechos, utilizando-se em cada segmento as equações de perda de carga do sistema e as curvas características das bombas. O modelo agregou os consumos das redes em um único ponto na saída de cada reservatório como forma de simplificação. No processo de otimização foi adotada a técnica de programação dinâmica. Os autores afirmaram que a execução completa de um período de

otimização de 24h consumiu de 10 a 15 minutos com os recursos computacionais utilizados.

Brion e Mays (1991) também abordaram a questão da complexidade dos problemas de otimização para sistemas de distribuição de água. Os autores afirmaram que o grande número de variáveis de decisão e de restrições, muitas das quais não-lineares, eram as principais razões dessa complexidade. A situação se agravaria ainda mais pelo fato de algumas variáveis de controle, como no caso das bombas, não serem contínuas e precisarem ser representadas, na forma de ligada ou desligada, através de variáveis binárias.

Na visão de Brion e Mays (1991), diversos trabalhos apresentados até então, que utilizaram técnicas de programação dinâmica, tinham sofrido com a dimensão dos problemas (número de bombas, número de reservatórios e tamanho da rede) e estariam limitados à aplicação em sistemas pequenos. Os autores afirmaram que técnicas utilizadas anteriormente (Fallside e Perry, 1975 e Coulbeck e Sterling, 1978), que não eram baseadas em programação dinâmica, também não tinham obtido muito sucesso. Contudo, citaram que o trabalho de Chase e Ormsbee (1989), onde foi proposta uma abordagem utilizando programação não-linear, lhes parecia ser mais promissor que os anteriores. Assim, Brion e Mays (1991) propuseram a aplicação de programação não-linear para otimização de um sistema na cidade de Austin, no Texas, com o uso de um modelo que resolvia de forma implícita as equações do sistema hidráulico.

Jowitt e Germanopoulos (1992) utilizaram programação linear para otimizar o custo de bombeamento de um sistema de abastecimento no Reino Unido, considerando as parcelas de consumo e demanda de energia elétrica. O problema considerou a eficiência das bombas e as restrições hidráulicas e operacionais. Foi utilizado o método da linearização para descrever o comportamento hidráulico do sistema. O método foi considerado pelos autores como robusto, com baixo requisito computacional e adequado para aplicações em tempo real.

Durante um longo período, a solução de problemas de otimização de sistemas de abastecimento baseou-se em métodos consagrados como programação linear, programação dinâmica e programação não linear. Embora esses métodos sejam considerados precisos e robustos, apresentam dificuldades para tratar alguns aspectos práticos reais, o que segundo Wu e Simpson (2001) resultaria em cautela por parte dos engenheiros em aceitarem esses tipos de abordagem em situações concretas.

Como exemplo das dificuldades encontradas por esses métodos, pode-se citar as características não lineares dos sistemas de abastecimento, que restringem o uso de técnicas de programação linear. Já as questões relacionadas à dimensão dos problemas, como o grande número de variáveis de decisão e restrições, podem inviabilizar a adoção de técnicas como programação dinâmica e programação não linear.

Em contraponto aos métodos mais tradicionais, o uso de algoritmos genéticos é capaz de incorporar a representação hidráulica do sistema de abastecimento dentro do próprio processo de otimização. Assim, os recursos disponíveis nos atuais simuladores hidráulicos podem ser utilizados em conjunto com a técnica de otimização. Dessa forma, o simulador hidráulico avalia o desempenho de cada possibilidade de operação (que é um indivíduo da população do algoritmo genético) e repassa para o modelo de otimização as informações geradas, para que seja calculada a aptidão da solução. Para Wu e Simpson (2001), o uso da simulação hidráulica em conjunto com a formulação do algoritmo genético representa a verdadeira força dessa técnica.

Mackle *et al.* (1995) consideravam que, devido à complexidade dos sistemas de abastecimento de água, o uso de cálculos simples para otimização não era mais possível e que métodos mais avançados deveriam ser aplicados. Os autores citaram que os principais métodos utilizados até então, como programação linear, programação dinâmica e programação não-linear, funcionavam bem para pequenos sistemas, mas encontravam dificuldades quando o sistema tratado era de grande porte. Nessas condições, a quantidade de cálculos necessários aumentava tão rapidamente com o número de reservatórios e combinações de bombas, que os requisitos de computação tornavam-se inaceitáveis. O próprio sistema de abastecimento utilizado no trabalho, que era composto por quatro bombas diferentes que abasteciam um único reservatório, quando simulado para um período de 24 horas, com cálculos em intervalos horários, gerava a quantidade de 2^{96} (8×10^{28}) possibilidades teóricas de bombeamento. Assim, diante da complexidade desse tipo de problema, os autores argumentaram que a utilização de algoritmos genéticos parecia uma escolha mais adequada, pois tratava os valores discretos utilizados nas programações de bomba de forma natural.

A realização desse estudo considerava os seguintes fatores: previsão de demanda para o período a ser otimizado; características hidráulicas do sistema de bombeamento; níveis máximos e mínimos dos reservatórios; função matemática que descrevia os custos com energia elétrica; e restrições do sistema. A previsão de demanda foi dada pelo histórico de consumo de um dia médio; as características de bombeamento consideravam as curvas de funcionamento e a eficiência das bombas; e as restrições foram definidas pelo atendimento da demanda de água e pela manutenção dos níveis máximos e mínimos dos reservatórios.

Para garantir que as restrições do sistema não seriam violadas, os autores introduziram penalidades na função objetivo para os casos de falha no abastecimento ou ultrapassagem dos limites definidos nos níveis dos reservatórios. Os autores ressaltaram que a definição dos valores das penalidades era de grande importância. Penalidades pequenas ampliariam demais a região viável da solução, o que poderia acarretar resultados inviáveis de serem aplicados na prática. Penalidades grandes demais restringiriam muito o universo de soluções viáveis e os resultados alcançados poderiam não representar a solução ótima do problema.

Savic *et al.* (1997) apresentaram um trabalho testando o uso de algoritmo genético multiobjetivo para resolver problemas de programação ótima de bombeamento. Foi utilizado o mesmo sistema de abastecimento apresentado por Mackle *et al.* (1995). O período de otimização era de 24 horas com discretização horária. A demanda a ser atendida foi dada pelo padrão histórico de um dia médio de consumo e a estrutura tarifária de energia elétrica era composta por dois valores diferenciados de custo.

A otimização proposta tratava de dois objetos distintos, que eram redução dos custos com energia elétrica e redução do número de acionamentos de bombas. A inclusão do parâmetro de acionamento das bombas no problema se deu na tentativa de representar uma redução nos custos de manutenção dos conjuntos de bombeamento, uma vez que diversos estudos mostravam que esses gastos eram diretamente proporcionais ao número de ligamentos e desligamentos desses equipamentos.

Propondo aumentar a eficiência do AG, o trabalho aplicou uma técnica que combinava o processo de busca global com processos de busca local. Assim, após concluído o processo de busca global, o resultado encontrado foi submetido à uma variação controlada dos bits que compunham o código da solução visando a encontrar um resultado ainda melhor. Outra melhoria proposta foi a adoção de penalidades variáveis que se tornavam mais restritivas no decorrer das gerações.

Van Zyl *et al.* (2004) realizaram um estudo de otimização operacional para o sistema de abastecimento de Richmond, no Reino Unido. Tratava-se de um sistema de grande porte, composto por seis reservatórios de distribuição, seis estações de bombeamento e uma única fonte de captação. A representação hidráulica desse sistema foi feita pelo simulador EPANET e o modelo desenvolvido possuía 948 trechos e 836 nós. O processo de otimização foi realizado para um período de 24 horas, com as demandas de consumo de água previamente conhecidas. Foi adotado um modelo híbrido de otimização, que consistiu em utilizar a técnica de AG em conjunto com processos de busca local (*hillclimber search methods*).

Os autores enfatizavam que a técnica de otimização por algoritmos genéticos era bastante adequada para a otimização operacional de sistemas de abastecimento de água, em especial sistemas complexos e de grande porte. Justificavam que os AGs possuíam uma excelente taxa inicial de convergência, contudo perdiam eficiência quando a busca se aproximava da região de solução ótima. Portanto, o trabalho propôs o desenvolvimento de um modelo híbrido de otimização, que utilizasse a eficiência do AG em encontrar a região da solução ótima e, em seguida, técnicas de busca local. Assim, o resultado encontrado pelo algoritmo genético serviu como ponto de partida para o processo de busca seguinte.

Os resultados encontrados apontavam que o modelo híbrido de otimização era mais eficiente que o uso de algoritmo genético puro, tanto na questão da velocidade de convergência, quanto na

qualidade do resultado encontrado.

Righetto (2002) apresentou um trabalho que buscou definir uma operação otimizada de 24h para um sistema de abastecimento de água fictício. A representação do funcionamento do sistema hidráulico foi baseado no Método das Características e o processo de otimização utilizou algoritmos genéticos (AG). O sistema de abastecimento avaliado era composto por cinco bombas de velocidade variável, duas válvulas e dois reservatórios. As variáveis de decisão eram os estados de funcionamento das bombas (ligado/desligado), a rotação das bombas e a condição de operação das válvulas (aberta/fechada). A qualidade da solução encontrada foi avaliada por um índice de desempenho (função aptidão) que considerava cinco critérios distintos, que foram: consumo de energia; nível de água nos reservatórios; manutenção do fornecimento de água; pressão na rede; e número de acionamentos. Para cada critério foi adotado um fator de ponderação que aumentou ou diminuiu a importância do critério na função aptidão. O autor afirmou que o modelo foi capaz de reduzir em cerca de 25% o custo de energia durante o processo de otimização e que o tempo computacional exigido foi de sete horas.

Vicente (2005) propôs um modelo de operação que se baseou em um sistema de suporte à decisão para ser aplicado na operação em tempo real do Sistema Adutor Metropolitano de São Paulo. Para o cálculo do comportamento hidráulico foi utilizado o programa de simulação *WaterCad*^{*}. Para o processo de otimização o modelo utilizou a técnica de programação linear. O problema a ser otimizado consistiu na geração de regras operacionais com um horizonte diário de operação e intervalos horários de acionamento. A proposta foi determinar automaticamente a política de operação do sistema ao menor custo de energia elétrica, satisfazendo às exigências de desempenho hidráulico.

Como resultado, o trabalho apontou que o tempo de processamento foi satisfatório, mas que nem sempre o processo de otimização gerou resultados factíveis, por não incluir todas as restrições hidráulicas reais. Assim, como sugestões de melhoria, o trabalho propôs a aplicação de outro modelo de otimização e também sugeriu que fosse avaliada se a forma de abordagem mais adequada deveria tratar o problema em partes ou de forma integral (sem decomposição da rede).

Ribeiro (2005) propôs um modelo de otimização para aplicação em tempo real no Sistema Adutor Metropolitano Leste de São Paulo. Foi utilizado o EPANET como simulador hidráulico e algoritmo genético como técnica de otimização. Para definição dos valores de demanda de água foram utilizados registros históricos de consumo tomados como previsão perfeita. O horizonte de otimização foi de 24 horas com intervalos horários de acionamentos.

* programa computacional de uso comercial fornecido atualmente pela empresa Bentley Systems, Inc

O sistema de abastecimento em estudo possuía dez reservatórios, 75,66 quilômetros de adutoras, uma estação elevatória, três *boosters*, nove válvulas de controle de vazão, seis válvulas redutoras de pressão e uma demanda total de 6.439 l/s para a situação avaliada.

O problema a ser otimizado era composto de vinte variáveis de decisão, sendo nove delas representadas por números reais e onze por variáveis binárias. O vetor que codificou a solução (cromossomo) possuía 480 posições que correspondiam à condição operacional de cada uma das vinte variáveis, durante as 24 horas do horizonte de otimização.

A função aptidão adotada considerou o valor de custo de energia elétrica em conjunto com as penalidades por violação de restrições. Devido à diferença de ordem de grandeza, os valores das penalidades e do custo de energia foram normalizados entre o intervalo de 0 e 1. As restrições consideradas pelo modelo foram: diferença entre os níveis iniciais e finais dos reservatórios; ocorrência de nível de reservatório menor que o mínimo operacional; ocorrência de nível de reservatório maior que o máximo operacional; quantidade de acionamentos acima do limite estabelecido.

Para a contagem da quantidade de acionamentos o trabalho considerou apenas as válvulas e determinou que somente seriam computados como acionamento as ocorrências com variação de vazão superior a 20% entre dois períodos de análise consecutivos.

Foram testados 33 cenários de otimização com variações dos níveis iniciais dos reservatórios, parâmetros dos AGs e pesos das penalidades. O melhor cenário obtido apontou para uma redução de custo de energia da ordem de 22% em relação à operação usual adotada pela Sabesp (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo). O tempo de processamento foi de aproximadamente 3 horas e 20 minutos sendo que a maioria do tempo foi consumido pela simulação hidráulica. Os resultados obtidos pelo trabalho mostraram que o modelo de otimização por AG é bastante sensível as alterações dos parâmetros envolvidos como tamanho de população, número de gerações, operadores genéticos e coeficientes de penalidades.

Cunha (2009) desenvolveu um modelo capaz de gerar regras operacionais para otimização energética de sistemas de abastecimento de água com aplicação no planejamento operacional de curto prazo (tempo real). Para representação hidráulica foi utilizado o simulador EPANET, para o processo de otimização foi utilizada a técnica de algoritmo genético e para a previsão de demanda foi utilizado um modelo baseado em Série de Fourier.

O sistema hipotético em estudo possuía duas fontes de suprimento de água (1 ETA e 1 poço profundo), cinco reservatórios, três estações elevatórias, quatro válvulas controladoras de vazão e aproximadamente 9,5 km de adutoras. O problema era composto por nove variáveis de decisão, sendo seis bombas e três válvulas, que podiam assumir somente as condições de

ligado/desligado (bombas), ou aberto/fechado (válvulas). O vetor que codificou a solução (cromossomo) possuía 216 posições (9 elementos x 24 horas), todas elas representadas por valores binários.

A otimização utilizou uma função objetivo modificada (função aptidão) que considerou os custos de energia elétrica em conjunto com penalidades. As penalidades eram referentes a: manutenção das pressões mínimas nos nós de consumo; diferença entre níveis iniciais e finais dos reservatórios; quantidade de acionamentos; e ocorrências de interrupção no abastecimento. Para cada penalidade foi proposto um coeficiente multiplicador (coeficiente de penalidade) que visava a adequar os valores obtidos ao rigor desejado para cada restrição. Os valores dos coeficientes de penalidade, dos operadores genéticos e do tamanho da população foram definidos pela realização de uma análise de sensibilidade desses parâmetros.

O procedimento de otimização foi realizado em duas etapas. Na primeira, denominada Otimização em Nível Estratégico, o modelo foi submetido a curvas típicas de demanda para as quais foi gerada uma regra operacional otimizada. As trajetórias de nível dos reservatórios definidas nessa etapa serviriam de referência para a busca de regras operacionais otimizadas para aplicação em tempo real. Na segunda etapa, denominada Otimização em Tempo Real, o modelo utilizou as demandas definidas pelo modelo de previsão e os níveis dos reservatórios obtidos na Otimização em Nível Estratégico para gerar as regras operacionais otimizadas aplicáveis ao planejamento de curto prazo.

A avaliação do potencial de redução do custo de energia elétrica obtido pelo modelo otimizador ficou prejudicada por se tratar de um sistema hipotético que não possuía dados reais observados. O tempo computacional gasto no processo foi excessivamente longo e variou entre 15 minutos e 46 horas. O trabalho também demonstrou que a qualidade dos resultados obtidos foi fortemente influenciada pelos valores dos coeficientes de penalidade e operadores genéticos.

Odan (2013) apresentou um trabalho que descreveu a otimização operacional de um sistema de abastecimento seguindo critérios multiobjectivos para aplicação em tempo real. Os objetivos tratados no problema foram o custo de energia elétrica e a confiabilidade hidráulica do sistema. Para representação do comportamento hidráulico foi primeiramente proposta a utilização de um metamodelo baseado em RNA, contudo não foi obtido sucesso na aplicação dessa técnica e acabou-se por utilizar o simulador hidráulico EPANET, com simplificações na representação das redes de distribuição. A otimização foi feita por um algoritmo de otimização multimétodo (ou hiperheurística) chamado AMALGAM, que utilizou simultaneamente diferentes algoritmos de busca. Os algoritmos utilizados pelo AMALGAN foram: NSGA-II (*Nondominated Sorting Genetic Algorithm II*); PSO (*Particle Swarm Optimization*); AMS (*Adaptive Metropolis Search*); e DE (*Differential Evolution*). Para a previsão de demanda foi utilizado um modelo híbrido desenvolvido por Odan (2010), que combinou o uso de RNA com Série de Fourier.

Foram utilizados dois processos distintos para realização da otimização em tempo real. No primeiro, o otimizador recebeu as informações atualizadas do sistema SCADA e gerou as regras operacionais para as próximas horas. No segundo, foi adotado o mesmo processo utilizado por Cunha (2009), onde primeiramente foi realizada a otimização com dados típicos de demanda (Otimização Operacional em Nível Estratégico) que, em seguida, serviu de suporte para a geração de regras operacionais em tempo real. Foram consideradas as mesmas restrições adotadas no trabalho de Cunha (2009). Para a representação das variáveis de decisão seguiu-se o método proposto por López-Ibáñez (2009), denominado "*Relative Time-controlled Triggers*".

Após encontrada a solução otimizada foi aplicada uma técnica que procurou melhorá-la, chamada de "reparação das estratégias otimizadas". Essa técnica avaliou a solução otimizada e tentou reorganizar os instantes em que as bombas estavam ligadas e desligadas, de forma reduzir o número de acionamentos sem alterar o número de horas de funcionamento de cada equipamento. Também foram feitas modificações para minimizar o uso de bombas no horário de ponta, deslocando para fora desse período as ocorrências de bombas ligadas. Após as alterações, as soluções modificadas foram testadas e as modificações somente eram mantidas se as soluções alteradas fossem melhores que as originais.

Apesar de abordar sistemas de abastecimentos bastantes simples, compostos por poucos reservatórios e poucas variáveis de decisão, o modelo desenvolvido por Odan (2013) apresentou reduções de consumo de energia que variaram de 12% a 18%, nos três sistemas estudados.

4 - METODOLOGIA

O desenvolvimento do modelo para obtenção de regras operacionais otimizadas do sistema de abastecimento de água em estudo consistiu das seguintes etapas:

- Desenvolvimento e calibração de modelo de simulação hidráulica representativo do sistema de abastecimento, utilizando-se o software EPANET;
- Desenvolvimento de modelo de otimização operacional aplicável ao sistema em estudo;
- Desenvolvimento de código computacional capaz de utilizar o EPANET em conjunto com a biblioteca de algoritmos genéticos apresentada por Wall (1996), de maneira a testar diversas formas de operação e encontrar uma solução otimizada para o problema;
- Definição dos parâmetros gerais do problema, tais como: coeficientes e penalidades aplicadas à função objetivo, parâmetros de funcionamento do algoritmo genético (AG) e níveis iniciais dos reservatórios; e
- Definição de critérios para avaliação dos resultados obtidos no processo de otimização em comparação com a operação real adotada no sistema de abastecimento do Descoberto no Distrito Federal.

4.1 - MODELO HIDRÁULICO

O trabalho utilizou o programa de computador EPANET (Rossman, 2000) para representar o funcionamento hidráulico do sistema de abastecimento. A escolha se deu por ser um programa de uso livre, com código fonte disponível gratuitamente. Também foi considerado o fato do EPANET ser amplamente utilizado em todo o mundo, já tendo sido testado em diversas situações e apresentado resultados confiáveis.

Para um melhor entendimento do problema é feito a seguir uma descrição do sistema estudado, incluindo suas características de operação e disponibilidade de dados. Também são descritos os processos de construção e calibração do modelo hidráulico.

4.1.1 - Descrição do sistema de abastecimento

Para o desenvolvimento do trabalho foi escolhido o sistema de abastecimento de água do Descoberto, que iniciou sua operação em 1979, com a conclusão das obras de construção da barragem de acumulação e da elevatória de água bruta. Projetado na época para uma vazão de final de plano de 6.000 l/s, experimentou um rápido crescimento da vazão produzida, chegando em 2011 à uma média anual de 4.524 l/s, que correspondeu a 60,7% da produção e 59% da população atendida no Distrito Federal (CAESB, 2012).

Devido a várias alterações ocorridas desde sua concepção original, estima-se que atualmente a capacidade de produção seja menor que a inicialmente projetada, atingindo a vazão máxima instantânea de 5.300 l/s (CAESB, comunicação pessoal). Comparando-se os valores de vazão média anual produzida (4.524 l/s) e capacidade máxima instantânea de produção (5.300 l/s), percebe-se que há uma indicação de que nos dias de maior consumo do ano o sistema já opera muito próximo da sua capacidade instalada.

Valores de vazão produzida muito próximos da capacidade de produção podem indicar que há pouca margem para a implantação de processos de otimização. Isso ocorre pelo fato de que, quanto maior o nível de utilização, mais tempo os equipamentos têm que se manter em funcionamento, restringindo as condições para que mudanças nas regras de operação sejam adotadas.

Com relação às unidades em funcionamento, o sistema Descoberto é composto por uma captação, uma estação elevatória de água bruta e uma unidade de tratamento. Além dessas unidades existem 15 reservatórios apoiados, sete estações elevatórias de água tratada (que transferem água entre os reservatórios de abastecimento) e nove estações elevatórias tipo *booster* (responsáveis pelo bombeamento direto nas redes de distribuição). O sistema abastece as regiões sul e oeste do Distrito Federal, além de reforçar o abastecimento da região central da capital. Entre as localidades atendidas estão: Ceilândia, Samambaia, Taguatinga, Riacho Fundo, Recanto das Emas, Guará, Gama e Santa Maria, num total aproximado de 1,5 milhão de habitantes. A Figura 4.1 apresenta, sobre o mapa do Distrito Federal, o modelo hidráulico do sistema de abastecimento construído no simulador hidráulico EPANET.

Para uma melhor compreensão do funcionamento do sistema, a Figura 4.2 mostra a representação dos principais troncos de distribuição de água, indicando a posição geográfica dos principais reservatórios, captação e estação de tratamento. A Figura 4.3 mostra a representação esquemática do sistema, e detalha os reservatórios com suas válvulas de controle e as estações elevatórias com seus conjuntos de bombeamento. A Tabela 4.1 apresenta a lista com os códigos das unidades operacionais que são utilizados nas Figuras 4.2 e 4.3.

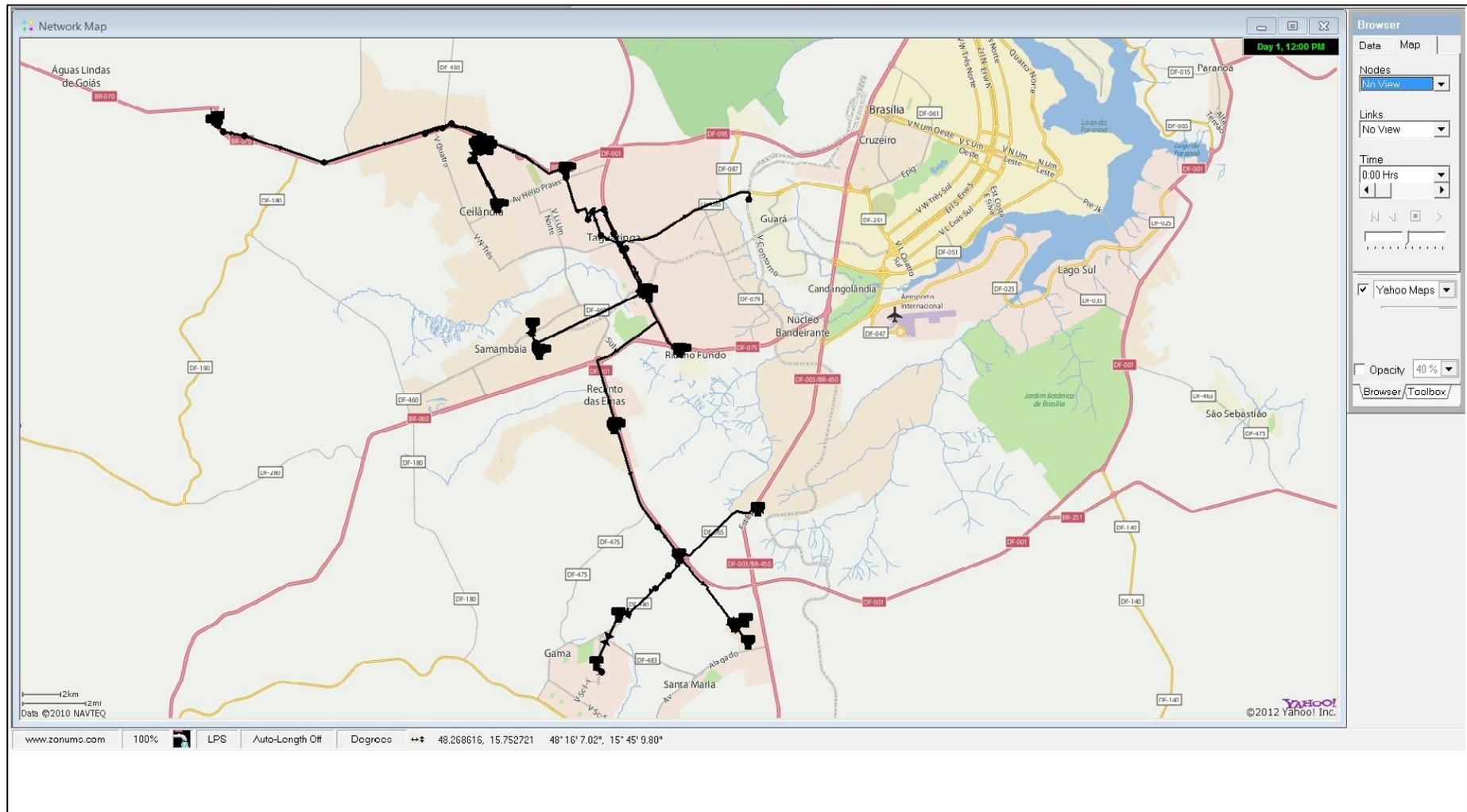


Figura 4.1 - Sistema de abastecimento do Descoberto mostrado sobre mapa do DF

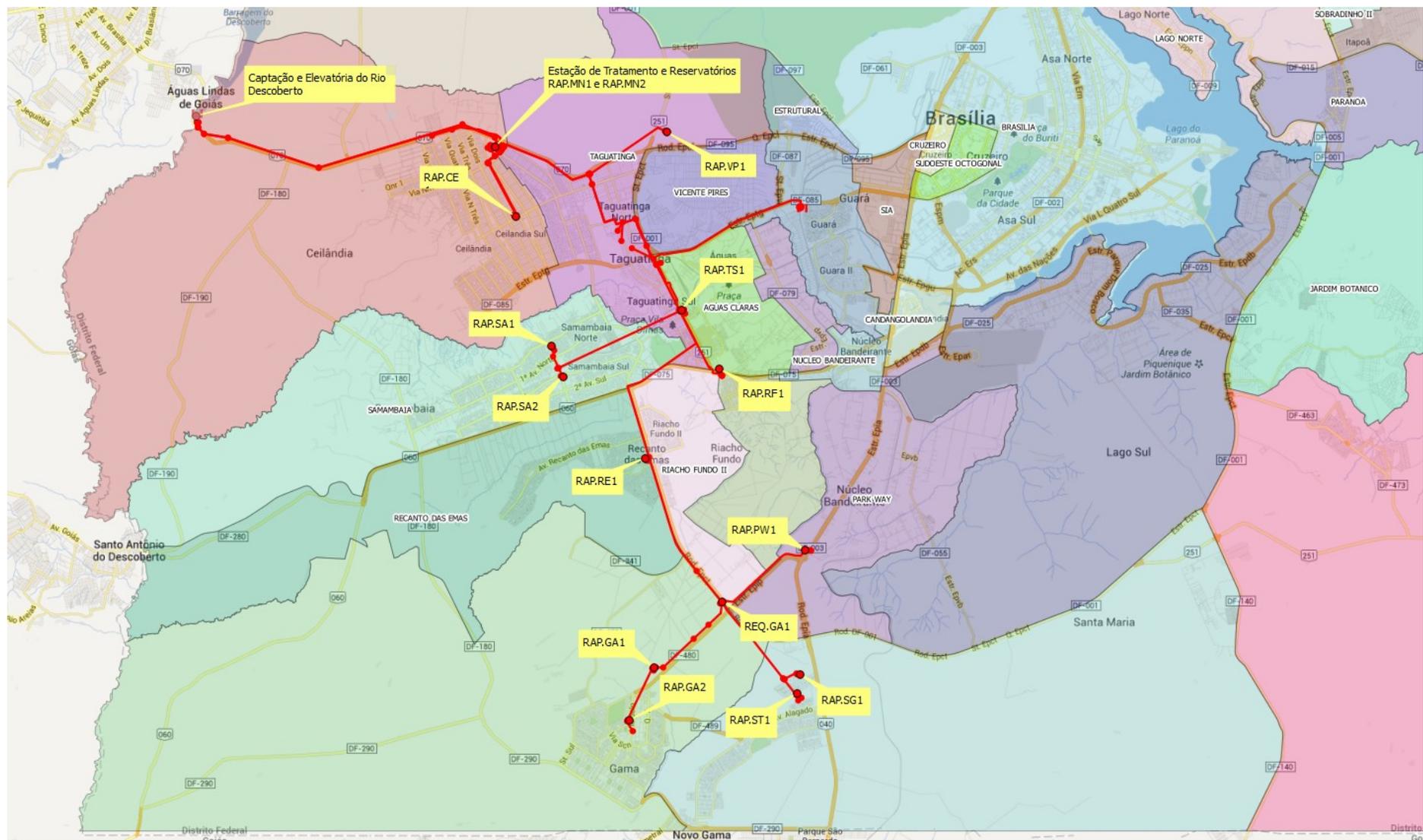


Figura 4.2 - Sistema de abastecimento com a indicação das principais unidades

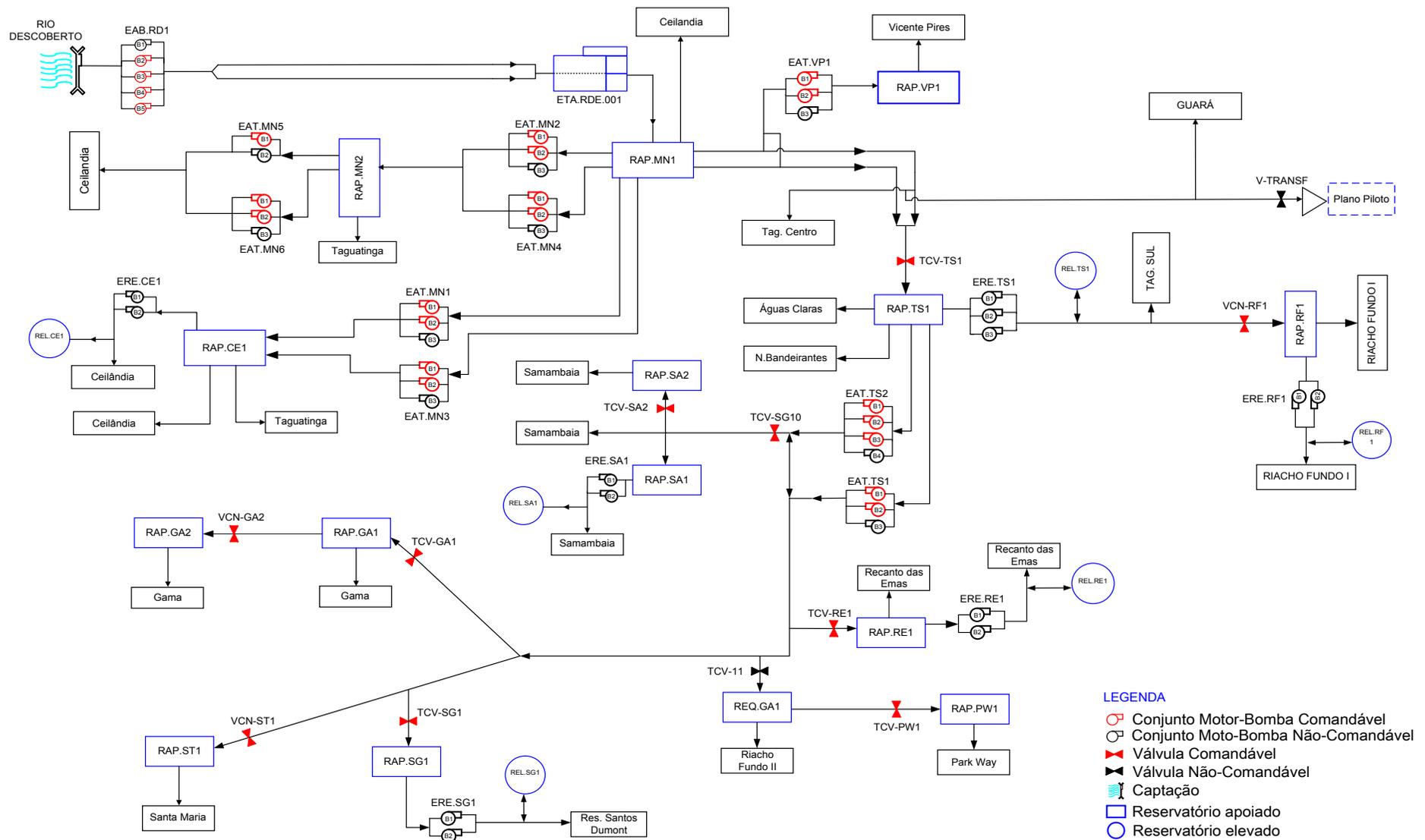


Figura 4.3 - Fluxograma de adução do sistema de abastecimento do Descoberto

Tabela 4.1 - Código das unidades operacionais do sistema Descoberto

EAB.RD1	Elevatória de Água Bruta do Rio Descoberto
ETA.RDE.001	Estação de Tratamento de Água do Rio Descoberto
RAP.MN1	Reservatório Apoiado M Norte 1
RAP.MN2	Reservatório Apoiado M Norte 2
EAT.MN1	Elevatória de Água Tratada M Norte 1
EAT.MN2	Elevatória de Água Tratada M Norte 2
EAT.MN3	Elevatória de Água Tratada M Norte 3
EAT.MN4	Elevatória de Água Tratada M Norte 4
EAT.MN5	Elevatória de Água Tratada M Norte 5
EAT.MN6	Elevatória de Água Tratada M Norte 6
RAP.CE1	Reservatório Apoiado de Ceilândia
ERE.CE1	Elevatória do Reservatório Elevado de Ceilândia
REL.CE1	Reservatório Elevado de Ceilândia
EAT.VP1	Elevatória de Água Tratada de Vicente Pires
RAP.VP1	Reservatório Apoiado de Vicente Pires
RAP.TS1	Reservatório Apoiado de Taguatinga Sul
TCV-TS1	Válvula Controladora do Reservatório de Taguatinga Sul
EAT.TS1	Elevatória de Água Tratada Taguatinga Sul 1
EAT.TS2	Elevatória de Água Tratada Taguatinga Sul 2
ERE.TS1	Elevatória do Reservatório Elevado de Taguatinga Sul
REL.TS1	Reservatório Elevado de Taguatinga Sul
VCN-RF1	Válvula Controladora do Reservatório do Riacho Fundo
RAP.RF1	Reservatório Apoiado do Riacho Fundo
ERE.RF1	Elevatória do Reservatório Elevado do Riacho Fundo
REL.RF1	Reservatório Elevado do Riacho Fundo
TCV-SG10	Válvula Controladora de Vazão de Samambaia
RAP.SA1	Reservatório Apoiado de Samambaia 1
ERE.SA1	Elevatória do Reservatório Elevado de Samambaia
REL.SA1	Reservatório Elevado de Samambaia
RAP.SA2	Reservatório Apoiado de Samambaia 2
TCV-SA2	Válvula Controladora do Reservatório de Samambaia 2
RAP.RE1	Reservatório Apoiado do Recanto das Emas
TCV-RE1	Válvula Controladora do Reservatório do Recanto das Emas
ERE.RE1	Elevatória do Reservatório Elevado do Recanto das Emas
REL.RE1	Reservatório Elevado do Recanto das Emas
REQ.GA1	Reservatório de Equalização do Gama
TCV-11	Válvula Controladora do Reservatório de Equalização do Gama
RAP.PW1	Reservatório Apoiado do Park Way
TCV-PW1	Válvula Controladora do Reservatório do Park Way
RAP.GA1	Reservatório Apoiado do Gama 1
TCV-GA1	Válvula Controladora do Reservatório do Gama 1
RAP.GA2	Reservatório Apoiado do Gama 2
VCN-GA2	Válvula Controladora do Reservatório do Gama 2
RAP.SG1	Reservatório Apoiado do Sítio do Gama
TCV-SG1	Válvula Controladora do Reservatório do Sítio do Gama
ERE.SG1	Elevatória do Reservatório Elevado do Sítio do Gama
REL.SG1	Reservatório Elevado do Sítio do Gama
RAP.GA2	Reservatório Apoiado de Santa Maria
VCN-GA2	Válvula Controladora do Reservatório de Santa Maria
V-Transf	Válvula Controladora da transferência para área central

A captação de água para abastecimento é feita no Rio Descoberto, na divisa do Distrito Federal com o Estado de Goiás, junto ao município de Águas Lindas de Goiás. Na margem esquerda do lago formado pelo barramento está situada a estação elevatória de água bruta, responsável pelo recalque até a estação de tratamento. A elevatória está equipada com cinco conjuntos de bombeamento, que totalizam 44.000 cv de potência instalada, sendo 33.000 cv em operação e 11.000 cv em reserva.

Partindo da elevatória, a água é bombeada para a estação de tratamento, que fica distante cerca de 14 km do ponto de captação. Após o tratamento, toda vazão é destinada ao Reservatório Apoiado M Norte 1 (RAP.MN1). Partindo desse reservatório, parte da água tratada segue por bombeamento para outros dois reservatórios de distribuição. O primeiro deles é denominado Reservatório Apoiado M Norte 2 (RAP.MN2), que fica dentro da própria área da estação de tratamento e abastece as cidades de Taguatinga e Ceilândia. O segundo é chamado Reservatório Apoiado de Ceilândia (RAP.CE1), que abastece a cidade de Ceilândia. Cada um desses dois reservatórios possui elevatórias tipo *booster* para atendimento das respectivas zonas altas.

O restante da água tratada segue por gravidade do Reservatório M Norte 1 até o Reservatório Apoiado de Taguatinga Sul (RAP.TS1). Nesse caminho existem algumas derivações que abastecem as localidades de Taguatinga, Vicente Pires e Guará, além do reforço de abastecimento da área central de Brasília. Na derivação para Vicente Pires existe uma estação elevatória responsável pelo recalque para o Reservatório Apoiado de Vicente Pires (RAP.VP1), que por sua vez atende a localidade de mesmo nome. Nas demais derivações o abastecimento é feito por gravidade, diretamente na rede de distribuição (abastecimento em marcha).

A partir do RAP.TS1 o abastecimento é feito por gravidade para as regiões de Águas Claras e Núcleo Bandeirante. Também a partir desse reservatório, a água segue por bombeamento por duas adutoras principais para outros reservatórios de distribuição. Uma dessas adutoras abastece os Reservatórios Apoiados 1 e 2 de Samambaia (RAP.SA1 e RAP.SA2), que atendem a localidade de Samambaia. Em Samambaia, o Reservatório Apoiado de Samambaia 1 é atendido por bombeamento, sem que haja válvula de controle na entrada da unidade. Já o Reservatório Apoiado de Samambaia 2 é abastecido por gravidade e possui válvula de controle na entrada.

Pela outra adutora são abastecidos diversos outros reservatórios que atendem suas respectivas regiões de influência. Esses reservatórios são os seguintes:

- Reservatório Apoiado do Recanto das Emas (RAP.RE1);
- Reservatório de Equalização do Gama (REQ.GA1);
- Reservatório Gama 1 (RAP.GA1);
- Reservatório Gama 2 (RAP.GA2);
- Reservatório Apoiado do Park Way (RAP.PW1);
- Reservatório Apoiado Sítio do Gama (RAP.SG1);

- Reservatório Apoiado de Santa Maria (RAP.ST1).

Ainda em relação ao RAP.TS1, cabe detalhar que há uma elevatória responsável pelo atendimento da zona alta e que também alimenta o Reservatório Apoiado do Riacho Fundo (RAP.RF1), que por sua vez atende a localidade do Riacho Fundo.

4.1.1.1 - Energia elétrica

O sistema em estudo possui cinco unidades consumidoras de energia elétrica, onde estão instaladas as 10 estações elevatórias que compõem o problema de otimização. Cada unidade possui o seu próprio contrato de fornecimento, com características que podem ou não ser comuns a mais de uma unidade. Em 2012 essas unidades consumiram um total aproximado de 160 milhões de kWh, com um custo total de 32 milhões de reais.

As unidades consumidoras, suas respectivas elevatórias e as características do fornecimento de energia elétrica estão detalhadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Tarifa de energia elétrica por elevatória analisada

Unidade Consumidora	Elevatória	Tipo de Contrato	Tarifa Consumo (R\$/kWh)		Tarifa Demanda (R\$/kW)	
			Fora de Ponta	Ponta	Fora de Ponta	Ponta
Elevatória Rio Descoberto	EAB.RD1	THS Azul ²	0,16325	0,25640	2,5022	17,7837
Complexo M Norte	EAT.MN1	THS Azul	0,16325	0,25640	7,0471	28,2395
	EAT.MN2					
	EAT.MN3					
	EAT.MN4					
Antiga ETA Taguatinga	EAT.MN5	THS Verde ³	0,16325	0,91231	7,0471	
Reservatório de Taguatinga Sul	EAT.TS1	THS Azul	0,16325	0,25640	7,0471	28,2395
	EAT.TS2					
Elevatória de Vicente Pires	EAT.TS3	THS Verde	0,16325	0,91231	7,0471	

O código de otimização construído para o trabalho é capaz de calcular o consumo de energia (kWh) e o custo da energia consumida (R\$) para cada bomba do sistema a cada hora do dia, separando os horários de ponta e fora de ponta. O código também calcula, para cada unidade consumidora, a demanda máxima de energia (kW) e o custo dessa demanda (R\$), separando os horários de ponta e fora de ponta. Para os cálculos do custo total de energia elétrica devem ser

² Tarifa horo-sazonal azul conforme resolução 456/2000 Aneel

³ Tarifa horo-sazonal verde conforme resolução 456/2000 Aneel

somadas as parcelas referentes ao consumo e à potência máxima demandada. O custo do consumo (CC) e o custo da demanda (CD) para as tarifas horo-sazonais verde e azul são definidos conforme as equações a seguir:

$$CC = \text{Consumo}_{\text{ponta}} \times TC_{\text{ponta}} + \text{Consumo}_{\text{fponta}} \times TC_{\text{fponta}} \quad \text{Equação (4.1)}$$

$$CD_{\text{azul}} = \text{Demanda}_{\text{ponta}} \times TD_{\text{ponta}} + \text{Demanda}_{\text{fponta}} \times TD_{\text{fponta}} \quad \text{Equação (4.2)}$$

$$CD_{\text{verde}} = \text{Demanda} \times TD_{\text{verde}} \quad \text{Equação (4.3)}$$

Em que:

CC: custo de consumo de energia (tarifas verde e azul);

CD_{azul}: custo de demanda de energia na tarifa horo-sazonal azul;

CD_{verde}: custo de demanda de energia na tarifa horo-sazonal verde;

Consumo_{ponta}: energia consumida no horário de ponta;

Consumo_{fponta}: energia consumida no horário fora de ponta;

Demanda_{ponta}: potência máxima demandada no horário de ponta;

Demanda_{fponta}: potência máxima demandada no horário fora de ponta;

Demanda: potência máxima demandada em todo o período de medição;

TC_{ponta}: tarifa de consumo no horário de ponta;

TC_{fponta}: tarifa de consumo no horário fora de ponta;

TD_{verde}: tarifa de demanda da modalidade tarifária verde;

TD_{ponta}: tarifa de demanda no horário de ponta na modalidade tarifária azul;

TD_{fponta}: tarifa de demanda no horário fora de ponta na modalidade tarifária azul.

Para o cálculo da função aptidão, o custo de energia elétrica é calculado pelo consumo de 24h de operação somado à demanda mensal de energia dividida por trinta. A divisão do valor do custo da demanda é feita para representar a parcela diária desse custo, uma vez que a demanda de energia corresponde a um valor mensal.

4.1.1.2 - Operação do sistema e disponibilidade de dados

Dentro das formas de operação definidas no item 3.2, a operação adotada no sistema Descoberto pode ser classificada como centralizada com acionamentos remotos. Nessa modalidade, quase todo o sistema é operado à distância por meio de um centro de controle operacional (CECOP), que monitora as informações de campo e atua no acionamento de bombas e válvulas. Para que isso ocorra, existe um sistema SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) que recebe informações em tempo real. As informações são transmitidas por uma rede de comunicação via rádio, de uso exclusivo da CAESB. As principais informações recebidas são os níveis de reservatórios e os *status* de bombas e válvulas. Em relação ao monitoramento das vazões, diversos pontos do sistema são medidos, mas poucos transmitem dados ao CECOP.

Além de receber informações, o CECOP também dispõe de comando à distância em grande parte das bombas e válvulas. Nos casos dos equipamentos que não dispõem desse tipo de controle, o acionamento é feito por operadores locais que recebem as orientações por rádio ou telefone.

Os dados recebidos pelo sistema SCADA não são armazenados de forma estruturada em bancos de dados, o que dificulta bastante o acesso às informações. Em relação aos dados de vazão, como poucos são transmitidos, é comum que essas informações sejam lidas manualmente nos próprios equipamentos de campo, para só então serem armazenadas e transcritas em arquivos de computador. Como os medidores de vazão não estão equipados com registradores de dados (*data loggers*), somente é possível registrar o volume de água medido durante um determinado intervalo de funcionamento, para então calcular a vazão média entre os períodos de leitura. Normalmente os volumes são lidos semanalmente, ou mensalmente, e em seguida é calculada a vazão média do período.

Portanto, é importante destacar que os dados de vazão com intervalos horários não estão disponíveis, mas apenas os valores médios, normalmente com periodicidade semanal ou mensal. Essa condição dificulta bastante a modelagem hidráulica em tempo estendido, principalmente em relação ao estabelecimento de padrões temporais de consumo. Também dificulta o desenvolvimento de modelos de otimização para geração de regras operacionais de curto prazo, pois praticamente inviabiliza o funcionamento de modelos de previsão de demanda.

Para contornar essa dificuldade e possibilitar ao menos o estabelecimento de curvas de referência do comportamento horário dos consumos, a área de monitoramento da CAESB possui em algumas localidades registros horários das vazões de abastecimento. Esses registros foram feitos por sete dias para que se conhecesse o padrão típico de consumo durante a semana.

Esses valores medidos em campo foram utilizados no modelo hidráulico para determinar os padrões de variação temporal do consumo. Nas áreas onde não há registros de valores horários utilizou-se os dados de áreas com características semelhantes. Os valores normalizados dos padrões de consumo utilizados são apresentados no Apêndice A.

4.1.2 - Construção e adequação do modelo hidráulico

Por se tratar de um trabalho que propõe a definição de regras operacionais otimizadas para o funcionamento de bombas e válvulas, optou-se por utilizar um modelo de simulação hidráulica que fosse capaz de representar o comportamento dos elementos do sistema adutor, mas que simplificasse a representação das redes de distribuição.

Sendo assim, o modelo hidráulico utilizado deve ser capaz de simular o fluxo de água das captações até os reservatórios de distribuição, passando por unidades de tratamento, elevatórias, adutoras, porém simplificando a representação das redes de distribuição. Essas foram representadas por nós de consumo ligados diretamente às unidades que as abastecem, normalmente reservatórios ou *boosters*. Nos nós de consumo foram alocadas as demandas das áreas atendidas e os respectivos padrões de variação horária.

Para os cálculos das perdas de carga optou-se por adotar a fórmula de Darcy-Weisbach. Essa opção pode ser selecionada nas configurações do EPANET e foi utilizada por ser considerada mais precisa que a equação empírica de Hazen-Williams, o que é importante em estudos de operação de sistemas adutores.

Para verificação da continuidade do fornecimento de água, os nós de consumo foram posicionados na mesma cota das respectivas unidades de abastecimento e foram ligados à elas por um trecho fictício de tubulação com pequeno comprimento e diâmetro elevado (Figura 4.4). A intenção foi fazer com que não houvesse perda de carga significativa entre as unidades de abastecimento e os respectivos nós de consumo. Assim, a pressão nos nós deve ser afetada apenas por falha no processo de adução, sem interferência das perdas de carga na distribuição.

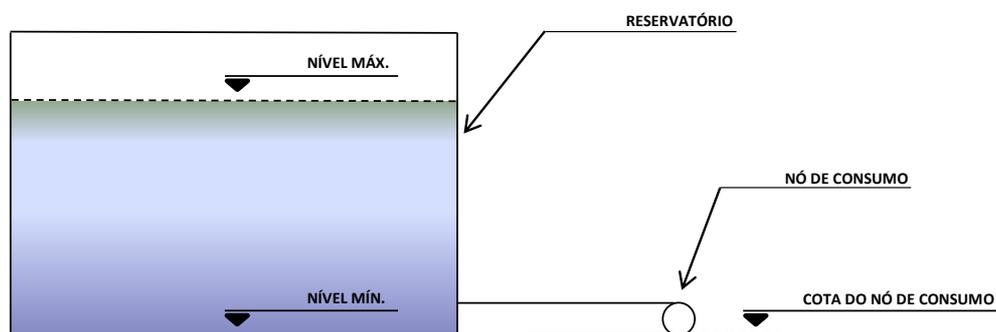


Figura 4.4 - Representação de um nó de consumo ligado a um reservatório apoiado

Deve-se ressaltar, que em alguns casos, as redes de distribuição são atendidas diretamente por adutoras, sem que se utilize um reservatório para amortecer as vazões máximas horárias de abastecimento. Nessas situações, as redes de distribuição são representadas por nós de consumo ligados diretamente aos pontos das adutoras onde situam-se as derivações. As cotas utilizadas nesses casos são as observadas no ponto de derivação da adutora.

O modelo hidráulico do sistema Descoberto utilizado no trabalho foi baseado em um modelo construído em 2008 e que já havia sido calibrado e utilizado pela área de planejamento e controle operacional da CAESB. O processo de construção se deu com a importação dos dados cadastrais, incluindo as informações de cotas e diâmetros das tubulações. Também foram representados os reservatórios de distribuição, as estações de bombeamento, as válvulas e os nós de demanda. Assim, por já existir um modelo hidráulico com as características necessárias ao

desenvolvimento do trabalho, e que já havia sido testado e calibrado, optou-se por não construir novamente um modelo de simulação, mas sim utilizar o existente com as atualizações e adequações necessárias.

Para a adequação, foram revistas as ligações dos nós de demanda com suas respectivas unidades de abastecimento, para que representassem da melhor forma possível a configuração atual do sistema. Essa revisão também buscou compatibilizar as áreas de abastecimento com as informações dos medidores de vazão instalados em campo, com o objetivo de alocar com maior precisão os dados de consumo. Também foram revistas e atualizadas as curvas de funcionamento e de rendimento das bombas, além de alterações em válvulas e reservatórios.

Com relação aos valores de consumo adotados no problema, optou-se por utilizar os valores médios mensais do mês de março de 2012. Essa escolha se deu por se tratar de um mês que normalmente apresenta comportamento bastante semelhante à média anual. As curvas de demanda típicas utilizadas no modelo são referentes ao comportamento de um dia útil da semana.

Assim, manteve-se a proposta de trabalhar com um modelo de otimização que gere regras operacionais para uma condição média de funcionamento, uma vez que os consumos médios das 24 h simuladas se assemelham aos consumos médio anuais e os padrões de variação temporal seguem as condições observadas na maioria dos dias do ano (dias úteis).

De forma resumida, o modelo apresenta 273 nós (*nodes*), sendo: 23 reservatórios de nível variável (*tanks*), 1 reservatório de nível fixo (*reservoir*) e 35 nós de consumo. Possui também 331 trechos (*links*), sendo: 267 trechos de tubulação (*pipe/CVpipe*), 47 bombas (*pumps*) e 17 válvulas (*valves*).

Os principais dados cadastrais utilizados na construção do modelo hidráulico, tais como elevatórias, bombas, válvulas, reservatórios, e nós de consumo, bem como suas principais características, são apresentados no Apêndice A.

4.1.3 - Calibração

Depois da adequação e atualização do modelo hidráulico foi necessária uma etapa de calibração para avaliar se o comportamento representaria de maneira satisfatória o funcionamento do sistema real.

Para calibrar o modelo hidráulico, optou-se por utilizar uma simulação em tempo estendido, com duração de 24 horas, aplicando-se nessa simulação uma regra operacional conhecida que já tivesse sido utilizada no sistema real.

Foi utilizado o procedimento iterativo de calibração, variando-se manualmente os parâmetros de perda de carga, curvas de bomba e padrões de consumo. Entende-se que apesar de mais demorado, a experiência já adquirida na operação do sistema pode possibilitar bons resultados com a adoção desse procedimento.

Diferentemente do que se costuma observar nos processos de calibração de redes de distribuição, a calibração do modelo em estudo não considerou como um fator preponderante a rugosidade dos tubos. Por se tratar do funcionamento de um sistema de adução, onde predominam tubulações com diâmetros elevados (acima de 300 mm), os valores de rugosidade relativa (ϵ/D) acabam sendo baixos. Assim, adotou-se, para praticamente todas as tubulações, o valor de rugosidade absoluta (ϵ) de 0,04, conforme indicação de Porto (2006) para tubos novos de aço laminado.

Como forma a compensar a simplificação adotada na consideração das rugosidades das tubulações, os valores de perda de carga localizada das válvulas de controle foram ajustados com maior atenção para tentar reproduzir o comportamento hidráulico do sistema. Assim, em um trecho de tubulação em que exista uma válvula de controle, a possível minoração na rugosidade do tubo pode ser compensada pela majoração do coeficiente de perda de carga localizada da válvula, de maneira que a perda de carga global do trecho no modelo simulado seja equivalente ao sistema real.

Outro parâmetro que mereceu atenção no processo de calibração foi a configuração dos padrões horários de demanda, principalmente em razão de não se conhecer os valores reais das vazões horárias. Os valores de demanda são obtidos pelos medidores de vazão instalados em campo e fornecem dados de volume aduzido por períodos semanais ou mensais, porém não é possível obter o real comportamento horário dessas vazões. Por isso, o modelo considerou padrões horários normalizados de consumo em cada região estudada. Esses padrões foram estabelecidos em momentos anteriores ao desenvolvimento do trabalho, por meio de medições de campo, de forma que a estimativa de vazão horária pudesse ser obtida multiplicando-se os valores médios de vazão pelos valores normalizados dos padrões de consumo.

O fato do sistema estudado não possuir registros horários de vazão, somente médias mensais (ou semanais), também acabou dificultando o processo de calibração. Essa dificuldade se deu principalmente porque o modelo trabalha com consumos médios de um determinado mês e está submetido a regras operacionais de um determinado dia. Assim, não há como garantir que o dia escolhido para calibração tenha tido consumos correspondentes aos consumos médios utilizados.

Para tentar amenizar esse problema, buscou-se utilizar na calibração as regras operacionais de um dia típico, com características de consumo próximas às médias mensais. Dentro dessa premissa, evitou-se a escolha de dias que normalmente apresentam consumos atípicos, como finais de semana e feriados. Foram evitados também as segundas e sextas-feiras, que

normalmente sofrem influência dos finais de semana nos seus comportamentos. Sendo assim, restaram os dias de terça, quarta e quinta-feira para serem analisados.

Lembrando que foram utilizados no modelo os valores de consumo médio do mês de março de 2012, buscou-se então, dentro desse mês, os dias que poderiam fornecer as regras de operação a serem utilizadas na calibração. Considerando que foram descartados os finais de semana, as segundas e as sextas-feiras, observou-se nos demais dias aqueles que não apresentaram problemas operacionais, como interrupções de abastecimento e paradas de manutenção. Dentre os dias que restaram, foi escolhido o dia 28 de março, uma quarta-feira. Essa data se mostrou bem adequada, pois além de atender as condições anteriores, apresentou temperatura média diária próxima à média do mês e também não foram observados eventos de precipitação nessa data. Essas características fazem crer que os consumos dos nós de demanda no dia escolhido se aproximam do valor médio do mês.

Após a escolha do dia que representasse as condições médias de funcionamento do sistema, o processo de calibração propriamente dito foi feito de forma manual, por tentativa e erro, alterando-se os valores dos coeficientes de perda de carga das adutoras e das válvulas e também ajustando-se os padrões de consumo, até que o modelo obtivesse os valores dos níveis dos reservatórios próximos aos reais.

Para avaliar a qualidade do resultado da calibração utilizou-se duas medidas: erro médio absoluto (MAE) e coeficiente de correlação (r). Como parâmetro de comparação adotou-se os níveis dos reservatórios de abastecimento, com intervalos de trinta minutos, em todo período simulado. Portanto, a calibração será considerada exitosa quando o modelo hidráulico, submetido aos mesmos comandos do sistema real, apresentar níveis de reservatórios comparáveis aos observados na realidade.

Em virtude do modelo já ter sido calibrado e utilizado em situações anteriores, passando por uma revisão e adequação para o uso no presente trabalho, optou-se por não realizar o processo de validação. Tal decisão foi tomada considerando-se que, no caso em estudo, apenas o processo de calibração já seria suficiente para garantir boa precisão.

4.2 - OTIMIZAÇÃO

Para o processo de otimização, optou-se por adotar a técnica de algoritmos genéticos. Essa opção foi baseada em diversas características desse método de busca, incluindo a capacidade de tratar problemas complexos, de grandes dimensões e com presença de variáveis discretas (variáveis binárias). Também foi decisivo para escolha do uso de AG a possibilidade de acoplamento do processo de busca com processo de simulação hidráulica. Diversos autores citam essas características dos AGs como aspectos positivos da sua utilização, incluindo Wu e Simpson

(2001), Mackle *et al.* (1995), van Zyl *et al.* (2004), Ranjithan (2005), Rani *et al.* (2013), entre outros.

Neste item serão apresentadas as características do algoritmo de otimização, as variáveis envolvidas, a função objetivo e as restrições impostas, além das características dos aspectos que envolvem o processo de busca.

4.2.1 - Delimitação do problema e definição das variáveis de decisão

De forma geral, o problema de otimização abordado consiste em encontrar, dentro de um universo de soluções existentes, aquela que melhor atenda as condições definidas pela função aptidão.

No problema em estudo, o universo de soluções existentes é composto por diversas regras de operação, em que cada regra define o estado de funcionamento de cada elemento do sistema (bombas e válvulas), a cada hora do horizonte simulado. Portanto, pode-se definir uma regra de operação como o conjunto de variáveis que ditam o estado de cada elemento comandável, em cada passo de tempo do horizonte analisado. Dessa forma, cada possibilidade de operação é um indivíduo da população do algoritmo genético de otimização.

Sendo assim, as variáveis de decisão que compõem uma solução do problema podem ser escritas de forma geral como o conjunto de controles aplicados às bombas $x_{bt} = (x_{1t}, x_{2t}, x_{3t}, \dots, x_{Bt})$ e válvulas $y_{vt} = (y_{1t}, y_{2t}, y_{3t}, \dots, y_{Vt})$, a cada passo de tempo, onde B representa o número de bombas; V o número de válvulas; e $t = 1, \dots, T$ cada intervalo de tempo do período de simulação T .

Deve-se destacar que nem todas as bombas e válvulas que compõem o sistema de abastecimento em estudo foram consideradas variáveis de decisão do problema. Conjuntos de bombeamento e válvulas de controle que operam de forma automática, com comandos ditados por valores pressão ou nível, não foram incluídos. Assim, o modelo hidráulico simulou o funcionamento desses equipamentos de acordo com as regras pré-definidas, não dependendo diretamente das regras encontradas pelo modelo otimizador. Outro caso em que os equipamentos não foram considerados variáveis de decisão diz respeito aos conjuntos reservas das estações de bombeamento. Esses permaneceram sempre desligados durante os processos de simulação hidráulica.

Na Figura 4.3 o esquema hidráulico do sistema de abastecimento mostra em vermelho os elementos que são considerados variáveis do problema e em preto todos os demais. Já a Tabela 4.3 apresenta as variáveis de decisão do problema, juntamente com as unidades as quais estão vinculadas e suas principais características.

Tabela 4.3 - Variáveis de decisão do problema

Item	Unidade	Variáveis de decisão	Tipo	Potência / Diâmetro
1	Elevatória de Água Bruta do Rio Descoberto (EAB.RD1)	EAB.RD1_B2	Bomba	5.500 cv
2		EAB.RD1_B3	Bomba	11.000 cv
3		EAB.RD1_B4	Bomba	5.500 cv
4		EAB.RD1_B5	Bomba	11.000 cv
5	Elevatória de Água Tratada M.Norte 1 (EAT.MN1)	EAT.MN1_B1	Bomba	375 cv
6		EAT.MN1_B2	Bomba	375 cv
7	Elevatória de Água Tratada M.Norte 2 (EAT.MN2)	EAT.MN2_B1	Bomba	200 cv
8		EAT.MN2_B2	Bomba	200 cv
9	Elevatória de Água Tratada M.Norte 3 (EAT.MN3)	EAT.MN3_B1	Bomba	375 cv
10		EAT.MN3_B2	Bomba	375 cv
11	Elevatória de Água Tratada M.Norte 4 (EAT.MN4)	EAT.MN4_B1	Bomba	150 cv
12		EAT.MN4_B2	Bomba	150 cv
13	Elevatória de Água Tratada M.Norte 5 (EAT.MN5)	EAT.MN5_B1	Bomba	100 cv
14	Elevatória de Água Tratada M.Norte 6 (EAT.MN6)	EAT.MN6_B1	Bomba	100 cv
15		EAT.MN6_B2	Bomba	100 cv
16	Elevatória de Água Tratada de Vicente Pires (EAT.VP1)	EAT.VP1_B1	Bomba	150 cv
17		EAT.VP1_B2	Bomba	150 cv
18	Elevatória de Água Tratada de Taguatinga Sul 1 (EAT.TS1)	EAT.TS1_B1	Bomba	550 cv
19		EAT.TS1_B2	Bomba	550 cv
20	Elevatória de Água Tratada de Taguatinga Sul 2 (EAT.TS2)	EAT.TS2_B1	Bomba	800 cv
21		EAT.TS2_B2	Bomba	800 cv
22		EAT.TS2_B3	Bomba	800 cv
23	Válvula de Entrada do Reservatório de Taguatinga Sul	TCV-TS1	Válvula	2x 800 mm
24	Válvula Controladora de Vazão para Samambaia	TCV-SG10	Válvula	1000 mm
25	Válvula de Entrada do Reservatório Samambaia 2	TCV-SA2	Válvula	400 mm
26	Válvula de Entrada do Reservatório Riacho Fundo	VCN-RF1	Válvula	250 mm
27	Válvula de Entrada do Reservatório Recanto das Emas	TCV-RE1	Válvula	400 mm
28	Válvula de Entrada do Reservatório Park Way	TCV-PW1	Válvula	250 mm
29	Válvula de Entrada do Reservatório Sítio do Gama	TCV-SG1	Válvula	150 mm
30	Válvula de Entrada do Reservatório Santa Maria	VCN-ST1	Válvula	350 mm
31	Válvula de Entrada do Reservatório Gama 1	VCN-GA1	Válvula	250 mm
32	Válvula de Entrada do Reservatório Gama 2	VCN-GA2	Válvula	250 mm

Da mesma forma o modelo não considerou alguns equipamentos (bombas e válvulas) como variáveis de decisão do problema, também não realizou a análise de nível dos reservatórios elevados. Essa condição foi adotada em função dessas estruturas operarem com volume de reservação desprezível e com operação automatizada, que depende somente da programação pré-definida das bombas que os abastecem. Assim, o nível desses reservatórios não deve ser afetado diretamente pelas regras definidas pelo modelo otimizador, mas sim por regras pré-fixadas.

A operação dos reservatórios elevados do sistema Descoberto presta-se somente à adequação das pressões na rede de distribuição. Ou seja, essas unidades, em conjunto com os sistemas de bombeamento que os abastecem, acabam fazendo a mesma função dos *boosters* utilizados para pressurização de rede.

A otimização operacional é realizada para um dia médio de funcionamento, simulando o período de operação entre 0h e 24h. O perfil de consumo adotado é o característico de um dia útil de semana e o cálculo do custo de energia também leva em conta a estrutura tarifaria dos dias úteis, com horário de ponta entre as 18 e 21 horas.

O modelo de otimização não teve o propósito de avaliar qual a modalidade tarifaria de energia elétrica é mais vantajosa em cada unidade de consumo. A proposta se restringe a encontrar a regra de operação mais vantajosa dentro das condições de fornecimento de energia em vigor no mês de março de 2012, conforme Tabela 4.2. Assim, as tarifas e as condições de fornecimento de energia são condições de contorno do problema e não estão sujeitas a alteração.

4.2.1.1 - Codificação das soluções

Na técnica de otimização por algoritmos genéticos, cada solução do problema representa um indivíduo na população analisada, e cada indivíduo é representado por um código que o identifica, também chamado de cromossomo. Esse código pode ser representado de várias maneiras. No presente trabalho optou-se por utilizar uma representação vetorial, de uma única dimensão, composta por valores binários.

Quase todos os equipamentos representados no problema podem assumir somente as posições de ligado/desligado (no caso de bombas), ou aberto/fechado (no caso de válvulas). As exceções são as válvulas TCV-TS1 e TCV-SG10 (ver Figura 4.3) que, no sistema real, podem assumir posições intermediárias com objetivo de regulação de vazão. Porém, por motivo de simplificação, optou-se por considerar, também para esses equipamentos, somente acionamentos simplificados, operando nas posições totalmente aberta ou fechada.

Na condição descrita, o uso da codificação binária com valores de 0 e 1 torna-se bastante favorável. Assim, para codificar as soluções do problema utilizou-se um vetor de P posições, onde cada posição representa a condição de uma variável em uma determinada hora, podendo assumir o valor de 0 ou 1. O comprimento do vetor (conjunto de bombas e válvulas) pode ser escrito como $P = (B+V)*T$, onde B é o número de bombas que são variáveis do problema, V é o número de válvulas que são variáveis do problema e T é o horizonte de tempo da otimização. A Figura 4.5 apresenta um exemplo de codificação binária para um problema contendo três bombas e duas válvulas em um período de otimização T .

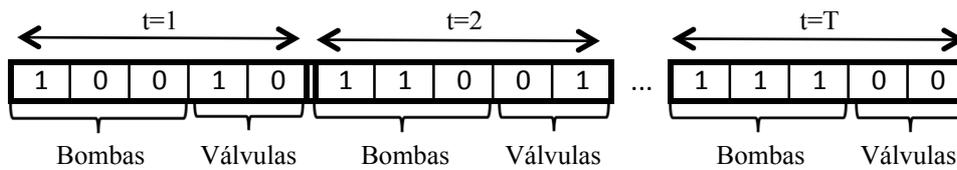


Figura 4.5 - Vetor solução com três bombas, duas válvulas e período de otimização T

Como o problema abordado possui 22 bombas e 10 válvulas definidas como variáveis de decisão e um horizonte de otimização de 24 horas, logo, o código que representa a solução é um vetor de 768 posições, cada uma delas podendo assumir o valor de 0 ou 1.

4.2.2 - Função aptidão

A função aptidão aplicada ao problema de otimização por algoritmos genéticos em geral é a medida utilizada para avaliar a qualidade de cada solução encontrada.

Para que os resultados encontrados apresentassem viabilidade de aplicação, empregou-se o Método das Penalidades (Mackle, 1995, Deb, 2000, Ribeiro 2005, Cunha 2009), segundo o qual as restrições são adicionadas à função objetivo, em termos de penalidades, convertendo o problema inicialmente irrestrito em um problema restrito. Dessa forma, a função aptidão é obtida pela adição das equações de penalidade à função objetivo original do problema.

Matematicamente o problema de minimização da função objetivo (FO) sujeita a restrições (R_r) é do tipo:

$$\text{Minimizar: } FO(X; Y), \quad \text{Equação (4.4)}$$

$$\text{Sujeito a: } R_r(X; Y; \tilde{N}; \tilde{P}) \geq 0, \quad r = 1, 2, \dots, n_r \quad \text{Equação (4.5)}$$

Em que:

FO: função objetivo;

X: matriz das bombas que são variáveis do problema;

Y : matriz das válvulas que são variáveis do problema;
 Rr : restrições do problema;
 \tilde{N} : vetor de níveis dos reservatórios;
 \tilde{P} : vetor das pressões nos nós de consumo;
 r : índice que representa cada restrição;
 nr : número de restrições.

A matriz X e a matriz Y são representadas da seguinte forma:

$$X = \begin{bmatrix} X_{(1,1)} & \cdots & X_{(1,t)} & \cdots & X_{(1,T)} \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ X_{(B,1)} & \cdots & X_{(B,t)} & \cdots & X_{(B,T)} \end{bmatrix} \quad \text{Equação (4.6)}$$

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{(1,1)} & \cdots & Y_{(1,t)} & \cdots & Y_{(1,T)} \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ Y_{(v,1)} & \cdots & Y_{(v,t)} & \cdots & Y_{(v,T)} \end{bmatrix} \quad \text{Equação (4.7)}$$

$$x_{(b,t)} = \begin{cases} 1, & \text{para bomba ligada} \\ 0, & \text{para bomba desligada} \end{cases}$$

$$y_{(v,t)} = \begin{cases} 1, & \text{para válvula aberta} \\ 0, & \text{para válvula fechada} \end{cases}$$

Em que:

$x_{(b,t)}$: estado de funcionamento da bomba b , no instante t ;

$y_{(v,t)}$: estado de funcionamento da válvula v , no instante t ;

$b = 1, \dots, B$;

$v = 1, \dots, V$;

$t = 1, \dots, T$;

b : índice que representa cada bomba do problema;

B : número total de bombas do problema;

v : índice que representa cada válvula do problema;

V : número total de válvulas do problema;

t : instante da simulação em análise;

T : período total de análise.

Aplicando-se o método das penalidades, a formulação inicial é transformada em:

$$\text{Minimizar: } aptF(X; Y; Rr) = FO(X; Y) + \sum_{r=1}^{nr} Rr(X; Y; \tilde{N}; \tilde{P}) \times Pr \quad \text{Equação (4.8)}$$

Em que:

$FO(X; Y)$: função objetivo original;

Rr : restrições do problema;

P_r : funções penalidade aplicadas;

r : índice que representa as restrições;

$apt F(X; Y; Rr)$: função aptidão (função objetivo modificada).

Para o problema abordado foram consideradas cinco restrições e para cada uma delas foi calculado um valor de penalidade. As restrições consideradas e os cálculos das penalidades estão descritos adiante. Dessa forma, a função aptidão para o problema em questão pode ser representada como:

$$apt F(X; Y; Rr) = FO(X; Y) + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 \quad \text{Equação (4.9)}$$

4.2.2.1 - Função objetivo

A função objetivo original ($FO(X; Y)$), sem adição de penalidades, é representada pelo custo total de energia elétrica (Cb), que por sua vez pode ser obtido pela soma da parcela de custo de consumo de energia elétrica de todas as bombas (CC) com o custo de demanda de todas as unidades consumidoras (CD). Como o sistema de abastecimento possui diferentes unidades consumidoras de energia e cada unidade possui um contrato de fornecimento que estabelece o tipo de tarifação e os valores cobrados pelo consumo e pela demanda, nos horários de ponta e fora de ponta, a equação de custo de bombeamento Cb , para um horizonte de tempo T , com B bombas, U unidades consumidoras e D períodos de tarifação, pode ser escrita da seguinte forma:

$$FO(X; Y) = Cb = \sum_{b=1}^B \sum_{t=1}^T CC_{(b, t)} + \sum_{u=1}^U CD_{(u)} \quad \text{Equação (4.10)}$$

$$CC_{(b, t)} = \frac{\gamma \times Q_{(b, t)} \times H_{(b, t)}}{\eta_{(b, t)}} \times \Delta t \times TC_{(b, t)} \times x_{(b, t)}$$

$$CD_{(u)} = \sum_{d=1}^D \text{Demanda}_{(u, d)} \times TD_{(u, d)}$$

$$\text{Demanda}_{(u, d)} = \max \left(\frac{\gamma \times Q_{(b, 1)} \times H_{(b, 1)}}{\eta_{(b, 1)}} \times x_{(b, 1)}; \frac{\gamma \times Q_{(b, 2)} \times H_{(b, 2)}}{\eta_{(b, 2)}} \times x_{(b, 2)}; \dots; \frac{\gamma \times Q_{(b, T)} \times H_{(b, T)}}{\eta_{(b, T)}} \times x_{(b, T)} \right)$$

Em que:

Cb : custo total de energia elétrica gasto com bombeamento;

$CC_{(b, t)}$: custo de consumo de energia elétrica da bomba b no período $t=1, \dots, T$;

u : índice da unidade consumidora em análise;

U : total de unidades consumidoras (elevatórias) do problema;

$CD_{(u)}$: custo total de demanda de energia elétrica da unidade consumidora u no período $t=1, \dots, T$;

γ : peso específico da água (N/m^3);

$Q_{(b, t)}$: vazão bombeada pela bomba b no instante t (m^3/s);

$H_{(b, t)}$: altura manométrica de bombeamento da bomba b no instante t (m);

$\eta_{(b, t)}$: rendimento da bomba b no instante t ;

Δt : intervalo de tempo entre $t-1$ e t (h);

$TC_{(b, t)}$: tarifa de consumo de energia elétrica da bomba b no período $t-1$ até t (R\$/Wh);

$x_{(b, t)}$: estado de funcionamento da bomba b , no instante t ;

d : índice que indica o período tarifário do dia (ponta ou fora de ponta);

D : número de períodos tarifário do dia;

$Demanda_{(u, d)}$: demanda de energia elétrica da unidade consumidora u no período tarifário d ;

$TD_{(u, d)}$: tarifa de demanda de energia elétrica da unidade consumidora u no período tarifário d (R\$/W).

Para o cálculo da demanda deve ser encontrado o maior valor de potência utilizada na unidade consumidora, em cada período tarifário do dia (horário de ponta e fora de ponta). O valor encontrado deve ser multiplicado pela respectiva tarifa de demanda para a respectiva unidade em análise ($TD_{(u, d)}$).

Como o modelo trata apenas da operação diária (24h) e o custo de demanda é um valor mensal, optou-se por dividi-lo por trinta de forma a representar a parcela diária do seu valor. Assim, a equação que calcula o custo total diário de bombeamento é:

$$C_b = \sum_{b=1}^B \sum_{t=1}^T (CC_{(b, t)}) + \sum_{u=1}^U \left(CD_{(u)} \times \frac{1}{30} \right) \quad \text{Equação (4.11)}$$

4.2.2.2 - Restrições

A busca por regras operacionais otimizadas de sistemas de abastecimento pode ser formulado como um problema de otimização sujeito a restrições implícitas e explícitas.

No problema em estudo, as restrições implícitas definem o equilíbrio estático do sistema hidráulico e correspondem à conservação de massa em cada nó e à conservação de energia no sistema. São representadas por um conjunto de equações (equações de perda de carga e continuidade) que são resolvidas implicitamente pelo simulador hidráulico.

As restrições explícitas correspondem às limitações de caráter físico e operacional que estão presentes no funcionamento do sistema. As limitações físicas englobam condições como a capacidade das bombas, os volumes de reservação e os limites de exploração dos mananciais. As limitações operacionais podem ser de diferentes tipos e procuram traduzir as condições impostas para a operação do sistema, como por exemplo: número máximo de acionamentos admitidos para um determinado equipamento; pressões positivas nos nós de consumo; nível mínimo de água aceitável em um determinado reservatório; etc.

As limitações operacionais, expressas em forma de restrições, associam ao problema as questões de confiabilidade e viabilidade operacional, possibilitando que um processo de otimização com objetivo único (redução de custo de energia) possa levar a uma solução aplicável ao sistema de abastecimento real. Assim, a solução resultante da otimização não será necessariamente a de menor custo, mas sim a que combine custos de energia otimizados com padrões de confiabilidade desejados.

Foram consideradas cinco restrições explícitas relativas ao funcionamento do sistema de abastecimento:

1. Pressão positiva nos nós de demanda;
2. Nível de água nos reservatórios acima do limite mínimo operacional;
3. Nível de água nos reservatórios abaixo do limite de extravasamento;
4. Número de acionamento de equipamentos menor que o limite máximo tolerado e variável conforme o porte dos equipamentos; e
5. Diferença entre os níveis iniciais e finais dos reservatórios menor que o limite tolerado.

4.2.2.3 - Penalidades

Para cada uma das restrições foi atribuída uma penalidade que será aplicada à função objetivo, conforme o Método das Penalidades descrito anteriormente. No cálculo das penalidades foram considerados coeficientes de multiplicação (pesos), para que fosse possível atribuir diferentes graus de penalização para cada restrição avaliada.

Para a Penalidade 4, foi feita uma subdivisão onde foram aplicados quatro coeficientes de multiplicação distintos, de acordo com o porte dos equipamentos. As penalidade e os respectivos coeficientes de multiplicação são explicados a seguir.

Penalidade 1 – Não atendimento das demandas

Essa penalidade visa a garantir a continuidade do fornecimento de água, eliminando as soluções que provoquem desabastecimento. Para o cálculo da penalidade, o algoritmo de otimização verifica a cada passo de tempo a pressão nos nós com demanda positiva. Caso seja encontrada alguma pressão negativa (ou igual a zero) o modelo multiplica a demanda do nó no instante

avaliado pelo coeficiente de penalidade λ_1 . Os valores da penalidade são acumulados a medida em que vão sendo encontradas pressões que não satisfazem a restrição. As equações de cálculo são as seguintes:

$$P_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^G (D_{(i,t)} \times \lambda_1 \times C1_{(i,t)}) \quad \text{Equação (4.12)}$$

$$C1_{(i,t)} = 0 \quad \text{se} \quad P_{(i,t)} > 0 \quad \text{Equação (4.13)}$$

$$C1_{(i,t)} = 1 \quad \text{se} \quad P_{(i,t)} \leq 0 \quad \text{Equação (4.14)}$$

Em que:

t : instante da simulação em análise;

T : período total de análise;

i : índice do nó de consumo em análise;

G : número total de nós de consumo analisados;

$D_{(i,t)}$: Demanda do nó i no instante t ;

λ_1 : coeficiente aplicado à Penalidade 1;

$C1_{(i,t)}$: condição para aplicação da Penalidade 1 em cada nó i a cada passo de tempo t ;

$P_{(i,t)}$: pressão do nó i no instante t .

A opção por utilizar o valor da demanda instantânea do nó de consumo para o cálculo da penalidade pode ser útil nos casos em que se admita a ocorrência de interrupção do abastecimento, pois pode-se assim diferenciar o valor das ocorrências de interrupção em horários e locais de alto e baixo consumo. Outra forma de aplicar essa penalidade seria a contagem simples das ocorrências de pressão negativa, com aplicação do mesmo valor de penalidade para todos os eventos, sem a diferenciação em relação à demanda do horário e do local. De qualquer forma, no trabalho optou-se por adotar um valor de λ_1 suficientemente grande para eliminar soluções com interrupção de abastecimento.

Penalidade 2 – Nível dos reservatórios abaixo do limite mínimo

A penalidade tem o objetivo de impedir que a solução escolhida resulte em níveis de reservatórios menores que os níveis mínimos operacionais. Essa condição, além de garantir a continuidade do abastecimento, também elimina soluções muito arriscadas sob o ponto de vista operacional. O limite mínimo de nível considerado para a aplicação dessa penalidade foi arbitrado em 10% do nível máximo de cada reservatório analisado, conforme as condições de operação normalmente observadas.

Para o cálculo foi realizada a verificação do nível de cada reservatório, a cada intervalo de tempo, e nos casos de valores inferiores ao limite estabelecido foi aplicado o coeficiente de penalidade λ_2 . As equações utilizadas para o cálculo da penalidade foram:

$$P_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^R (\lambda_2 \times C2_{(j,t)}) \quad \text{Equação (4.15)}$$

$$C2_{(j,t)} = 0 \quad \text{se} \quad N_{(j,t)} \geq 0,1 \times N_{j \max} \quad \text{Equação (4.16)}$$

$$C2_{(j,t)} = 1 \quad \text{se} \quad N_{(j,t)} < 0,1 \times N_{j \max} \quad \text{Equação (4.17)}$$

Em que:

t : instante da simulação em análise;

T : período total de análise;

j : índice do reservatório em análise;

R : número total de reservatórios analisados;

λ_2 : coeficiente aplicado à Penalidade 2 ;

$C2_{(j,t)}$: condição para aplicação da Penalidade 2 em cada reservatório j a cada passo de tempo t ;

$N_{(j,t)}$: nível do reservatório j no instante t ;

$N_{j \max}$: nível máximo do reservatório j .

Penalidade 3 – Nível dos reservatórios acima do limite máximo (extravasamento)

Da mesma forma da Penalidade 2, buscou-se neste caso eliminar as soluções que levassem os reservatórios a atingirem níveis de extravasamento. Para o cálculo, foi considerada a aplicação da penalidade nos casos em que os reservatórios atingissem 98% do nível real de extravasamento, que consta nos registros operacionais da CAESB. As equações utilizadas são similares às adotadas na Penalidade 2, sendo:

$$P_3 = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^R (\lambda_3 \times C3_{(j,t)}) \quad \text{Equação (4.18)}$$

$$C3_{(j,t)} = 0 \quad \text{se} \quad N_{(j,t)} \leq 0,98 \times N_{j \max} \quad \text{Equação (4.19)}$$

$$C3_{(j,t)} = 1 \quad \text{se} \quad N_{(j,t)} > 0,98 \times N_{j \max} \quad \text{Equação (4.20)}$$

Em que:

λ_3 : coeficiente aplicado à Penalidade 3 ;

$C3_{(j,t)}$: condição para aplicação da Penalidade 3 em cada reservatório j a cada passo de tempo t .

Penalidade 4 – Excesso de acionamentos

Uma solução, mesmo que viável sob o ponto de vista de atendimento das demandas e de manutenção dos níveis entre os limites máximos e mínimos dos reservatórios, ainda assim deve ser verificada quanto ao número de acionamentos dos componentes do sistema. Bombas e válvulas, quando excessivamente acionadas, têm suas durabilidades afetadas, comprometendo o bom funcionamento e a vida útil dos equipamentos. A aplicação desta penalidade foi feita somente para os equipamentos considerados variáveis de decisão do problema. As demais bombas e válvulas do sistema não foram analisadas.

Assim, para evitar soluções que levem a um número excessivo de acionamentos foi aplicada à função aptidão a Penalidade 4, que possui dois componentes distintos.

O primeiro componente é aplicado somente às bombas e penaliza todo e qualquer acionamento de desligamento, imputando na penalidade o valor de 1,5 vezes o gasto com consumo de energia daquela bomba na hora anterior ao desligamento. O objetivo neste caso é fazer com que o desligamento de uma bomba tenha um impacto maior na função aptidão que a manutenção do funcionamento dela por uma hora. Assim, em termos de custo de energia elétrica, o benefício de desligar uma bomba por apenas uma hora é inferior ao custo do próprio desligamento, o que, de maneira indireta, força o modelo de otimização a evitar soluções em que as bombas são desligadas por uma hora e religadas em seguida.

O segundo componente é aplicado tanto para bombas quanto para válvulas e visa a eliminar as soluções em que os equipamentos são acionados mais vezes do que um determinado número tolerado. Para isso, os equipamentos foram divididos em quatro grupos e para cada grupo foi estabelecido um limite máximo de acionamentos. No caso das bombas, a divisão dos grupos se deu conforme a potência do conjunto de bombeamento. No caso das válvulas, todas foram incluídas no grupo de bombas de menor potência. Para contagem do número de acionamentos foram considerados somente os eventos em que uma bomba, quando ligada, altera sua condição para desligada, ou em que uma válvula, quando aberta, altera sua condição para fechada.

Além de estabelecer valores diferentes para o número limite de acionamentos tolerados em cada grupo, também foram definidos coeficientes de penalidade diferentes em caso de violação desse limite. Por exemplo, caso um determinado elemento do grupo 1 ultrapasse o limite máximo de acionamentos, será aplicado o coeficiente de penalidade referente a esse grupo (λ_{4-g_1}). Caso outro elemento, de outro grupo, ultrapasse o limite será aplicado outro coeficiente, referente àquele grupo em questão.

Essa diferenciação teve o objetivo de tornar o problema menos restritivo, variando-se o limite de acionamentos e os coeficientes de penalidade conforme o porte dos equipamentos. Um exemplo desse conceito é o caso de uma solução em que um determinado conjunto de bombeamento de

100 cv ultrapasse o limite de quatro acionamentos. Mesmo não sendo uma condição desejável, pois há um equipamento que é acionado excessivamente, essa condição não pode eliminar totalmente a solução, sob pena de restringir muito o universo das soluções viáveis. O mesmo não se pode dizer de um equipamento de 11.000 cv, que, por ser de grande porte, não deve estar sujeito a um grande número de acionamentos. Assim, mesmo tendo um limite menor, de apenas um acionamento, uma solução que viole essa condição deverá ser descartada.

Portanto, os coeficientes de penalidade serão definidos de forma que as violações dos limites de acionamento nos grupos 1 e 2 sejam penalizados com valores altos, e as violações nos grupos 3 e 4 sejam penalizadas com valores menores. Para a definição dos valores dos coeficientes foi feita uma análise de sensibilidade.

A seguir é apresentada a Tabela 4.4 com a divisão dos grupos conforme o porte do equipamento.

Tabela 4.4 - Divisão dos equipamentos para aplicação da Penalidade 4

Grupos	Equipamentos	Limite de acionamentos	Coefficiente de penalidade
1	Bombas com potência de 11.000 cv	1	λ_4-g_1
2	Bombas com potência de 5.500 cv	2	λ_4-g_2
3	Bombas com potência entre 5.500 cv e 200 cv	3	λ_4-g_3
4	Bombas com potência igual ou menor a 200 cv e válvulas	4	λ_4-g_4

Na rotina de cálculo da Penalidade 4, o algoritmo verifica uma a uma as bombas e válvulas durante todo o horizonte de simulação. No caso das bombas, a cada desligamento é aplicado o valor do custo de consumo de energia daquele equipamento na hora anterior multiplicado por 1,5. Após verificada as 24 horas de simulação soma-se o número de acionamentos do elemento analisado e, caso seja maior que o limite estabelecido, soma-se também o valor do coeficiente λ_4-g_n , em que n é o número do grupo a que pertence o elemento em análise.

A penalidade pode ser descrita da seguinte forma:

$$P_4 = \sum_{b=1}^B \left[\left(\sum_{t=1}^T (1,5 \times CC_{(b,t-1)} \times A_{(b,t)}) \right) + (\lambda_4-g_n \times C4_b) \right] + \sum_{v=1}^V (\lambda_4-g_n \times C4_v) \quad \text{Equação (4.21)}$$

Para as bombas:

$$A_{(b,t)} = 1 \quad \text{se} \quad x_{(b,t)} = 0 \quad \text{e} \quad x_{(b,t-1)} = 1 \quad \text{Equação (4.22)}$$

$$A_{(b,t)} = 0 \quad se \quad \begin{cases} x_{(b,t)} = 1 \\ ou; \\ x_{(b,t)} = 0 \quad e \quad x_{(b,t-1)} = 0 \end{cases} \quad \text{Equação (4.23)}$$

$$NA_b = \sum_{t=1}^T A_{(b,t)} \quad \text{Equação (4.24)}$$

$$C4_b = 1 \quad se \quad NA_b > NA_{b \text{ lim}} \quad \text{Equação (4.25)}$$

$$C4_b = 0 \quad se \quad NA_b \leq NA_{b \text{ lim}} \quad \text{Equação (4.26)}$$

Para as válvulas:

$$A_{(v,t)} = 1 \quad se \quad y_{(v,t)} = 0 \quad e \quad y_{(v,t-1)} = 1 \quad \text{Equação (4.27)}$$

$$A_{(v,t)} = 0 \quad se \quad \begin{cases} y_{(v,t)} = 1 \\ ou; \\ y_{(v,t)} = 0 \quad e \quad y_{(v,t-1)} = 0 \end{cases} \quad \text{Equação (4.28)}$$

$$NA_v = \sum_{t=1}^T A_{(v,t)} \quad \text{Equação (4.29)}$$

$$C4_v = 1 \quad se \quad NA_v > NA_{v \text{ lim}} \quad \text{Equação (4.30)}$$

$$C4_v = 0 \quad se \quad NA_v \leq NA_{v \text{ lim}} \quad \text{Equação (4.31)}$$

Em que:

b : índice que representa cada bomba do problema;

B : número total de bombas do problema;

v : índice que representa cada válvula do problema;

B : número total de válvulas do problema;

t : instante da simulação em análise;

T : período total de análise;

$CC_{(b,t)}$: custo de consumo de energia elétrica da bomba b no período $t-1$ até t ;

λ_{4-g_n} : coeficiente aplicado à Penalidade 4 referente ao grupo de equipamento n ;

n : grupo a qual o equipamento analisado (bomba/válvula) pertence;

$C4_b$: condição para aplicação do coeficiente de penalidade λ_{4-g_n} em cada bomba b ;

$C4_v$: condição para aplicação do coeficiente de penalidade λ_{4-g_n} em cada válvula v ;

$A_{(b,t)}$: verificação da ocorrência de acionamento da bomba b no instante t ;

$A_{(v,t)}$: verificação da ocorrência de acionamento da válvula v no instante t ;

NA_b : quantidade total de acionamentos da bomba b ;

$NA_{b\ lim}$: quantidade limite de acionamentos tolerados para a bomba b ;
 NA_v : quantidade total de acionamentos da válvula v ;
 $NA_{v\ lim}$: quantidade limite de acionamentos tolerados para a válvula v ;

Penalidade 5 – Diferença entre os níveis inicial e final nos reservatórios

Esta penalidade tem como objetivo eliminar as soluções que, ao final do período de simulação, apresentem os níveis de água dos reservatórios mais baixos que um determinado limite que é estabelecido em função do nível inicial. Essa restrição é imposta para que o sistema preserve as condições hidráulicas iniciais e possibilite a viabilidade operacional dos períodos subsequentes ao simulado. Outro objetivo é garantir que sejam penalizadas as soluções que reduzam os custos de bombeamento simplesmente pela redução do volume total bombeado.

Para evitar que essa penalidade tornasse o problema excessivamente restritivo, foi estabelecido que a diferença, para baixo, entre o nível final e inicial pudesse ser de até 5% do nível máximo do reservatório. Assim, soluções que apresentem, ao final da simulação, níveis iniciais e finais com diferença superior a 5% do nível máximo, serão penalizadas. As equações adotadas no cálculo da Penalidade 5 são as seguintes:

$$P_5 = \sum_{j=1}^R ((N_{j\ final} - N_{j\ inicial}) \times \lambda_5 \times C5_j) \quad \text{Equação (4.32)}$$

$$C5_j = 0 \quad \text{se} \quad N_{j\ inicial} - N_{j\ final} \leq 0,05 \times N_{j\ max} \quad \text{Equação (4.33)}$$

$$C5_j = 1 \quad \text{se} \quad N_{j\ inicial} - N_{j\ final} > 0,05 \times N_{j\ max} \quad \text{Equação (4.34)}$$

Em que:

j : índice do reservatório em análise;

R : número total de reservatórios analisados;

$N_{j\ final}$: nível do reservatório j no instante final de simulação;

$N_{j\ inicial}$: nível do reservatório j no início da simulação;

$N_{j\ max}$: nível máximo do reservatório j ;

λ_5 : coeficiente aplicado à Penalidade 5;

$C5_j$: condição para aplicação da Penalidade 5 em cada reservatório j .

4.2.3 - Desenvolvimento do código computacional

O algoritmo de otimização foi desenvolvido utilizando linguagem de programação C++ com o uso do compilador *Microsoft Visual Studio Express 2012*. O desenvolvimento envolveu o uso dos códigos disponíveis na *Toolkit Library* do EPANET 2.0, através do arquivo Epanet2.dll (<http://www.epa.gov/nrmrl/wswrd/dw/epanet.html>), e dos arquivos que compõem a biblioteca de

algoritmos genéticos do MIT, que estão disponíveis em: <http://lancet.mit.edu/galib-2.4/>.

O código de otimização foi desenvolvido com base no trabalho de Cunha (2009) e apresenta a estrutura mostrada na Figura 4.6:

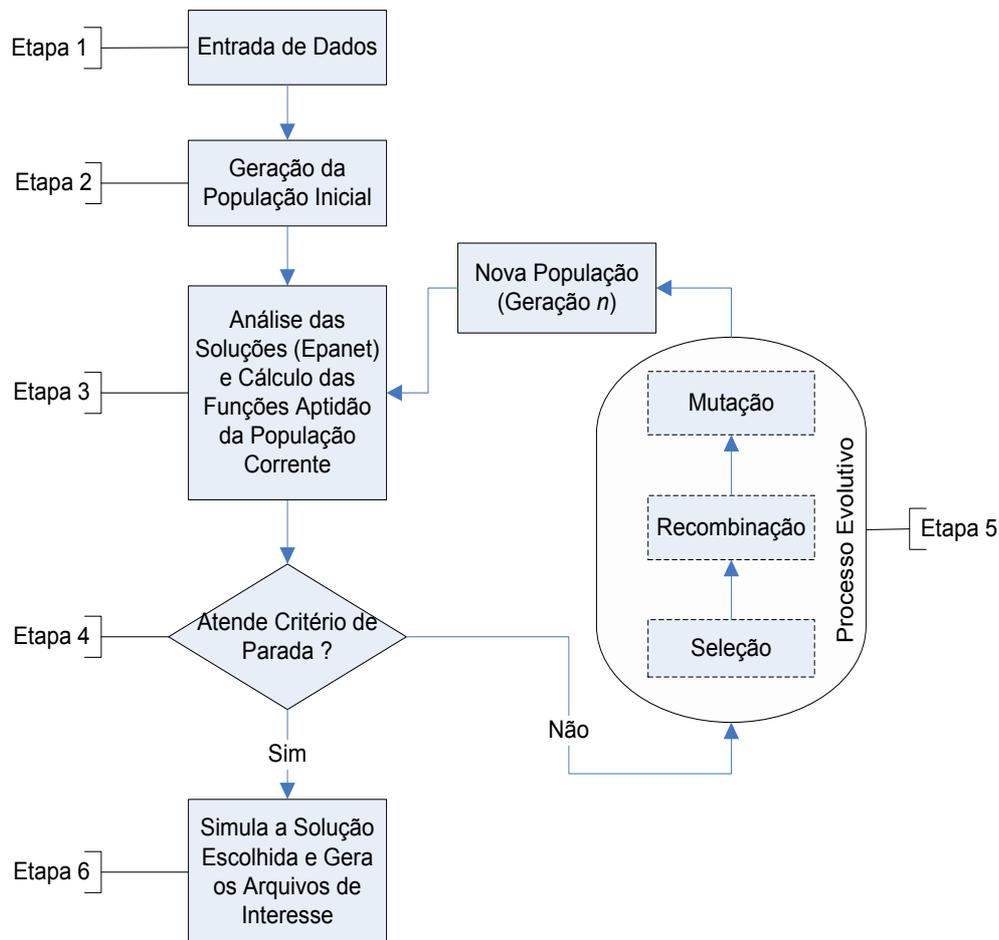


Figura 4.6 - Fluxograma do processo de otimização

Etapa 1 – Dados de Entrada

Consiste na entrada dos dados gerais que serão utilizados no processo de otimização. Para isso foram utilizadas duas rotinas diferentes. A primeira abre o arquivo de entrada do EPANET, conta o números de nós, de trechos e de reservatórios, e armazena os valores nas respectivas variáveis. A segunda rotina abre o arquivo texto, criado especificamente para a otimização, e também armazena os valores nas respectivas variáveis. O arquivo texto contém as seguintes informações:

- Parâmetros do algoritmo genético (tipo de seleção, tipo de cruzamento, probabilidade de cruzamento, tipo de mutação, probabilidade de mutação, tamanho da população, número de gerações, e semente aleatória);
- Coeficientes aplicados às penalidades;
- Número de variáveis do problema (bombas e válvulas);

- Identificação das variáveis do problema;
- Horizonte de tempo de simulação (número de horas);
- Níveis iniciais dos reservatórios.

Etapa 2 – Geração da População Inicial

Cria a população inicial do problema utilizando um gerador de números aleatórios que atribui o valor de cada gene do cromossomo. Nessa etapa define-se também as características do cromossomo utilizado e sua dimensão. No caso em estudo utilizou-se um vetor de valores binários com 768 posições, conforme descrito no item 4.2.1.1.

Etapa 3 – Análise das Soluções e Cálculo da Função Aptidão

Nessa etapa são feitas as análises hidráulicas e calculadas as funções aptidão das soluções (indivíduos) indicadas pelo AG. Para isso, o código de otimização abre novamente o arquivo de entrada do EPANET e grava nas respectivas variáveis os dados necessários para a realização da simulação.

No caso em análise, foram gravados os estados das bombas e válvulas em cada instante de simulação e também os níveis iniciais dos reservatórios. Os estados das bombas e válvulas são indicados pelo cromossomo gerado pelo AG, enquanto os níveis iniciais dos reservatórios são fornecidos pelo arquivo texto de entrada. A gravação desses dados é feita pelas funções específicas da *toolkit* do EPANET (*ENsetlinkvalue* e *ENsetnodevalue*), que atribuem valores desejados aos diversos parâmetros do modelo hidráulico.

Cabe ressaltar que, diferentemente do trabalho realizado por Cunha (2009), os valores de consumo horário não foram gravados pelo otimizador, mas incluídos diretamente no arquivo de entrada do EPANET (*Descoberto.inp*). Isso se justificou pelo fato de que o presente estudo simulou uma condição média de funcionamento, com valores de consumo conhecidos, que se mantiveram constantes no curso do processo de otimização e por isso poderiam constar no próprio modelo hidráulico, pois não precisariam ser modificados no decorrer da otimização. O mesmo raciocínio vale para os níveis iniciais dos reservatórios, porém nesse caso optou-se por ler esses valores pelo arquivo texto de entrada, o que facilitou a alteração para testes de análise de sensibilidade.

A execução da simulação hidráulica pelo modelo otimizador é feita pelo conjunto de funções, *ENopenH - ENinitH - ENrunH - ENnextH - ENcloseH*, que integram a *toolkit* de programação do EPANET. Essa forma de execução é indicada para os casos em que se pretende acessar dados parciais ao logo da simulação e é comumente utilizada nos estudos de otimização. O acesso às informações no decorrer da simulação é feita pela série de funções *ENgetlinkvalue* e *ENgetnodevalue*, que são aplicadas respectivamente aos trechos e nós do modelo.

No decorrer da simulação o algoritmo de otimização armazena as informações necessárias para o cálculo do custo de energia elétrica e do número de acionamentos. Ao final do processo é calculado o valor da função aptidão.

Etapa 4 – Avaliação do Critério de Parada

Após testar todas as soluções (indivíduos) da população corrente, o algoritmo de otimização verifica se o critério de parada já foi atingido. Para o presente trabalho foi adotado como critério de parada o número de gerações analisadas.

Etapa 5 – Aplicação dos Operadores Genéticos

Caso o critério de parada não tenha sido atingido, a população em análise é submetida aos operadores genéticos de maneira a formar uma nova população. No trabalho, optou-se pelo uso de uma versão de AG que não gera sobreposição (*overlapping*) de populações, classificada na *GAlib* como “Algoritmo Genético Simples”. Nessa versão de uso, o AG cria, a cada geração, uma população inteiramente nova que é descendente da população anterior. Optou-se nesse caso pelo uso do recurso de elitismo, que mantém na população seguinte o melhor indivíduo da população anterior.

Etapa 6 – Simulação da Solução Escolhida e Criação dos Arquivos de Dados

Após atingido o critério de parada, o melhor indivíduo até então encontrado é novamente simulado. Nessa nova simulação gera-se os arquivos em formato texto contendo as informações detalhadas de consumo de energia, níveis de reservatórios, acionamentos e possíveis violações das restrições.

O código utilizado no processo de otimização é apresentado no Apêndice B.

4.2.4 - Definição dos operadores genéticos e parâmetros do problema

O processo de otimização utilizando algoritmos genéticos envolve a aplicação de diversos parâmetros que regem o funcionamento do problema. Alguns desses parâmetros estão relacionados diretamente com as condições do sistema de abastecimento, como é o caso dos níveis iniciais dos reservatórios; outros interferem no cálculo da função aptidão, como os coeficientes aplicados às penalidades; outros definem os limites de busca do AG, como o tamanho da população e o critério de parada; e por fim existem os que regem o próprio funcionamento do processo de busca, como é o caso dos operadores genéticos (seleção, cruzamento, mutação) e suas probabilidades envolvidas.

Para os operadores genéticos, foram utilizados os tipos disponíveis na *GAlib* (Wall, 1996), que é a biblioteca de objetos de AGs disponibilizada pelo MIT – *Massachusetts Institute of Technology*.

Devido à facilidade de aplicação e possibilidade de uma avaliação mais minuciosa dos parâmetros à medida em que os valores são alterados, optou-se, no presente trabalho, pelo uso da técnica de análise de sensibilidade.

Diante da complexidade e do grande número de parâmetros envolvidos no problema, o processo de definição dos valores a serem utilizados foi dividido em duas etapas. A primeira envolveu uma análise qualitativa dos resultados obtidos e buscou os melhores valores para os parâmetros de critério de parada (número de gerações), tamanho de população e coeficiente de penalidade. Nessa etapa foram realizadas diversas otimizações com diferentes combinações entre os parâmetros avaliados. Foram adotados como critérios de definição, não só os valores de função aptidão, mas também os custos de energia, as violações das restrições e o tempos gastos nos processos de otimização. Durante essa fase, com exceção dos três parâmetros avaliados, todos os demais permaneceram constantes.

Após definidos os valores da primeira etapa, iniciou-se a segunda etapa de análise. Nessa fase os valores definidos na primeira etapa permaneceram constantes e os demais parâmetros foram avaliados. Foi adotado como critério de avaliação, somente o valor da função aptidão. As avaliações foram feitas parâmetro a parâmetro, de forma que a análise do parâmetro seguinte sempre utilizasse o valor determinado para o parâmetro anterior. Os parâmetros avaliados, os valores testados em cada um deles e a ordem de avaliação estão apresentadas na Tabela 4.5. Os valores apresentados em negrito foram adotados como valores padrão de cada parâmetro e foram inicialmente utilizados, tanto na primeira, quanto na segunda etapa de avaliação.

Tabela 4.5 - Parâmetros avaliados na segunda etapa

Ordem	Parâmetro	Valores testados
1	Nível inicial dos reservatórios	20%; 30%; 40%; 50% ; 60%
2	Tipo de Seleção	Torneio ; Roleta; Uniforme; <i>Rank</i>
3	Tipo de Cruzamento	1 ponto ; 2 pontos; Uniforme; Par-Ímpar
4	Probabilidade de Cruzamento	0,5; 0,6; 0,7 ; 0,8; 1,0
5	Probabilidade de Mutação	0,001; 0,004 ; 0,007; 0,01
6	Semente Aleatória	100 ; 500; 800; 1000; 2000

Para definição do operador genético de mutação não foi realizada análise de sensibilidade. Nesse caso, considerou-se o uso do processo de mutação simples, que é o mais indicado para cromossomos com valores binários (Wall, 1996). Esse tipo de mutação altera o valor de cada *bit* que compõe o cromossomo (substitui o 0 por 1 ou o 1 por 0) seguindo uma probabilidade de mutação definida.

4.3 - VERIFICAÇÃO DA SOLUÇÃO OTIMIZADA

Após concluído o processo de definição dos parâmetros, o modelo de otimização gerou como resultado um conjunto de regras operacionais otimizadas. Para avaliar as regras geradas foi feita uma comparação entre o desempenho da operação otimizada e de uma operação de referência.

Para definição da operação de referência, foi utilizada como base uma operação real, já aplicada ao sistema de abastecimento e submetida aos ajustes necessários para que atendesse as condições impostas pelo modelo de otimização. O dia escolhido para a comparação foi o mesmo dia utilizado para a calibração do modelo hidráulico (28/03/2012).

Por se tratar de uma operação real, não sujeita às limitações do modelo de otimização, foram necessárias algumas adaptações para que suas regras de operação pudessem ser simuladas. A principal adaptação foi a alteração dos horários de comando de bombas e válvulas, levando-se em conta que o modelo otimizador tem discretização horária e não considera valores intermediários.

A comparação entre a solução encontrada pelo modelo de otimização e a solução adotada pelos operadores, otimizada ao longo do tempo conforme a experiência prática, visa a avaliar com maior profundidade os resultados alcançados pelo modelo, principalmente em relação ao comportamento dos níveis dos reservatórios, número de acionamentos de bombas e válvulas e gasto de energia.

5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados e as discussões geradas pelo trabalho. Serão abordados os seguintes tópicos:

- Calibração do modelo hidráulico;
- Definição dos parâmetros do problema – primeira etapa;
- Definição dos parâmetros do problema – segunda etapa;
- Comparação entre operação de referência e operação otimizada; e
- Tempo computacional.

O item que trata da calibração do modelo hidráulico resume os resultados alcançados e apresenta, de forma sintética, os valores de erro médio absoluto e coeficiente de correlação obtidos no processo.

A definição dos parâmetros é apresentada em dois itens. Essa opção de apresentação foi feita por se tratar de um processo relativamente extenso e que, de fato, foi realizado em duas etapas. O primeiro item trata da primeira etapa e traz os resultados obtidos na definição dos parâmetros de tamanho de população, número de gerações e coeficientes de penalidade. O segundo item trata da segunda etapa e apresenta a definição dos demais parâmetros envolvidos.

Em seguida é apresentado o item que aborda a comparação entre a operação de referência, adotada pelos operadores, e a operação otimizada. A comparação é realizada com foco nos resultados obtidos em relação ao comportamento dos níveis dos reservatórios, quantidade de acionamentos e consumo de energia elétrica.

Por fim, são apresentados os resultados das otimizações em termos de tempo de processamento e feitas as análises dos fatores que interferiram nos valores alcançados.

5.1 - CALIBRAÇÃO

No processo de calibração, conforme descrito no item 4.1.3, os equipamentos (bombas e válvulas) representados no modelo hidráulico foram submetidos aos mesmos comandos aplicados aos equipamentos reais no período entre 00h e 24h do dia 28/03/2012. Assim, definiu-se como parâmetro de calibração os níveis observados e simulados dos reservatórios em intervalos de 30 minutos.

O processo de calibração conseguiu atingir um coeficiente de correlação (r) entre as médias dos valores observados e simulados de 0,983 e Erro Médio Absoluto (MAE) de 0,203 metros. O resumo dos valores é apresentado na Tabela 5.1. Os gráficos dos níveis observados e simulados dos reservatórios estão apresentados no Apêndice C .

Tabela 5.1 - Resumo dos valores envolvidos no processo de calibração

Reservatório	Número de observações	Média dos níveis observados (m)	Média dos níveis simulados (m)	Erro Médio Absoluto (m)	Desvio Padrão (m)
RAP.GA2	48	1,45	1,48	0,095	0,132
RAP.SG1	48	4,36	4,34	0,090	0,116
RAP.RE1	48	4,29	4,35	0,081	0,102
RAP.SA1	48	3,14	2,94	0,198	0,232
RAP.SA2	48	3,44	3,41	0,211	0,256
RAP.MN1_C1C2	48	3,33	3,38	0,157	0,177
RAP.MN1_C3C4	48	3,33	3,34	0,144	0,165
RAP.ST1	48	3,64	3,09	0,558	0,644
RAP.RF1	48	4,57	4,54	0,287	0,362
RAP.PW1	44	3,65	3,63	0,112	0,126
RAP.VP1	48	5,01	5,08	0,153	0,181
RAP.MN2_C1C2	48	2,17	2,22	0,090	0,115
RAP.MN2_C3C4	48	2,17	2,22	0,089	0,113
RAP.TS1	48	2,76	2,87	0,109	0,132
RAP.CE1	48	4,47	4,65	0,210	0,257
REQ.GA1	48	2,61	2,89	0,587	0,854
RAP.GA1	48	3,13	2,93	0,273	0,320
Rede	-	3,38	3,37	0,203	0,322

5.2 - DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS – PRIMEIRA ETAPA

Na primeira etapa de definição dos parâmetros foram realizadas dezoito otimizações com o objetivo de testar a adequação dos seguintes parâmetros:

- Critério de parada (número de gerações);
- Tamanho de população;
- Coeficientes de penalidade.

As otimizações foram feitas combinando-se os valores desses parâmetros, de maneira que fosse possível analisar, de forma qualitativa, os resultados obtidos e definir quais valores são os mais adequados ao problema em questão.

5.2.1 - Critério de parada e tamanho da população

As dezoito otimizações testadas foram definidas pela combinação de três valores de critério de parada (número de gerações), com quatro possibilidades de tamanho de população e dois cenários distintos de coeficientes de penalidade. Como nem todas as opções de tamanho de

população foram testadas em conjunto com todas possibilidades de critério de parada, o arranjo entre esses dois parâmetros resultou em nove possibilidades de otimização. Cada uma das nove possibilidades foi testada em dois cenários de coeficientes de penalidade, totalizando dezoito otimizações em estudo.

A Tabela 5.2 mostra as otimizações que foram executadas com os respectivos valores de critério de parada, tamanho de população e cenário de coeficientes de penalidade.

Tabela 5.2 - Valores de critério de parada e tamanho de população adotados

Número de gerações	Tamanho de população							
	Cenário 1 de coef. de penalidade				Cenário 2 de coef. de penalidade			
	10	30	50	75	10	30	50	75
1.500	Otim 1	Otim 2	Otim 3	Otim 4	Otim 10	Otim 11	Otim 12	Otim 13
6.000	Otim 5	Otim 6	Otim 7		Otim 14	Otim 15	Otim 16	
10.000	Otim 8	Otim 9			Otim 17	Otim 18		

Observa-se na Tabela 5.2 que, à medida que o número de gerações foi aumentando, as maiores populações deixaram de ser testadas. Essa opção foi tomada para evitar processos de otimização com um grande número de simulações, o que demandaria tempo computacional bastante elevado. Exemplificando, caso fosse realizada uma otimização de 10.000 gerações com 75 indivíduos, seriam executadas aproximadamente 750 mil simulações. Supondo que cada simulação durasse em média um segundo, seriam necessários mais de oito dias para concluir o processo.

5.2.2 - Coeficientes de penalidade

O valor atribuído a cada coeficiente de penalidade deve caracterizar o rigor com que a respectiva restrição precisa ser respeitada. Assim, para restrições mais graves deverão ser atribuídos coeficientes com valores suficientemente elevados, a fim de eliminar a ocorrência da condição indesejável.

Os valores adotados nos dois cenários de penalidade são apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Cenários de aplicação dos coeficientes das penalidades

Coeficientes	Cenário 1	Cenário 2
λ_1	100	100
λ_2	100.000	10.000
λ_3	100.000	10.000
λ_4 -g1	100.000	10.000
λ_4 -g2	100.000	10.000
λ_4 -g3	5.000	2.000
λ_4 -g4	1.000	1.000
λ_5	100.000	10.000

Percebe-se que, nos dois cenários analisados, o coeficiente λ_1 , que penaliza o não atendimento das demandas de abastecimento, é representado por um valor menor que os demais coeficientes. O uso desse valor pode ser justificado pelo fato de que sua aplicação ainda prevê a multiplicação do coeficiente pela demanda base do nó (Equação 4.12). Assim, espera-se que o valor gerado em caso de violação da restrição seja suficientemente elevado para eliminar essas soluções.

A opção de não variar o valor de λ_1 entre os dois cenários de penalidade em estudo, foi tomada na expectativa que o valor utilizado fosse suficiente para eliminar soluções inviáveis, de maneira que não fosse necessário avaliar outro valor para esse parâmetro. Como será mostrado mais adiante, a expectativa se confirmou e em todas as otimizações testadas a restrição imposta pela Penalidade 1 foi respeitada.

Para os coeficientes λ_2 , λ_3 , λ_4 -g1, λ_4 -g2 e λ_5 foram adotados os valores de 100.000 no Cenário 1 e 10.000 no Cenário 2. A opção de utilizar valores em dois patamares distintos teve o objetivo de avaliar qual ordem de grandeza geraria melhores resultados de otimização.

Para os coeficientes λ_4 -g3 e λ_4 -g4, buscou-se o uso de valores relativamente baixos, com o objetivo de tolerar violações de número de acionamento para equipamentos de menor porte e não tornar o problema excessivamente restritivo. Para o coeficiente λ_4 -g4, foi utilizado o mesmo valor nos dois cenários em análise. Já para o coeficiente λ_4 -g3 optou-se por reduzir o valor de 5.000 no Cenário 1, para 2.000 no caso do Cenário 2, na tentativa de que a proporção entres os coeficientes da Penalidade 4 não fosse tão afetada.

5.2.3 - Resultados preliminares da primeira etapa de avaliação

Os valores dos parâmetros avaliados na primeira etapa da análise de sensibilidade foram obtidos fixando-se todos os demais parâmetros do problema. Assim, durante essa fase, o nível inicial adotado em cada reservatório foi fixado em metade do nível máximo operacional. Para os operadores e parâmetros do AG, foram utilizados os valores adotados como padrão, que são apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Operadores e parâmetros genéticos adotados na primeira etapa

Operadores Genéticos	Parâmetros de Otimização
Tipo de Seleção: Torneio	Probabilidade de Cruzamento: 0,7
Tipo de Cruzamento: Um ponto	Probabilidade de Mutação: 0,004
Mutação: Simples	Semente aleatória: 100

Os resultados gerais obtidos em cada processo de otimização estão apresentados na Tabela 5.5. Nessa tabela, colunas P1, P2, P3, P4 e P5 apresentam o valor calculado para cada penalidade. As colunas G1, G2, G3 e G4 mostram, em cada grupo de equipamentos, quantos elementos violaram o número máximo de acionamentos permitidos.

Tabela 5.5 - Resultados obtidos na primeira etapa de definição dos parâmetros

	Otim	P1	P2	P3	P4	G1 (unid)	G2 (unid)	G3 (unid)	G4 (unid)	P5	Custo Energia (R\$)	Aptidão	Tempo (h)
Cenário 1 de coef. de penalidade	1	0	0	0	134.463	1	0	3	6	0	94.175	228.638	3,0
	2	0	0	0	245.172	1	1	4	9	0	93.253	338.425	10,9
	3	0	0	0	258.615	1	1	6	7	0	89.199	347.814	20,1
	4	0	0	0	145.140	1	0	4	10	0	90.099	235.239	23,7
	5	0	0	0	17.069	0	0	1	4	0	87.803	104.872	12,6
	6	0	0	0	30.245	0	0	2	8	0	88.875	119.120	40,7
	7	0	0	0	140.351	1	0	4	4	0	91.314	231.665	73,1
	8	0	0	0	14.829	0	0	1	2	0	86.727	101.555	22,0
	9	0	0	0	29.055	0	0	2	7	0	88.809	117.864	55,0
Cenário 2 de coef. de penalidade	10	0	0	0	39.440	1	0	3	6	0	87.658	127.098	3,3
	11	0	0	0	33.698	0	1	3	3	0	87.200	120.898	10,3
	12	0	0	0	32.493	0	0	5	10	1718	89.575	123.786	14,5
	13	0	0	0	31.626	0	0	6	8	0	86.379	118.005	20,9
	14	0	0	0	34.237	1	0	3	5	0	79.921	114.158	15,9
	15	0	0	0	17.527	0	0	2	2	0	82.664	100.191	42,9
	16	0	0	0	13.986	0	0	1	2	0	84.866	98.852	44,5
	17	0	0	0	30.640	1	0	2	4	0	80.266	110.906	25,5
	18	0	0	0	17.354	0	0	2	2	0	82.332	99.686	58,1

Percebe-se que praticamente todas as otimizações atenderam aos critérios impostos pelas penalidades 1, 2, 3 e 5, com exceção da otimização 12, que violou a condição que define a diferença máxima entre níveis finais e iniciais dos reservatórios (Penalidade 5). Isso demonstra que os coeficientes adotados para essas penalidades, tanto no Cenário 1 quanto no Cenário 2, estão adequados.

Em relação à penalidade que trata dos acionamentos dos equipamentos (Penalidade 4), todas as otimizações apresentaram pontuação positiva no quesito. Contudo, deve-se fazer a ressalva de que isso não significa necessariamente que o número máximo de acionamentos foi ultrapassado.

Conforme demonstra a Equação 4.21, essa penalidade é composta por duas parcelas distintas. A primeira parcela penaliza todo e qualquer desligamento de bomba, aplicando como penalidade o custo de energia da hora anterior multiplicado por 1,5. A segunda parcela verifica o número total de acionamentos de cada equipamento e aplica a penalidade caso o valor seja superior ao limite tolerado.

Assim, para verificar o atendimento ao critério de número máximo de acionamentos é importante avaliar, além do valor da penalidade, a própria contagem de violações apresentada nas colunas G1, G2, G3 e G4 da Tabela 5.5. Então, considerando-se os valores apresentados nas colunas mencionadas, confirma-se que nenhuma otimização atendeu plenamente à restrição imposta pela Penalidade 4.

Contudo, quando avalia-se os grupos de equipamentos de forma separada, percebe-se que nos casos dos grupos 1 e 2 (equipamentos de maior porte) a restrição é quase sempre respeitada para otimizações com 6.000 ou 10.000 gerações, em ambos os cenários de penalidade avaliados.

Para os equipamentos pertencentes aos grupos 3 e 4 (bombas de menor porte e válvulas), o limite máximo de acionamentos foi violado em todas as otimizações, mesmo com número de gerações elevado. Isso leva a inferir que se trata de uma condição que exigiria uma análise de um número maior de soluções. Na tentativa de melhorar o atendimento em relação a esses equipamentos, os coeficientes λ_{4-g3} e λ_{4-g4} foram reavaliados através de uma análise de sensibilidade.

5.2.4 - Análise de sensibilidade dos coeficientes λ_{4-g3} e λ_{4-g4}

Diante dos resultados obtidos em relação ao número de acionamentos nos grupos 3 e 4, optou-se por realizar uma análise de sensibilidade desses dois parâmetros a fim de verificar quais seriam os valores mais adequados. Para a realização da análise de sensibilidade foram escolhidas duas das otimizações, sendo uma de cada cenário avaliado.

No Cenário 1, a Otimização 5 e a Otimização 8 apresentaram bom desempenho no atendimento às restrições e nos custos de energia. A escolha da Otimização 5 se deu em virtude do menor tempo de processamento, embora a Otimização 8 tenha apresentado menor valor de função aptidão.

Para o Cenário 2 foi escolhida a Otimização 14, que apresentou o menor custo de energia e um bom desempenho em relação ao tempo de processamento, embora essa alternativa tenha sido superada por outras do mesmo cenário no quesito de violação do número máximo de acionamentos.

Assim, para cada uma das alternativas escolhidas (5 e 14), os valores dos coeficientes $\lambda_4\text{-g3}$ e $\lambda_4\text{-g4}$ foram alterados seguindo a proporção inicialmente existente entre eles, até que os valores de ambos se igualassem aos valores adotados em $\lambda_4\text{-g1}$ e $\lambda_4\text{-g2}$. Os valores dos coeficientes da Penalidade 4, nas duas análises de sensibilidade realizadas, estão demonstrados na Tabela 5.6 e Tabela 5.8. Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 5.7 e Tabela 5.9.

Tabela 5.6 - Valores adotados para os coeficientes de penalidade da Otimização 5

	$\lambda_4\text{-g1}$	$\lambda_4\text{-g2}$	$\lambda_4\text{-g3}$	$\lambda_4\text{-g4}$
Varição 1	100.000	100.000	100.000	100.000
Varição 2	100.000	100.000	75.000	15.000
Varição 3	100.000	100.000	50.000	10.000
Varição 4	100.000	100.000	25.000	5.000
Otimização 5	100.000	100.000	5.000	1.000
Varição 5	100.000	100.000	2.500	500

Tabela 5.7 - Resultado da análise de sensibilidade dos coeficientes da Penalidade 4 na Otimização 5

	P1	P2	P3	P4	G1 (unid)	G2 (unid)	G3 (unid)	G4 (unid)	P5	Custo Energia (R\$)	Aptidão	Tempo (h)
Var 1	0	0	0	312.788	0	1	1	1	0	93.717	406.505	14,0
Var 2	0	0	0	459.107	1	0	4	3	0	89.423	548.530	12,5
Var 3	0	0	0	166.075	1	0	0	5	0	86.724	252.800	14,3
Var 4	0	0	0	185.423	1	0	2	4	0	87.995	273.418	10,0
Otim 5	0	0	0	17.069	0	0	1	4	0	87.803	104.872	12,6
Var 5	0	0	0	27.356	0	0	5	6	0	86.384	113.741	13,6

Tabela 5.8 - Valores adotados para os coeficientes de penalidade da Otimização 14

	$\lambda_4\text{-g1}$	$\lambda_4\text{-g2}$	$\lambda_4\text{-g3}$	$\lambda_4\text{-g4}$
Varição 1	10.000	10.000	10.000	10.000
Varição 2	10.000	10.000	7.500	3.750
Varição 3	10.000	10.000	5.000	2.500
Otimização 14	10.000	10.000	2.000	1.000
Varição 4	10.000	10.000	1.000	500

Tabela 5.9 - Resultado da análise de sensibilidade dos coeficientes da Penalidade 4 na Otimização 14

	P1	P2	P3	P4	G1 (unid)	G2 (unid)	G3 (unid)	G4 (unid)	P5	Custo Energia (R\$)	Aptidão	Tempo (h)
Var 1	0	0	0	67.903	1	0	2	2	0	86.465	154.367	12,9
Var 2	0	0	0	58.080	1	1	1	4	0	85.569	143.649	15,9
Var 3	0	0	0	32.870	0	0	3	3	0	88.291	121.160	13,1
Otim14	0	0	0	34.237	1	0	3	5	0	79.921	114.158	15,9
Var 4	0	0	0	13.592	0	0	1	5	0	81.625	95.217	14,3

Verificou-se nos dois casos analisados que o aumento do valor dos coeficientes λ_{4-g3} e λ_{4-g4} não resultou necessariamente em redução das violações de acionamentos dos equipamentos desses grupos. Em algumas situações os acionamentos dos grupos 1 e 2 são afetados e em outros casos não há influência. Os resultados não seguiram uma lógica esperada e apresentaram comportamento errático, o que talvez possa ser justificado pelo fato de que as otimizações são interrompidas após um reduzido número de soluções analisadas. Portanto, optou-se por manter no decorrer do trabalho os valores originalmente previstos para os coeficientes λ_{4-g3} e λ_{4-g4} , descartando as variações testadas nas análises de sensibilidade.

Dando continuidade à definição dos parâmetros e operadores genéticos do problema, foi estabelecido que os resultados derivados do Cenário 1 seriam descartados. A escolha se baseou na observação de que, de maneira geral, as otimizações resultantes desse cenário levaram a custos de energia maiores que os obtidos a partir do Cenário 2.

Infere-se que os custos maiores de energia observados no Cenário 1 se devem à utilização de valores mais elevados de coeficientes de penalidade, o que, de alguma forma, causaria no processo de busca uma preferência por soluções com menores violações de restrição, deixando o problema menos sensível ao valor do custo de energia.

Considerando que os coeficientes de penalidade adotados no Cenário 2 produziram melhores resultados, pois, de forma, geral, encontraram soluções com custos energéticos menores e mantiveram o atendimento satisfatório às penalidades impostas, esses coeficientes de penalidade foram utilizados na segunda etapa de definição dos parâmetros. Dentre as soluções que adotaram os coeficientes mais adequados (Cenário 2) a Otimização 14 se destacou, pois, como relatado anteriormente, apresentou o menor custo de energia aliado a um bom desempenho em relação ao tempo de processamento e atendimento às restrições.

Assim, concluindo a primeira etapa de definição dos parâmetros do problema, foram definidos os valores conforme expressos na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Parâmetros definidos na primeira etapa

Variáveis	Valores
Critério de Parada	6.000 gerações
População	10 indivíduos
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ e λ_5	100; 10.000; 10.000; 10.000
$\lambda_{4-g1}, \lambda_{4-g2}, \lambda_{4-g3}, \lambda_{4-g4}$	10.000; 10.000; 2.000; 1.000

5.3 - DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS – SEGUNDA ETAPA

Após a conclusão da primeira etapa e considerando os coeficientes definidos na Tabela 5.10, foi dado início à segunda etapa, em que analisou-se os seguintes parâmetros:

- Níveis iniciais dos reservatórios;
- Tipo de seleção;
- Tipo de cruzamento;
- Probabilidade de cruzamento;
- Probabilidade de mutação;
- Semente aleatória.

5.3.1 - Níveis iniciais dos reservatórios

Foram testadas 5 condições diferentes de nível inicial. Os valores ensaiados foram 20, 30, 40, 50, e 60% do nível máximo, lembrando que a otimização com nível inicial de 50% é a própria Otimização 14, já testada anteriormente. Ressalta-se que os reservatórios não deverão finalizar o período de simulação com diferença entre os níveis finais e iniciais maiores que o estabelecido na Penalidade 5.

O melhor resultado em relação à função aptidão foi atingido com os níveis iniciais em 30%. O pior resultado ocorreu com os níveis iniciais em 20%, que apresenta inclusive valor bastante elevado para Penalidade 4 (violação de limite de acionamentos). O detalhamento dos valores obtidos é apresentado na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 - Resultado da análise de sensibilidade dos níveis iniciais

	P1	P2	P3	P4	G1 (unid)	G2 (unid)	G3 (unid)	G4 (unid)	P5	Custo Energia (R\$)	Aptidão	Tempo (h)
60%	0	0	0	18.403	0	0	2	6	0	87.870	106.273	13,7
50%	0	0	0	34.237	1	0	3	5	0	79.921	114.158	15,9
40%	0	0	0	40.814	1	0	5	5	0	76.302	117.116	12,5
30%	0	0	0	17.066	0	0	2	3	0	88.676	105.742	16,3
20%	0	0	0	53.879	1	1	3	7	0	87.090	140.969	13,8

Cabe ressaltar que os valores testados pressupõem que todos os reservatórios estariam com o mesmo percentual de armazenamento no instante inicial de simulação. Tal condição não reflete a situação real de operação, de tal forma que combinações de diferentes valores percentuais de nível inicial deveriam ser testadas.

5.3.2 - Tipo de seleção

Já considerando os níveis iniciais dos reservatórios em 30%, a próxima análise de sensibilidade apontou que a seleção por ordenamento (*Rank*) produziu os melhores resultados entre os tipos de seleção testados, que foram: ordenamento, roleta, torneio de 2 elementos, e uniforme. Os valores obtidos na análise estão apresentados na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 - Resultado da análise de sensibilidade dos tipos de seleção

	P1	P2	P3	P4	G1 (unid)	G2 (unid)	G3 (unid)	G4 (unid)	P5	Custo Energia (R\$)	Aptidão	Tempo (h)
<i>Rank</i>	0	0	0	14.710	0	0	1	3	0	78.283	92.992	15,8
Torneio	0	0	0	17.066	0	0	2	3	0	88.676	105.742	16,3
Roleta	0	0	0	53.722	1	1	4	7	0	87.912	141.634	16,6
Uniforme	0	0	0	22.124	0	0	3	4	0	88.470	110.593	17,0

Além de apresentar baixos valores de custo de energia e poucas violações do limite de acionamentos, a seleção por ordenamento apresentou convergência mais rápida que as demais opções, chegando a bons valores de função aptidão já a partir da geração de número 2.000. A evolução da função aptidão para todos os tipos de seleção testados é apresentado na Figura 5.1.

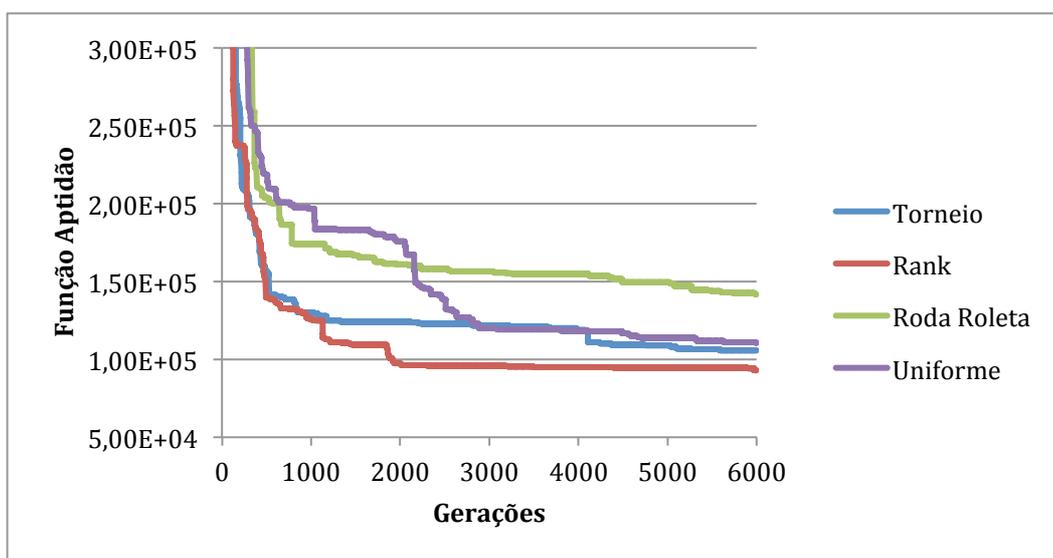


Figura 5.1 - Evolução de função aptidão para os diferentes tipos de cruzamento

5.3.3 - Demais parâmetros

Para todos os demais parâmetros avaliados não foram obtidos resultados melhores que a seleção por ordenamento apresentada no item anterior. Os parâmetros avaliados e os respectivos valores testados em cada um deles foram:

- Tipo de cruzamento: Uniforme; **1 Ponto**; 2 Pontos; Par-Ímpar
- Probabilidade de cruzamento: 0,5; 0,6; **0,7**; 0,8; 1,0

- Probabilidade de mutação: 0,001; **0,004**; 0,007; 0,01
- Semente aleatória: **100**; 500; 800; 1.000; 2.000

Os valores em negrito, em conjunto com o nível inicial de 30% e demais parâmetros apontados na Tabela 5.10, foram os que compuseram a otimização de melhor desempenho encontrada. O Apêndice D apresenta as tabelas com os resultados das demais análises de sensibilidade realizadas.

5.4 - COMPARAÇÃO ENTRE OPERAÇÃO REAL E OPERAÇÃO OTIMIZADA

Para análise dos resultados obtidos pelo modelo otimizador, foi realizada uma comparação entre a operação encontrada no processo de otimização e uma operação real adotada pelos operadores do sistema estudado, tomada como operação de referência.

Representando a operação real do sistema foi escolhida a regra operacional do dia 28/03/2012. Tanto a regra operacional real, quanto a otimizada, foram simuladas no modelo de otimização e os resultados encontrados são apresentados na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 - Comparação entre Operação de Referência e Operação Otimizada

	P1	P2	P3	P4	G-1 (unid)	G-2 (unid)	G-3 (unid)	G-4 (unid)	P5	Custo Energia (R\$)	Aptidão
Otimização	0	0	0	14.710	0	0	1	3	0	78.283	92.992
Referência	0	0	110.000	5.376	0	0	0	2	14.174	80.457	210.009

Analisando os valores das operações, percebe-se que o modelo de otimização alcançou um resultado melhor para a função aptidão que a operação de referência (operação real adaptada). Além da função aptidão, a superioridade também ocorreu nos demais quesitos analisados, exceto em relação ao número máximo de acionamentos (Penalidade 4).

O bom desempenho da operação de referência, em termos de quantidade de acionamentos, provavelmente demonstra uma preocupação dos operadores do sistema em evitar manobras excessivas de bombas e válvulas. O valor da Penalidade 4 também pode indicar que os limites de acionamentos de bombas e válvulas compõem uma forte restrição do problema e que seria necessário uma quantidade maior de soluções testadas para que fosse possível obter um melhor resultado em relação à esse critério.

Sobre a Penalidade 3, levando-se em consideração a forma de cálculo (Equação 4.18) e o valor do coeficiente λ_3 aplicado no caso, pode-se perceber que, teoricamente, ocorreram onze eventos de extravasamento na operação de referência. Contudo, os registros operacionais da data não apontam para ocorrências desse tipo, mas descrevem níveis de reservatórios bastante próximos aos limites máximos das unidades. Acredita-se então que a penalidade, na magnitude em que foi detectada,

pode ter sido causada pela imprecisão do modelo de simulação ou pelas alterações feitas na discretização horária dos comandos das bombas e válvulas. O valor da Penalidade 3 pode ser encarado como um indicativo da preferência dos operadores do sistema em manter os maiores volumes de reservação possíveis, provavelmente em busca de uma maior segurança operacional.

O valor da Penalidade 5 observado na operação de referência demonstra que em alguns casos os reservatórios terminaram o período simulado com níveis inferiores aos do início da simulação. Essa ocorrência pode indicar que, em uma situação real, o controle da operação não se baseia necessariamente na condição de que o nível final seja maior ou igual ao nível inicial, mas sim que o nível inicial seja adequado para suportar o ciclo diário de consumo. Assim, se no início do período de operação algum reservatório apresentar nível acima do considerado suficiente, o operador poderá optar por “gastar” essa reserva excedente e encerrar o período de operação com níveis mais baixos que os iniciais.

Em situações de otimização em tempo real, quando o sistema atinge o ciclo regular de funcionamento, é de se esperar que a cada ciclo de otimização a condição inicial de reservação seja compatível com a condição ótima para a operação do próximo período, não ocorrendo ajuste nos volumes iniciais reservados.

5.4.1 - Comportamento dos reservatórios

No sistema em estudo, foram analisados os comportamentos de 15 reservatórios de abastecimento. Nos principais deles, em especial quando abastecidos diretamente por bombeamento, com adução de grandes vazões e alturas manométricas elevadas, pode-se perceber uma tendência do modelo de otimização em reduzir o níveis de água nos horários de custo de energia mais elevado (horário de ponta), visando à economia de energia elétrica. Dois casos bem característicos são os reservatórios M Norte 1 e Ceilândia, mostrados na Figura 5.2 e Figura 5.3.

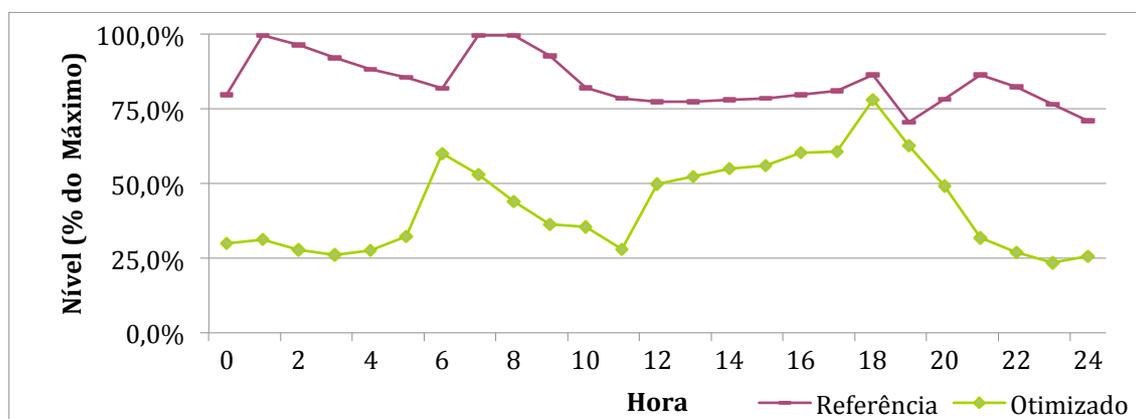


Figura 5.2 - Comportamento do nível do reservatório M Norte 1

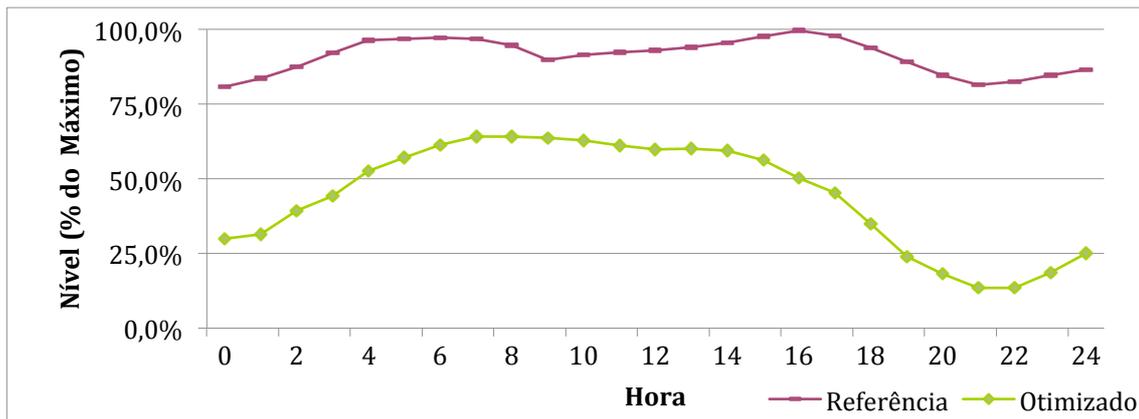


Figura 5.3 - Comportamento do nível do reservatório de Ceilândia

Nos casos em que os reservatórios não são abastecidos diretamente por bombeamento e possuem pequenos volumes de reservação, o comportamento do modelo parece se voltar mais para o controle dos níveis entre os limites máximos e mínimos, sem que seja percebida um tendência clara de controle de nível no horário de ponta. O gráfico de nível do reservatório Gama 2, mostrado na Figura 5.4, demonstra bem essa característica.

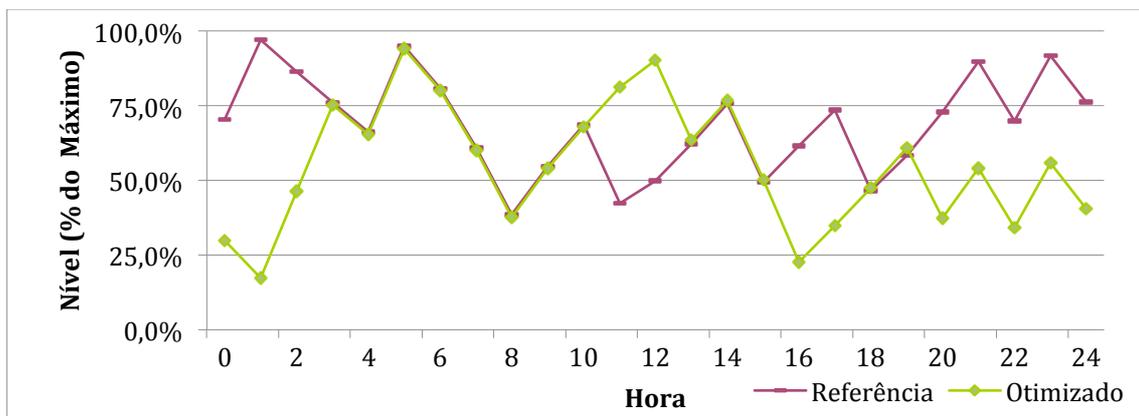


Figura 5.4 - Comportamento do nível do reservatório Gama 2

Em outros casos, quando se faz uma análise comparativa entre a operação otimizada e a operação de referência, percebe-se que alguns reservatórios apresentam trajetórias de nível praticamente paralelas, mantendo as mesmas variações durante o tempo, porém em patamares menores na operação otimizada em relação à operação de referência. Alguns casos em que esse comportamento foi observado foram os reservatórios M Norte 2, Recanto das Emas, Sítio do Gama e Samambaia 1 (Figura 5.6, Figura 5.7, Figura 5.8 e Figura 5.9). Pode-se inferir que, nessas situações, não há ganho de eficiência com o valor do nível inicial em 30% e que, caso os níveis iniciais fossem maiores, mantendo-se as mesmas regras operacionais, o sistema provavelmente operaria com maior segurança e manteria o mesmo valor da função aptidão.

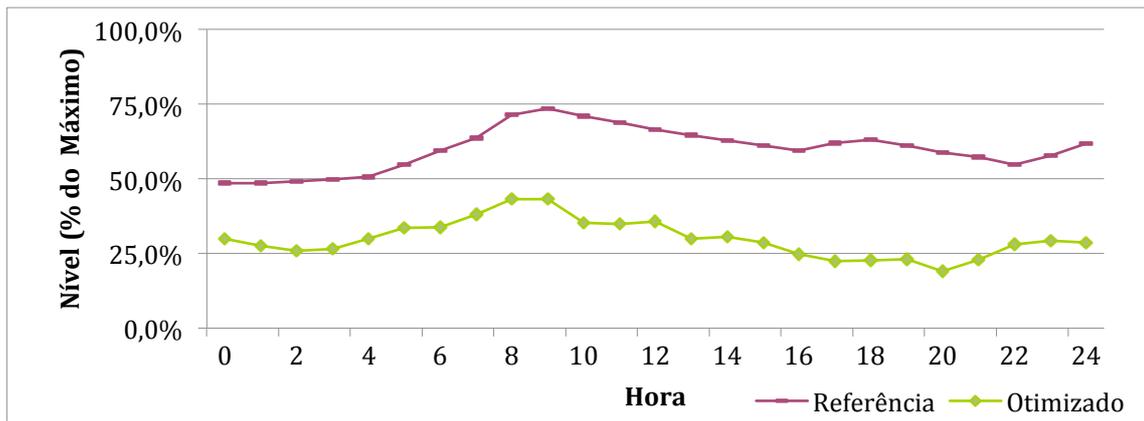


Figura 5.5 - Comportamento do nível do reservatório M Norte 2

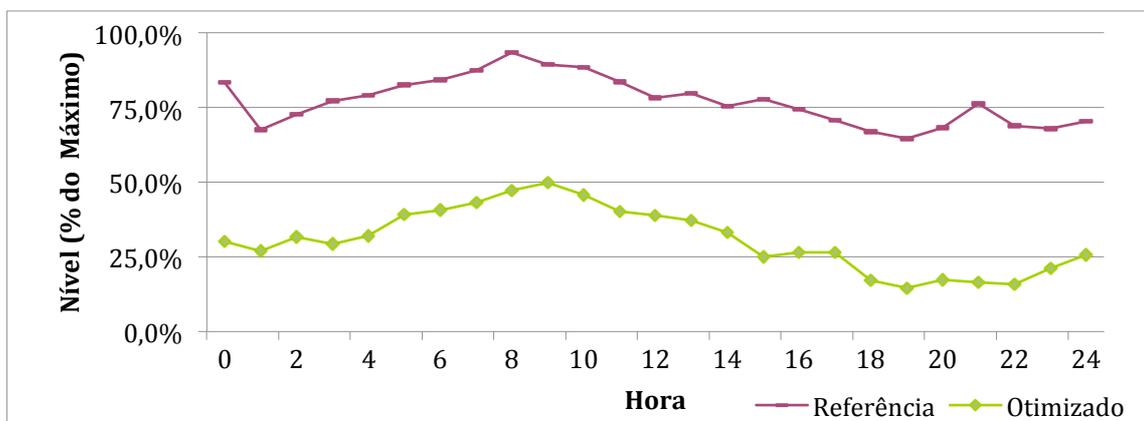


Figura 5.6 - Comportamento do nível do reservatório Recanto das Emas

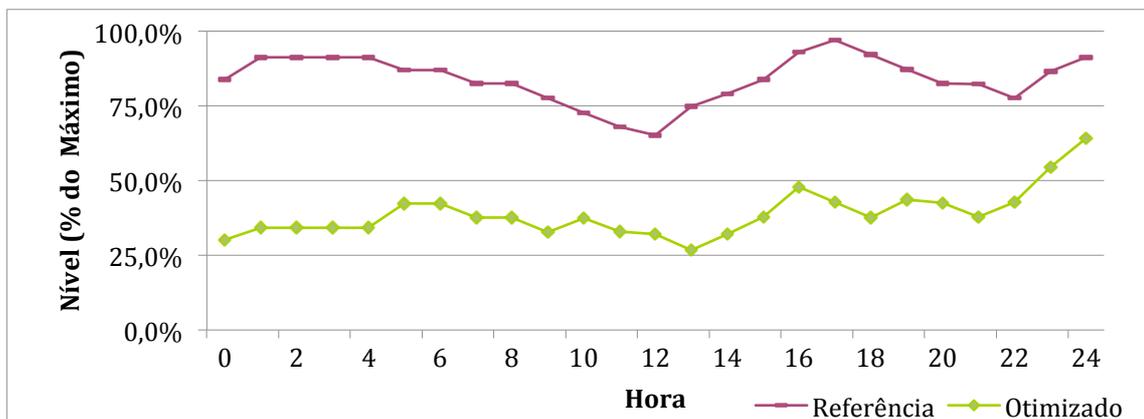


Figura 5.7 - Comportamento do nível do reservatório Sítio do Gama

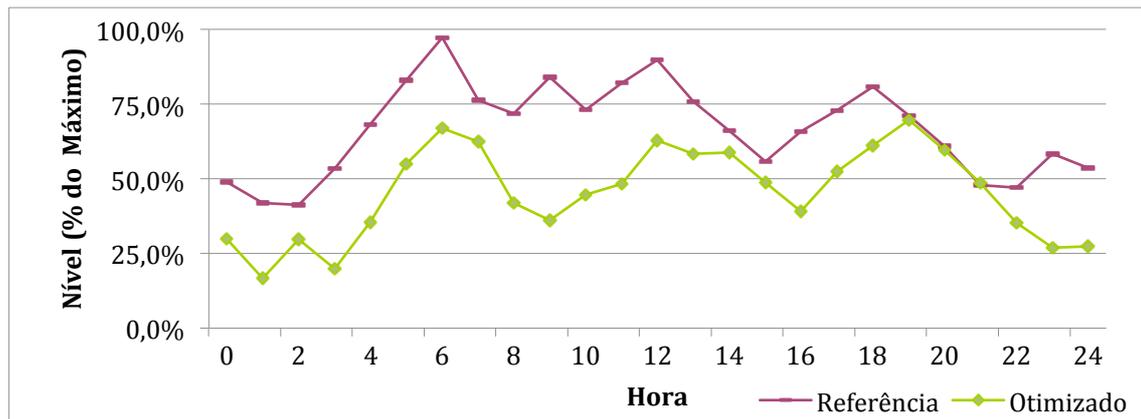


Figura 5.8 - Comportamento do nível do reservatório Samambaia 1

Essa observação reforça a hipótese de que a condição ideal de níveis iniciais não ocorre com todos os reservatórios na mesma proporção de armazenamento, e que o arranjo de níveis iniciais que leva a uma operação otimizada deve ser analisado mais detalhadamente, em conjunto com critérios de confiabilidade da operação.

No problema em estudo, foi provavelmente a operação do reservatório M Norte1 (Figura 5.2) que definiu o melhor nível inicial em 30% para todas as demais unidades. Como nesse caso o nível inicial afeta diretamente o funcionamento da maior elevatória do sistema, a condição ótima nessa unidade acabou definindo o nível inicial no restante do problema.

5.4.2 - Quantidade de acionamentos

A Figura 5.10 apresenta um diagrama de comparação entre as operações de referência e otimizada no que se refere ao número de acionamentos das bombas. Na figura, os equipamentos estão agrupados por conjuntos de elevatórias e a comparação é feita grupo a grupo. O funcionamento de cada equipamento é mostrando da seguinte forma: cor vermelha, com indicação de valor 1, para os instantes em que cada equipamento está ligado; e em cor verde, com indicação de valor 0, para os instantes em que cada equipamento está desligado. A coluna final da tabela, denominada NA, apresenta o número total de acionamentos de cada elemento. Para contagem do número de acionamentos foram considerados somente os eventos em que determinada bomba que estava ligada alterou sua condição para desligada.

		Horas																								NA	
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	NA
Referencia	EAB.RD1_B2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1
	EAB.RD1_B3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1
	EAB.RD1_B4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	EAB.RD1_B5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Otimizada	EAB.RD1_B2	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	2
	EAB.RD1_B3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	EAB.RD1_B4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	EAB.RD1_B5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1
Referencia	EAT.MN1_B1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
	EAT.MN1_B2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	EAT.MN3_B1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	EAT.MN3_B2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Otimizada	EAT.MN1_B1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
	EAT.MN1_B2	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	5
	EAT.MN3_B1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	3
	EAT.MN3_B2	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	3
Referencia	EAT.MN5_B1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
	EAT.MN6_B1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	EAT.MN6_B2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1
Otimizada	EAT.MN5_B1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	4
	EAT.MN6_B1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	2
	EAT.MN6_B2	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	4

Referencia	EAT.MN2_B1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1		
	EAT.MN2_B2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	
	EAT.MN4_B1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
	EAT.MN4_B2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Otimizada	EAT.MN2_B1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
	EAT.MN2_B2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	
	EAT.MN4_B1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	EAT.MN4_B2	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	
Referencia	EAT.TS1_B1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
	EAT.TS1_B2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
	EAT.TS2_B1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	EAT.TS2_B2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1
	EAT.TS2_B3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Otimizada	EAT.TS1_B1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	3
	EAT.TS1_B2	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
	EAT.TS2_B1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	3
	EAT.TS2_B2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1
	EAT.TS2_B3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	3
Ref	EAT.VP1_B2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	
	EAT.VP1_B3	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
Otim	EAT.VP1_B2	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3
	EAT.VP1_B3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	4

Figura 5.9 - Diagrama de acionamentos das bombas na operação de referência e na operação otimizada

Observa-se que, em todos os casos, a operação otimizada realiza um número maior de acionamentos que a operação de referência, o que justifica os valores apresentados pela Penalidade 4 na Tabela 5.13. Os períodos em que os equipamentos estão ligados e desligados indica que é vantajoso, pelo algoritmo de otimização, realizar ligamentos e desligamentos ao invés de organizar o arranjo de modo a reduzir os acionamentos.

A solução mais direta para corrigir esse problema seria uma alteração no cálculo da Penalidade 4, aumentando os valores dos coeficientes de penalidade nos casos de violação, ou mesmo aplicando coeficientes de penalidade não lineares. Porém, deve-se observar que essas alterações tornariam o problema mais restritivo, o que provavelmente resultaria em um maior tempo de busca para encontrar soluções adequadas às condições impostas.

Uma outra alternativa que poderia ser adotada para melhorar a solução em relação ao excesso de acionamentos, sem que o problema demandasse maior tempo de busca, seria a utilização da técnica de programação de bombas proposta por López-Ibáñez (2009), denominada “*time-controlled trigger*”. Essa técnica altera a forma de representação das variáveis do problema, fixando o número máximo de acionamentos de cada elemento e reduzindo o universo de busca do algoritmo.

Outra técnica que também poderia ter bom desempenho é a utilizada por Odan (2013), que aplica um “tratamento” às soluções otimizadas, de forma a reorganizar os instantes de ligamento e desligamento, reduzindo o número de acionamentos sem aumentar significativamente o tempo de busca do algoritmo.

5.4.3 - Energia elétrica

Sob os aspectos de energia elétrica, a operação otimizada apresentou uma redução de custo global de 2,7% em relação à operação de referência. Esse valor foi calculado utilizando o custo do consumo de energia elétrica no período de 24h somado ao custo da demanda mensal dividido por trinta (Equação 4.11).

Percebe-se no detalhamento dos valores de energia apresentados na Tabela 5.14 que os custos de consumo são menores na operação otimizada, enquanto os custos de demanda são menores na operação de referência. Contudo não há grande discrepância entre os custos apresentados nas duas operações, com exceção da tarifa horo-sazonal verde.

Tabela 5.14 - Comparação dos custos de energia

Custos	Operação de Referência	Operação Otimizada	Diferenças
Custo Consumo Ponta (R\$)	7.090,00	6.772,80	-4,5%
Custo Consumo Fora Ponta (R\$)	65.216,50	63.102,20	-3,2%
Custo Total Consumo (R\$)	72.306,50	69.875,00	-3,4%
Demanda THS Verde (R\$)	957,80	1.395,90	45,7%
Demanda THS Azul – Ponta (R\$)	65.104,40	70.839,20	8,8%
Demanda THS Azul – F. Ponta (R\$)	178.457,20	179.992,90	0,9%
Custo mensal de demanda (R\$) ⁴	244.519,00	252.228,00	3,2%
Gasto Total de Energia (R\$) (ponderado para 24h) ⁵	80.457,00	78.283,00	-2,7%

A diferença significativa de custo de demanda observada na tarifa horo-sazonal verde se dá pelo fato de que apenas três conjuntos de bombeamento estão submetidos à essa modalidade tarifária (dois na elevatória de Vicente Pires e uma na elevatória M.Norte 1). Na operação otimizada esses três equipamentos funcionam de maneira simultânea. Já na operação de referência, somente dois conjuntos são operados de forma simultânea. Assim, a diferença de potência demandada é grande em termos relativos, mas pequena se considerada sob o aspecto de custo global.

Apesar das diferenças observadas na comparação entre as operações otimizadas e de referência, o resultado de custo de energia elétrica é semelhante. Isso demonstra que o modelo de otimização consegue, em um tempo relativamente curto, encontrar uma regra operacional satisfatória em termos de energia elétrica e que atende aos principais requisitos de abastecimento.

O resultado obtido também pode ser uma indicação de que o sistema de abastecimento funciona atualmente próximo de sua capacidade máxima de operação, reduzindo a margem operacional necessária para uma operação otimizada sob o aspecto de custo energético.

5.5 - TEMPO COMPUTACIONAL

As otimizações foram realizadas em computador pessoal de mesa, com microprocessador *Intel Core i7*, com 2,6 GHz de velocidade e 6 GB de memória RAM. Os tempos de processamento consumidos nas otimizações variaram entre 3 horas e 73 horas. A duração de cada processo de otimização foi afetada principalmente pelo número de simulações realizadas, que por sua vez depende do tamanho da população e do número de gerações em análise. Os tempos totais gastos nos processos de otimização e o tempo médio gasto por cada simulação executada (tempo médio de análise de uma única solução do problema) estão apresentados na Tabela 5.15.

⁴ Custo da demanda mensal de energia

⁵ Soma do consumo de 24 horas e da demanda mensal dividida por 30 dias

Tabela 5.15 - Duração do processo de simulação

	Otim.	Num. gerações	Pop	Tempo (h)	Tempo (s)	Num. de Simulações	Tempo/ Simulação (s)
Cenário 1	1	1500	10	3,0	10.719	15.010	0,71
	2	1500	30	10,9	39.354	45.030	0,87
	3	1500	50	20,1	72.199	75.050	0,96
	4	1500	75	23,7	85.399	112.575	0,76
	5	6000	10	12,6	45.328	60.010	0,76
	6	6000	30	40,7	146.406	180.030	0,81
	7	6000	50	73,1	263.100	300.050	0,88
	8	10000	10	22,0	79.187	100.010	0,79
	9	10000	30	55,0	197.857	300.030	0,66
Cenário 2	10	1500	10	3,3	11.919	15.010	0,79
	11	1500	30	10,3	37.257	45.030	0,83
	12	1500	50	14,5	52.377	75.050	0,70
	13	1500	75	20,9	75.310	112.575	0,67
	14	6000	10	15,9	57.349	60.010	0,96
	15	6000	30	42,9	154.608	180.030	0,86
	16	6000	50	44,5	160.265	300.050	0,53
	17	10000	10	25,5	91.894	100.010	0,92
	18	10000	30	58,1	209.177	300.030	0,70

Deve-se considerar porém, que se trata de um problema de grande dimensão, que possui 32 variáveis que assumem valores binários a cada hora, para um período de otimização de 24 horas. Assim, o processo de busca trata um problema com 768 (32 x 24) variáveis, que podem assumir o valor de 0 ou 1, o que resulta em 2^{768} (ou $1,55 \times 10^{231}$) possibilidades de operação.

Observou-se que dentro de um mesmo processo de otimização as simulações iniciais, que avaliam os indivíduos das primeiras gerações, consumiram mais tempo que as demais simulações. Em praticamente todos os casos o tempo gasto no início da otimização foi significativamente maior que o tempo gasto após algumas rodadas do processo de otimização. Normalmente as primeiras simulações consumiram cerca de cinco segundos por solução simulada (indivíduo simulado), enquanto o tempo médio geral das simulações ficou abaixo de um segundo.

O comportamento mais lento na simulação das primeiras soluções (indivíduos) pode ser explicado pelo procedimento de cálculo utilizado pelo simulador hidráulico. O EPANET possui a possibilidade do usuário definir a frequência de realização dos cálculos hidráulicos (passo de tempo de cálculo hidráulico) e no trabalho utilizou-se o intervalo de cálculo de uma hora. Ocorre que o programa realiza os cálculos de forma automática, em intervalos menores que o

determinado pelo usuário, sempre que os reservatórios do sistema ficam totalmente cheios ou totalmente vazios.

Assim, como as soluções iniciais são formadas por uma combinação aleatória de comandos de bombas e válvulas (a população inicial é gerada de forma aleatória), que provavelmente não guardam nenhuma relação lógica com a operação real do sistema, os eventos de violação dos níveis mínimos e máximos ocorrem constantemente. Isso faz com que a frequência de cálculos do simulador hidráulico aumente, aumentando também o tempo necessário para o processamento. Porém, com o avanço do processo de otimização, soluções mais equilibradas vão sendo encontradas e o tempo de processamento vai diminuindo.

Com isso percebe-se que a velocidade do processo de simulação hidráulica influencia fortemente o tempo de otimização. Essa observação condiz com a constatação de Ribeiro (2005) que demonstra que os tempos gastos na simulação hidráulica são significativamente maiores que os utilizados pelo algoritmo de otimização.

De forma geral, as melhores soluções passam a ser encontradas a partir de doze horas de processamento. Esse tempo é considerado excessivo para aplicação no planejamento de curto prazo, o que inviabilizaria o uso do modelo para definição de regras operacionais em tempo real.

6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Foi desenvolvido um modelo de otimização operacional, com foco na redução de custo de energia elétrica, aplicado ao estudo de caso do sistema de abastecimento do Descoberto. O modelo utilizou valores médios de demanda de abastecimento para um período de 24 horas, de forma a representar uma condição média de funcionamento. A regra operacional otimizada encontrada pelo modelo foi compatível com a regra adotada pelo centro de controle operacional da CAESB, em um dia com as mesmas características de consumo.

Sendo assim, verificou-se que a operação otimizada atendeu às demandas de água nos nós de consumo e manteve os níveis dos reservatórios dentro dos limites definidos. O custo de energia elétrica foi inferior ao observado na operação do centro de controle, porém o número de acionamentos de bombas e válvulas foi maior na operação otimizada. O número máximo de acionamentos permitidos foi tratado de forma criteriosa, com a fixação dos limites máximos tolerados, conforme o porte dos equipamentos. De maneira geral, os limites adotados já representaram um valor elevado, e mesmo assim, todas as soluções encontradas pelo modelo de otimização violaram as condições fixadas.

Os coeficientes adotados para penalização do excesso de acionamentos foram alterados durante o processo de definição dos parâmetros, na tentativa de melhorar o atendimento a essa restrição, mas os resultados obtidos não foram satisfatórios. De forma geral, a imposição de coeficientes maiores levou a um aumento do consumo de energia elétrica, sem necessariamente resultar em redução das violações.

Os parâmetros do problema, sejam eles coeficientes de penalidade, níveis iniciais dos reservatórios ou operadores genéticos, demonstraram ter grande influência no processo de otimização. Modificações no tamanho da população, no número de gerações, no tipo de seleção e nos demais parâmetros, alteraram consideravelmente o comportamento da função aptidão, tanto em termos de tempo de convergência, quanto na qualidade do valor final encontrado. Além disso, a definição dos seus valores revelou-se ser uma etapa extensa, principalmente devido à quantidade de parâmetros envolvidos e à interdependência entre eles. Outro problema observado é que não há como garantir que os valores definidos pelo processo de análise de sensibilidade continuarão tendo bom desempenho diante das mudanças que poderão ocorrer no sistema (variações de consumos, níveis iniciais, etc.). Diante disso, entende-se que o aspecto de definição dos parâmetros deverá ser melhor avaliado.

Entre os parâmetros testados, os níveis iniciais dos reservatórios também mostraram-se relevantes no processo de otimização. A consideração de que todos os reservatórios iniciam o período de simulação com o mesmo percentual de armazenamento também parece ser uma condição que influencia significativamente o resultado final. Essa consideração gerou, em diversos

casos, situações operacionais em que reservatórios deixaram de utilizar grande parte de sua capacidade de armazenamento.

A forma como o processamento das soluções foi realizada resultou em um tempo computacional que inviabilizou o uso do modelo para definição de regras operacionais de curto prazo, com aplicação em tempo real. A duração do processo foi significativamente afetada pela quantidade de simulações necessárias à obtenção de uma solução viável. A necessidade de um grande número de simulações pode ser consequência de um universo de busca muito extenso e sujeito a condições operacionais muito restritivas, o que reduz a quantidade de soluções viáveis e dificulta a convergência para um resultado satisfatório. O caráter excessivamente restritivo do problema pode ser justificado principalmente pelo fato do sistema estar submetido a uma demanda de abastecimento próxima da capacidade de produção, o que reduz as possibilidades de operação e dá pouca margem às mudanças necessárias ao processo de otimização.

6.1 - RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros recomenda-se aprofundar os estudos com relação aos seguintes aspectos:

- Quantidade de acionamentos;
- Definição dos parâmetros do problema;
- Redução do tempo computacional;
- Aplicação do modelo de otimização em tempo real;
- Análise multiobjetivo do problema.

Para a melhoria dos resultados em relação à quantidade de acionamentos, sugere-se a análise de algumas alternativas. A primeira delas seria uma nova abordagem em relação aos coeficientes de penalidade que tratam a restrição. Poderia ser testada a adoção de coeficientes variáveis, que se tornariam mais severos à medida em que o número de gerações evoluísse (Savic *et al*, 1997), ou mesmo a aplicação de um coeficiente de penalidade não-linear. Outra abordagem que parece ser promissora é a aplicação da técnica de representação da solução por valores de tempo (López-Ibáñez, 2009), onde o número máximo de acionamentos de cada elemento é definido explicitamente no momento da codificação da solução. Sugere-se também avaliar a aplicação do tratamento das soluções otimizadas, proposto por Odan (2013), que consiste em alterar a solução otimizada encontrada, de maneira a reorganizar os instantes de ligamento e desligamento, reduzindo a quantidade de acionamentos.

Em relação a definição dos parâmetros, sugere-se avaliar a aplicação de métodos de busca que utilizem algoritmos específicos para estabelecimento dos valores. Uma das técnicas já aplicada consiste no uso do algoritmo *Particle Swarm Optimization* – PSO (Moraes, 2008 e Zeferino *et al.*, 2009). Aplicações dessa natureza poderiam possibilitar maior eficiência na definição dos valores,

que também poderiam ser revistos à medida que características do sistema de abastecimento (variações de consumo, níveis de reservatórios, etc.) fossem alteradas.

Sobre os níveis iniciais dos reservatórios, esses também se mostraram um aspecto crítico do problema, de forma que sugere-se que sejam avaliados de maneira individual, considerando aspectos de confiabilidade operacional.

No que tange a redução do tempo computacional, as ações de melhoria podem ser tomadas em duas frentes distintas. A primeira consiste em melhorar o processo computacional em si, com o uso de equipamentos com maior capacidade de processamento e a adoção de técnicas de processamento em paralelo. A segunda consiste na melhoria do próprio processo de otimização e pode ser realizada de diferentes maneiras.

Em relação ao processo de otimização, sugere-se que seja estudada a possibilidade de iniciar o procedimento de busca partindo-se de soluções conhecidas e viáveis, de forma que a convergência do algoritmo possa ser acelerada. Esse procedimento também melhoraria o tempo de simulação hidráulica das primeiras populações, uma vez que soluções hidraulicamente mais equilibradas reduzem o tempo de processamento do EPANET.

Entende-se também que a aplicação de técnicas que atuem na melhoria dos resultados em termos de número de acionamentos poderiam contribuir para a redução do tempo computacional. A técnica de representação da solução por valores de tempo, proposta por López-Ibáñez (2009), que atua diretamente na redução do espaço de busca do problema, provavelmente agilizaria a convergência do algoritmo. Já as técnicas de tratamento das soluções otimizadas (Odan, 2013) e busca local associada à busca global (Savic *et al.*, 1997 e van Zyl *et al.*, 2004), que consistem basicamente em alterar a solução encontrada pela otimização e melhorá-la por meio de procedimentos específicos, permitiriam que o processo de busca fosse encerrado de forma antecipada, antes de se encontrar a solução desejada. Assim, mesmo não se obtendo um bom resultado, esse poderia ser aperfeiçoado com o uso de técnicas mais específicas e com menor tempo de processamento.

Garantindo-se que o processo de otimização seja realizado em menor tempo, haveria possibilidade de aplicá-lo na operação em tempo real. Nesse caso seria necessário a utilização de um modelo de previsão de demanda, para o qual existem diversos estudos a respeito.

E por fim, apesar do problema abordado ter atingido resultados bastante próximos aos de uma operação real, o que indicaria que mesmo uma abordagem de um único objetivo pode encontrar uma regra operacional otimizada, aplicável ao sistema real, sugere-se avaliar o problema também sobre outros aspectos, em especial a questão da confiabilidade operacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adamowski, J. F. (2008). "Peak Daily Water Demand Forecast Modeling Using Artificial Neural Networks". *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 134(2), 119-128.
- Atkinson, R., van Zyl, J. E., Walters, G. A. e Savic, D. A. (2000). "Genetic algorithm optimisation of level-controlled pumping station operation". In: *Water network modeling for optimal design and management*, pp. 79–90. Centre for Water Systems, Exeter, U.K.
- Azadeh, A., Neshat, N. e Hamidipour, H. (2012). "Hybrid Fuzzy Regression–Artificial Neural Network for Improvement of Short-Term Water Consumption Estimation and Forecasting in Uncertain and Complex Environments: Case of a Large Metropolitan City". *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 138(1), 71-75.
- Borges, V. M. N. A. (2003) *Acoplamento de um modelo de previsão de demanda de água a um modelo simulador em tempo real, um estudo de caso: Sistema Adutor Metropolitano de São Paulo*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, São Paulo, SP, 206 p.
- Braga da Silva, F. G., Reis, L. F. R. e Soares, A. K. (2003) "Investigação da Eficiência de Algoritmos Genéticos (AGs) Aplicados ao Problema Inverso de Otimização do Processo de Calibração de Redes de Distribuição de Água para Abastecimento". *Anais do XXIV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*, Ouro Preto, Brasil, 15p. Disponível em <http://www.bwd.com.br/geasd> (30/08/2013).
- Braga da Silva, F. G., Reis, L. F. R., Caliman, R. O. e Chaudhry, F. H. (2004). "Calibração de um modelo de rede de distribuição de água para um setor de abastecimento real contemplando vazamentos". *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 9(1), 37-54.
- Brion, L. M. e Mays, W. L. (1991). "Methodology for Optimal Operation of Pumping Stations in Water Distribution Systems". *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(11), 1551-1569.
- CAESB - Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (2012). *SIÁGUA – Sinopse do Sistema de Abastecimento de Água do Distrito Federal*. CAESB/DP/PPC, 20^a ed., Brasília, 142 p.
- Carrijo, I. B. (2004). *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, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, 217p.
- Chase, D. V. e Ormsbee, L. E. (1989). "Optimal pump operation of water distribution system with multiple storage tanks". *Proceedings of Conference on Water Resources Planning and Management*, ASCE, 733-736, New York, NY, USA.
- Coulbeck, B. e Sterling, M. J. H. (1978). "Optimised control of water distribution systems". *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 125(10), 1039-1044.
- Coulbeck, B. e Orr, C. H. (1990). "Optimal Control of Water Supply". *IEE Colloquium on Control and Optimization Techniques for the Water Industry*, 1-4.

- Coulbeck, B. e Orr, C. H. (1993). "Essential Considerations in the Computer Control of Water Distribution Systems". *Reliability Engineering & System Safety*, 42(1), 55-61.
- Cunha, A. A. R. (2009). *Otimização energética em tempo real da operação de sistemas de abastecimento de água*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, 179p.
- Deb, K. (2000). "An efficient constraint handling method for genetic algorithms". *Computer Methods in Applied. Mechanics Engineering*, 186(2-4) 311-338.
- Fallside, F. e Perry, P. F. (1975). "Hierarchical optimisation of a water-supply network". *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 122(2), 202-208.
- Itonaga, L. C. H. (2005). *Estudo da Aplicação de Modelos de Redes de Água no Controle de Perdas em Casos Reais*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 201p.
- Jain, A. e Ormsbee, L. E. (2002). "Short-term Water Demand Forecast Modeling Techniques – Conventional Methods versus AI". *Journal AWWA, American Water Works Association*, 94(7), 64-72.
- Joo, C. N., Koo, J. Y. e YU, M. J. (2002). "Application of short-term water demand prediction model to Seoul". *Water Science and Technology*, 46(6-7), 255-261.
- Jowitt, P. W. e Germanopoulos, G. (1992). "Optimal Pump Scheduling in Water-Supply Networks". *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 118(4), 416-422.
- López-Ibáñez, M. (2009). *Operational Optimisation of Water Distribution Networks*. PhD thesis, School of Engineering and the Built Environment, Edinburgh Napier University, UK, 214 p.
- Mackle, G., Savic, D. A. e Walters G. A. (1995). "Application of Genetic Algorithms to Pump Scheduling for Water Supply". *Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications, GALESIA'95*, IEE Conference Publication No. 414, 400-405, Sheffield, UK.
- Miaou, S. (1990). "A class of time series urban water demand models with non-linear climatic effects". *Water Resources. Research*, 26(2), 169-178.
- Moraes, F. A. (2008). *Calibração de Modelo de Decaimento de Cloro Aplicado a Setor de Rede de Distribuição de Água*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 211 p.
- Neves, C. L. (2007). *Calibração de Parâmetros de Modelos Hidráulicos de Redes de Distribuição de Água para Estudos de Operação de Rede*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 143 p.
- Obradovic, D. e Lonsdale, P. (1998). *Public Water Supply – Models, Data and Operational Management*. St Edmundsbury Press, Suffolk, UK, 453 p.
- Odan, F. K. (2010). *Previsão de Demanda para Sistemas de Abastecimento de Água*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 77 p.
- Odan, F. K. (2013). *Estudo de Confiabilidade aplicado à Otimização da Operação em Tempo Real de Redes de Abastecimento de Água*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 210 p.

- Ormsbee, L. E., Walski, T. M., p, D.V., Sharp, W.W. (1989). "Methodology for Improving Pump Operation Efficiency". *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 115(2), 148-164.
- Ostfeld, A., Salomons, E., Ormsbee, L., Uber, J. G., Bros, C. M., Kalungi, P., Burd, R., Zazula-Coetzee, B., Belrain, T., Kang, D., Lansey, K., Hailiang Shen, H., McBean, E., Yi Wu, Z., Tom Walski, T., Stefano Alvisi, S., Franchini, M., Johnson, J. P., Ghimire, S. R., Barkdoll, B. D., Koppel, T., Vassiljev, A., Kim, J. H., Chung, G., Yoo, D. G., Diao, K., Zhou, Y., Li, J., Liu, Z., Chang, K., Gao, J., Qu, S., Yixing Yuan, Y., Prasad, T. D., Daniele Laucelli, D., Lyroudia, L. S. V., Zoran Kapelan, Z., Savic, D., Berardi, L., Barbaro, G., Giustolisi, O., Asadzadeh, M., Tolson, B. A. e McKillop, R. (2012). "Battle of the Water Calibration Networks". *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 138(5), 523-532.
- Pedrosa, L. A. F. (2006). *Um Modelo de Operação de Sistemas Adutores de Abastecimento de Água com vistas a Minimização dos Custos Energéticos*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB. 174 p.
- Porto R. M. (2006). *Hidráulica Básica*. Projeto REENGE, São Carlos, SP, 540 p.
- PROCEL SANEAR – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica no Setor de Saneamento. (2011). Disponível em: <http://www.eletronbras.com/procel>. Acesso em 08 de abril de 2012.
- Rani, D., Jain, S., Srivastava, D., e Perumal, M. (2013). "Genetic Algorithms and Their Applications to Water Resources Systems". In: *Metaheuristics in Water, Geotechnical and Transport Engineering*, Elsevier, 43-78.
- Ranjithan, S. (2005). "Role of Evolutionary Computation in Environmental and Water Resources Systems Analysis". *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 131(1), 1–2.
- Ribeiro, G. P. (2005). *Operação Otimizada do Sistema Adutor Metropolitano Utilizando Algoritmos Genéticos: Estudo de Caso: SAM Leste da Região Metropolitana de São Paulo*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, São Paulo, SP, 239 p.
- Righetto, A. M. (2002). "Operação Ótima de Sistema Urbano de Distribuição de Água". *Anais do Seminário: Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água. O Estado da Arte e Questões Avançadas*. João Pessoa, PB, 16 p. Disponível em: <http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/trabalhos> (31/08/2013).
- Rossman, L. A. (2000). *EPANET2 - Users Manual*, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.
- Sabet, M. H. e Helweg, O. (1985). "Cost effective operation of urban water supply system using dynamic programming". *Journal of the American Water Resources Association*, 21(1), 75-81.
- Savic, D. A., Walters, G. A. e Schwab, M. (1997). "Multiobjective genetic algorithm for pumping scheduling in water supply". *Evolutionary Computing Workshop, AISB'97*, Vol. 1305, 227–236, Manchester, UK.

- Smith, J. A. (1988). "A Model of Daily Municipal Water Use for Short-Term Forecasting". *Water Resources Research.*, 24(2), 201–206.
- Soares, A. K. (2003). *Calibração de Modelos de Redes de Distribuição de Água para Abastecimento Considerando Vazamentos e Demanda Dirigida pela Pressão*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, 153p.
- Tsutiya, M. T. (2006). Redução do Custo de Energia Elétrica em Sistemas de Abastecimento de Água. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, São Paulo, SP, 185 p.
- van Zyl, J. E., Savic, D. A. e Walters, G. A. (2004). "Operational optimization of water distribution systems using a hybrid genetic algorithm". *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 130(2), 160–170.
- Vicente, R. V. (2005). *Modelo de Operação para Centros de Controle de Sistemas de Abastecimento de Água - Estudo de Caso: Sistema Adutor Metropolitano de São Paulo*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, SP, 139p.
- Vieira, M. E. A. G (2008). *Calibração de Modelos de Redes de Distribuição de Água Usando Algoritmo Genético Multiobjetivo*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, Goiânia, Go, 34p.
- Wall, M. (1996). "GAlib: A C++ Library of Genetic Algorithm Components". Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto de Tecnologia de Massachusetts. Disponível em <http://lancet.mit.edu/ga/>. Acessado em agosto de 2012.
- Walski, T. M., (1983). "Technique for Calibrating Network Models". *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 109(4), 360-372.
- Wu, Z. Y. e Simpson, A. R. (2001). "Competent Genetic-Evolutionary Optimization of Water Distribution Systems". *Journal of Computing in Civil Engineering*, 15(2), 89-101.
- Zeferino, J. A., Antunes, A. P., e Cunha, M. C. (2009). "An efficient simulated annealing algorithm for regional wastewater system planning". *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 24(5), 359-370.
- Zessler, U. e Shamir, U. (1989). "Optimal Operation of Water Distribution Systems". *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 115(6), 735-752.
- Zhou, S., McMahon, T., Walton, A., e Lewis, J. (2000). "Forecasting daily urban water demand: A case study of Melbourne." *Journal of Hydrology*, 236(3), 153–164.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS CITADAS POR OUTROS AUTORES

- Bhave, P.R. (1988). "Calibrating water distribution network models". *Journal of Environmental Engineering*, 114(1), 120-136.
- Boulos, P. F. e Wood, D. J. (1990). "Explicit Calculation of Pipe- Network Parameters". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 116(11), 1329-1344.

- Cesário, L. (1995). "Modeling, analysis, and design of water distribution systems". *American Water Works Association*. 1995.
- Ferreri, G. B., Napoli, E. e Tumbiolo, A. (1994). "Calibration of Roughness in Water Distribution Networks". In: MILLER, D. S. (ed.): *2nd International Conference on Water Pipeline Systems*, BHR Group Conference Series, p. 379-396, Edimburgo, Escócia.
- Ormsbee, L. E. e Wood, D. J. (1986). "Hydraulic Design Algorithm for Pipe Networks". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 112(12), 1195-1207.
- Tsutiya, M. T. (1989). Redução do Custo de Energia Elétrica em Estações Elevatórias Sistemas de Abastecimento de Pequeno e Médio Portes. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, SP.
- Zahed Filho, K. (1990). *Previsão de demanda de consumo em tempo real no desenvolvimento operacional de sistemas de distribuição de água*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, SP, 135p.

APÊNDICE A - DADOS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO DO MODELO HIDRÁULICO

A.1 - NÓS DE CONSUMO

Item	Nó de consumo	Cota	Demanda Base	Padrão temporal
1	UDA.AC4+	1214,1	128,3	UDA.CE1+
2	UDA.TG5	1215,0	117,8	UDA.CE1+
3	UDA.CE1+	1286,2	260,1	UDA.CE1+mod
4	UDA.CE3	1245,0	129,2	UDA.CE3
5	UDA.GA2+	1161,5	238,4	UDA.GA2+
6	UDA.GA1	1209,7	124,1	UDA.GA1+
7	UDA.PW2+	1171,8	45,5	UDA.GA1+
8	UDA.RE1+	1261,5	221,1	UDA.CE3
9	UDA.ST1	1250,4	41,4	UDA.GA1+
10	UDA.RE7	1263,0	10,4	UDA.GA1+
11	UDA.TG6	1287,0	92,8	UDA.CE1+mod
12	UDA.RF2+	1211,8	50,6	UDA.CE1+mod
13	UDA.SA2+	1260,0	105,8	UDA.CE1+
14	UDA.SA5	1222,5	106,5	UDA.CE1+
15	UDA.RF1	1225,7	27,4	UDA.CE1+mod
16	UDA.SA1	1280,8	47,9	UDA.CE1+
17	UDA.AC2+	1210,0	191,6	UDA.CE1+
18	UDA.ST3	1262,1	11,4	UDA.CE3
19	UDA.ST2+	1250,4	220,5	UDA.ST3
20	UDA.CE2	1287,0	462,7	UDA.CE1+mod
21	UDA.SA3+	1255,1	268,2	UDA.CE1+
22	UDA.TG2	1200,0	112,7	UDA.TG2
23	UDA.AC1	1202,9	51,0	UDA.CE1+
24	UDA.TG4	1264,0	67,5	UDA.CE1+mod
25	UDA.TG3	1264,0	214,2	UDA.CE1+mod
26	UDA.RE1AeRFIIA	1278,5	38,6	UDA.CE3
27	UDA.RE1BeRFII3A	1278,5	33,0	UDA.CE3
28	UDA.CE4	1276,3	115,5	UDA.CE1+
29	UDA.GU5	1105,0	22,5	UDA.TG2
30	UDA.GU1	1105,0	86,8	UDA.TG2
31	UDA.GU2	1105,0	162,9	UDA.TG2
32	UDA.VP1	1247,5	152,9	UDA.VP1_mod
33	UDA.TG2A	1203,4	70,9	UDA.TG2
34	UDA.NB1+	1210,0	147,5	UDA.CE1+
35	UDA.GU4	1105,0	52,3	UDA.TG2
36	TRANSFERENCIA	1170,0	400,0	TRANSFERENCIA

A.2 - PADRÕES DE CONSUMO NORMALIZADOS

Hor a	UDA.CE1 +	UDA.CE1+mo d	UDA.CE 3	UDA.GA1 +	UDA.GA2 +	UDA.ST 3	UDA.TG 2	UDA.VP1_mo d	TRANS F
1	0,88	0,68	0,45	0,64	0,64	0,54	0,56	0,30	1,55
2	0,78	0,60	0,39	0,56	0,56	0,45	0,49	0,25	1,55
3	0,68	0,57	0,37	0,54	0,54	0,40	0,42	0,40	1,55
4	0,60	0,50	0,36	0,52	0,52	0,38	0,39	0,50	1,55
5	0,56	0,57	0,45	0,56	0,56	0,55	0,39	0,60	1,55
6	0,56	0,60	0,63	0,80	0,70	0,70	0,47	0,70	1,55
7	0,56	0,72	0,88	1,10	0,95	0,90	0,66	0,80	1,55
8	0,56	0,97	0,96	1,15	1,05	1,05	0,83	1,00	1,55
9	0,72	1,25	1,19	1,19	1,10	1,20	1,30	1,20	1,55
10	0,97	1,40	1,38	1,29	1,20	1,35	1,46	1,40	1,55
11	1,25	1,39	1,49	1,32	1,22	1,45	1,50	1,50	1,55
12	1,40	1,33	1,60	1,37	1,37	1,55	1,56	1,65	0,23
13	1,39	1,29	1,35	1,24	1,24	1,35	1,56	1,35	0,23
14	1,33	1,21	1,32	1,20	1,20	1,25	1,45	1,25	0,23
15	1,29	1,17	1,15	1,17	1,22	1,15	1,38	1,40	0,23
16	1,21	1,16	1,15	1,20	1,27	1,10	1,34	1,35	0,23
17	1,17	1,22	1,24	1,23	1,28	1,25	1,29	1,45	0,23
18	1,16	1,28	1,39	1,24	1,24	1,38	1,24	1,30	0,23
19	1,22	1,24	1,44	1,21	1,20	1,35	1,18	1,20	0,23
20	1,28	1,20	1,24	1,10	1,10	1,19	1,10	1,10	0,23
21	1,24	1,04	1,11	1,00	1,05	1,10	0,99	1,00	0,23
22	1,20	0,97	1,03	0,90	0,95	0,90	0,92	0,90	1,55
23	1,04	0,88	0,81	0,80	0,85	0,80	0,81	0,80	1,55
24	0,97	0,78	0,61	0,70	0,75	0,70	0,74	0,50	1,55

A.3 - ELEVATÓRIAS E BOMBAS

Unidade de Consumo	Bomba	Potência	Funcionamento
Elevatória de Água Bruta do Rio Descoberto	EAB.RD1_B1	11.000 cv	Reserva
	EAB.RD1_B2	5.500 cv	Controlável
	EAB.RD1_B3	11.000 cv	Controlável
	EAB.RD1_B4	5.500 cv	Controlável
	EAB.RD1_B5	11.000 cv	Controlável
Elevatória de Água Tratada M.Norte 1	EAT.MN1_B1	375 cv	Controlável
	EAT.MN1_B2	375 cv	Controlável
	EAT.MN1_B3	375 cv	Reserva
Elevatória de Água Tratada M.Norte 2	EAT.MN2_B1	200 cv	Controlável
	EAT.MN2_B2	200 cv	Controlável
	EAT.MN2_B3	200 cv	Reserva
Elevatória de Água Tratada M.Norte 3	EAT.MN3_B1	375 cv	Controlável
	EAT.MN3_B2	375 cv	Controlável
	EAT.MN3_B3	375 cv	Reserva
Elevatória de Água Tratada M.Norte 4	EAT.MN4_B1	150 cv	Controlável
	EAT.MN4_B2	150 cv	Controlável
	EAT.MN4_B3	150 cv	Reserva
Elevatória de Água Tratada M.Norte 5	EAT.MN5_B1	100 cv	Controlável
	EAT.MN5_B2	100 cv	Reserva
Elevatória de Água Tratada M.Norte 6	EAT.MN6_B1	100 cv	Controlável
	EAT.MN6_B2	100 cv	Controlável
	EAT.MN6_B3	100 cv	Reserva
Elevatória de Água Tratada Vicente Pires	EAT.VP1_B1	150 cv	Controlável
	EAT.VP1_B2	150 cv	Controlável
	EAT.VP1_B3	150 cv	Reserva
Elevatória de Água Tratada Taguatinga Sul 1	EAT.TS1_B1	550 cv	Controlável
	EAT.TS1_B2	550 cv	Controlável
	EAT.TS1_B3	550 cv	Reserva
Elevatória de Água Tratada Taguatinga Sul 2	EAT.TS2_B1	800 cv	Controlável
	EAT.TS2_B2	800 cv	Controlável
	EAT.TS2_B3	800 cv	Controlável
	EAT.TS2_B4	800 cv	Reserva
Reservatório Elevado Ceilândia	ERE.CE1_B1	200 cv	Elevado/Booster
	ERE.CE1_B2	200 cv	Elevado/Booster
	ERE.CE1_B3	200 cv	Elevado/Booster
Reservatório Elevado Riacho Fundo	ERE.RF1_B1	25 cv	Elevado/Booster
	ERE.RF1_B2	25 cv	Elevado/Booster
Reservatório Elevado Recanto das Emas	ERE.RE1_B1	60 cv	Elevado/Booster
	ERE.RE1_B2	60 cv	Elevado/Booster
	ERE.RE1_B3	60 cv	Elevado/Booster
Reservatório Elevado Samambaia	ERE.SA1_B1	100 cv	Elevado/Booster
	ERE.SA1_B2	100 cv	Elevado/Booster
Reservatório Elevado Sítio do Gama	ERE.SG1_B1	50 cv	Elevado/Booster
	ERE.SG1_B2	50 cv	Elevado/Booster
Reservatório Elevado Taguatinga Sul	ERE.TS1_B1	200 cv	Elevado/Booster
	ERE.TS1_B2	200 cv	Elevado/Booster
	ERE.TS1_B3	200 cv	Elevado/Booster

A.4 - VÁLVULAS

Item	Descrição	Código	Diâmetro
1	Válvula de Entrada do Reservatório de Taguatinga Sul	TCV-TS1	2x 800 mm
2	Válvula Controladora de Vazão para Samambaia	TCV-SG10	1000 mm
3	Válvula de Entrada do Reservatório Samambaia 2	TCV-SA2	400 mm
4	Válvula de Entrada do Reservatório Riacho Fundo 1	VCN-RF1	250 mm
5	Válvula de Entrada do Reservatório Recanto das Emas	TCV-RE1	400 mm
6	Válvula de Entrada do Reservatório Park Way	TCV-PW1	250 mm
7	Válvula de Entrada do Reservatório Sítio do Gama	TCV-SG1	150 mm
8	Válvula de Entrada do Reservatório Santa Maria	VCN-ST1	350 mm
9	Válvula de Entrada do Reservatório Gama 1	VCN-GA1	250 mm
10	Válvula de Entrada do Reservatório Gama 2	VCN-GA2	250 mm
11	Válvula de Transferência Plano Piloto	V-Transf	250 mm
12	Válvula de Entrada do Reservatório Equalização Gama	TCV-11	500 mm

A.5 - RESERVATÓRIOS

Item	Reservatório	Cota de Fundo	Nível Mínimo	Nível Máximo	Volume (m³)
1	RAP.GA2	1161,5	0	2,0	3.600
2	RAP.GA1	1209,7	0	5,3	10.000
3	RAP.SG1	1240,0	0	5,3	1.500
4	RAP.MN2	1264,0	0	4,0	30.000
5	RAP.SA1	1260,0	0	5,0	17.000
6	RAP.ST1	1250,4	0	5,0	14.000
7	RAP.TS1	1213,0	0	4,0	15.000
8	RAP.CE1	1287,0	0	5,0	40.000
9	REQ.GA1	1263,0	0	5,0	2.250
10	RAP.RE1	1261,5	0	5,3	15.000
11	RAP.SA2	1222,5	0	5,0	7.000
12	RAP.MN1	1245,0	0	4,0	45.000
13	RAP.RF1	1211,8	0	6,0	5.000
14	RAP.PW1	1171,8	0	4,5	3.000
15	RAP.VP1	1247,5	0	6,0	12.000

APÊNDICE B - CÓDIGO DO MODELO OTIMIZADOR

```

/*****
/Otimizador*/
/*****/

int _tmain(int argc, char *argv[])
{

    vInterFDLL(); // Interface com a DLL do EPANET

    vDadosEPANET(); // retorna num de nós links e tanks e calcula num junções

    vDadosDoSistema(); // Le arquivo de entrada aguua.in

    vGeraArquivoEstatisticas ();

    vAloca();

    //Seta parametros para Algoritmo Genético
    GAParameterList params;
    GASimpleGA::registerDefaultParameters(params);
    params.set(gaNpPopulationSize, popsize);
    params.set(gaNpCrossover, crossoverRate);
    params.set(gaNpMutation, mutationRate);
    params.set(gaNnGenerations, ngen);
    params.set(gaNnReplacement, nReplacement);
    params.set(gaNpConvergence, maxFitnessVariance);

    GARandomSeed (randomSeed); //Gera semente aleatória

    //Cria genoma
    GAIDBinaryStringGenome genome (length, fObjetivo); //Tipo de genoma utilizado
    genome.initializer(:vInitializer); //Inicialização do genoma
    GAStatistics stats;

    //Cria o algoritmo genético
    GASimpleGA ga(genome);
    ga.parameters(params);
    ga.scoreFilename("FOGer_Descoberto.txt");
    ga.scoreFrequency(1);
    ga.flushFrequency(1);
    ga.selectScores(GAStatistics::AllScores);
    GALinearScaling lin;
    ga.scaling(lin);
    ga.minimize();

    switch(Selector)
    {
        case 0: {GARankSelector selector; ga.selector(selector);} break;
        case 1: {GARouletteWheelSelector selector; ga.selector(selector);} break;
        case 2: {GATournamentSelector selector; ga.selector(selector);} break;
        case 3: {GAUniformSelector selector; ga.selector(selector);} break;
        case 4: {GASRSSelector selector; ga.selector(selector);} break;
        case 5: {GADSSSelector selector; ga.selector(selector);} break;
        default: printf ("\nTipo de Seleção desconhecida.");
    }

    switch(crossover)
    {
        case 0: {ga.crossover(GAIDBinaryStringGenome::UniformCrossover);} break;
        case 1: {ga.crossover(GAIDBinaryStringGenome::OnePointCrossover);} break;
        case 2: {ga.crossover(GAIDBinaryStringGenome::TwoPointCrossover);} break;
        case 3: {ga.crossover(GAIDBinaryStringGenome::EvenOddCrossover);} break;
        default: printf ("\nTipo de Crossover desconhecido.");
    }

    //Início da Otimização
    {
        start = clock();
        cont_individuo=0;
        cont_fObjetivo=0;

        ga.evolve();
        cout<<"\n numero run_Epanet: "<< cont_runEpanet;
        cout<<"\n numero de individuos: "<< cont_individuo<<endl;
        cout<< ga.statistics()<<endl;

        genome = ga.statistics().bestIndividual();
        stats = ga.statistics();
    }
}

```

```

//Ordenando o genoma do melhor individuo
for (y=0; y<Horas; y++)
    for (b=0; b<Variaveis; b++){
        Resultado[b][y]=genome.gene(y*Variaveis+b);
    }
cout<<endl;

ENopen("Descoberto.inp", "Descoberto.rpt", "Bin_Descoberto.rpt");

vResults ();

cout<< "\n cont_f0bjetivo: "<< cont_f0bjetivo<<endl;

finish=clock();
Tempo_decorrido = (((float)(finish - start)) / CLOCKS_PER_SEC);
cout<< "\n Tempo total de processamento " << Tempo_decorrido;
vDesaloca();
}

//Desaloca demais vetores
delete[] Nivel;
if(Variaveis !=0){delete []VariavelID1; delete []VariavelID2;}

return 0;
}

/*****
/*   Declaração das variáveis Globais   */
*****/

// Dados gerais
int Variaveis,Horas,Pmin,ND,cont_individuo;
int *VariavelID1,*VariavelID2,*IDnodemanda;
int contador=0;
int p1;//Peso para penalidade de não atendimento às demandas dos nós de consumo
int p2;//Peso referente ao nível baixo dos reservatórios
int p3;//Peso para penalidade por extravasamento
int p4_g1, p4_g2, p4_g3, p4_g4;//Peso refer. à penalidade quantid. de acionamentos
int p5;//Peso para diferença entre os níveis finais e iniciais

float P1,P2,P4,P3,P5, objF;
float *Nivel, *Genoma, *NivelInicial;
float **Level, **Estado, **Energia, **Vazao, **Demanda, **Pressao;
float **Resultado;
int R;
int w,y,q,b,v;
int i,j,jj,max=numeric_limits<int>::max(),ID1,ID2;
clock_t start, finish;

// Dados do Epanet
int NumJunctions;
int NumNodes;
int NumTanks;
int NumLinks;
int length;

// Dados da GALib
int gaType,Selector,crossover,ngen,nReplacement;
int mutation,popsize,randomSeed;
float crossoverRate,mutationRate,maxFitnessVariance,Obs1,Obs2;

// Dados de Energia
struct DadosBombas{
    int iIndex;
    char ID[15];
    int iContrato;
    int iTipoTarifa;
    int iPotencia;
    int iAcionamentos;
    float iPesoAcionamentos;
    float fPrecoConsumo;
    float fPrecoDemanda;
    float fConsumo;
    float fCustoConsumo;
};
DadosBombas** Bomba;

// Totalizadores de consumo e demanda
float DemandaTotal [6][25];
float ConsumoTotal [23][3];
float CustoConsumoTotal [23][3];

```

```

// Dados de tarifas
#define THS_Verde 0
#define THS_Azul 1
#define THS_Azul_Descoberto 2
float Preco_Cons_Fora_Ponta=0.16325, Preco_Cons_Ponta_Azul=0.25613, Preco_Cons_Ponta_Verde=0.91231;
float Preco_Dem_Verde=7.0471, Preco_Dem_Fora_Ponta_Azul=7.0471, Preco_Dem_Ponta_Azul=28.2395;
float Preco_Dem_Fora_Ponta_Desc=2.50223, Preco_Dem_Ponta_Desc=17.78373;
#define FPONTA 0
#define PONTA 1
#define TOTAL 2
#define HORA_PONTA 18<t && t<21
#define HORA_FORA_DE_PONTA t < 18 || t >= 21

// Dados de demandas
float Cd_Etinha, Cd_VicPires, Cd_Desc, Cd_MNorte, Cd_TaguaSul;
float DemandaEE_Verde_Etinha, DemandaEE_Verde_VicPires;
float DemandaEE_FPonta_Descoberto, DemandaEE_FPonta_MNorte, DemandaEE_FPonta_TaguaSul;
float DemandaEE_Ponta_Descoberto, DemandaEE_Ponta_MNorte, DemandaEE_Ponta_TaguaSul;
float CcP, CcFP, Cd, Cb;

// Dados de contratos
#define CONTRATO_DESCOBERTO 0
#define CONTRATO_MNORTE 1
#define CONTRATO_ETINHA 2
#define CONTRATO_VICENTEPIRES 3
#define CONTRATO_TAGUASUL 4

// Dados de Reservatórios
struct DadosReservatorios{
    int iIndex;
    char ID[15];
    float fDiametro;
    float fNivelInicial;
    float fNivel;
    float fVolume;
    float fNivelMinimo;
    float fNivelMaximo;
};
DadosReservatorios** Reservatorio;

// Dados de Acionamento
struct DadosValvulas{
    int iIndex;
    int iTipo;
    int iAcionamentos;
    char ID[15];
};
DadosValvulas* Valvula;

// Estado das bombas
#define OPEN 1
#define CLOSED 2

// Tipos de equipamentos
#define PIPE_CV 0
#define PIPE 1
#define PUMP 2
#define JUNCTION 0
#define RESERVOIR 1
#define TANK 2

// Parâmetros da toolkit do EPANET
#define EN_NODECOUNT 0
#define EN_TANKCOUNT 1
#define EN_LINKCOUNT 2
#define EN_PATCOUNT 3
#define EN_CURVECOUNT 4
#define EN_CONTROLCOUNT 5
#define EN_CVPIPE 0
#define EN_PIPE 1
#define EN_PUMP 2
#define EN_PRV 3
#define EN_PSV 4
#define EN_PBV 5
#define EN_FCV 6
#define EN_TCV 7
#define EN_GPV 8
#define EN_DIAMETER 0
#define EN_LENGTH 1
#define EN_ROUGHNESS 2
#define EN_MINORLOSS 3

```

```

#define EN_INITSTATUS      4
#define EN_INITSETTING    5
#define EN_KBULK          6
#define EN_KWALL          7
#define EN_FLOW           8
#define EN_VELOCITY       9
#define EN_HEADLOSS      10
#define EN_STATUS         11
#define EN_SETTING        12
#define EN_ENERGY         13
#define EN_JUNCTION       0
#define EN_RESRVOIR       1
#define EN_TANK           2
#define EN_ELEVATION      0
#define EN_BASEDEMAND     1
#define EN_PATTERN        2
#define EN_EMITTER        3
#define EN_INITQUAL       4
#define EN_SOURCEQUAL     5
#define EN_SOURCEPAT      6
#define EN_SOURCETYPE     7
#define EN_TANKLEVEL      8
#define EN_DEMAND         9
#define EN_HEAD          10
#define EN_PRESSURE       11
#define EN_QUALITY        12
#define EN_SOURCEMASS     13
#define EN_COCCEN         0
#define EN_MASS           1
#define EN_SETPOINT       2
#define EN_FLOWPACED      3
#define EN_ELEVATION      0
#define EN_BASEDEMAND     1
#define EN_PATTERN        2
#define EN_EMITTER        3
#define EN_INITQUAL       4
#define EN_SOURCEQUAL     5
#define EN_SOURCEPAT      6
#define EN_SOURCETYPE     7
#define EN_TANKLEVEL      8

```

```
// Protótipos das Funções
```

```

float fRun_epanet(void);
void vAloca(void);
void vDesaloca(void);
void vInitializer(GAGenome& g);
void vInterfDLL(void);
void vDadosDoSistema(void);
float fObjetivo(GAGenome& g);
void vDadosEPANET(void);
void vResults(void);
void vCalculaEnergia (void);
void vCalculaNivel (void);
void vSimulaEnergia(void);
void vGeraArquivoEnergia (void);
void vGeraArquivoAccionamentos (void);
void vImprimeDadosIndividuo_RunEpanet (void);
void vImprimeDadosIndividuo_Results (void);
void vGeraArquivoCalibracao (void);
void vGeraArquivoEstatisticas (void);
void vValvulas (void);

```

```

// Arquivos auxiliares para análise e estatísticas
ofstream foutAccionamentos ("Descoberto_acionamentos.txt");
ofstream foutNivel ("Descoberto_niveis.txt");
ofstream foutEstatisticas ("Descoberto_estatisticas.txt");
ofstream foutEnergia ("Descoberto_energia.txt");
ofstream foutContaAccionamentos("Descoberto_ContAccion.txt");

```

```

/*****

```

```
// Lê dados de do Epanet e da GALib
```

```

void vDadosDoSistema(void)
{
    int e;
    float nivelinicial;
    int ID1, ID2;

    ifstream gaif;
    char* fent = "Entrada_Descoberto.in";
    gaif.open(fent);

```

```

gaif.ignore(256, '*');
gaif >> gaType;

gaif.ignore(256, '*');
gaif >> Selector; // Tipo de seleção

gaif.ignore(256, '*');
gaif >> crossover; // Tipo de cruzamento

gaif.ignore(256, '*');
gaif >> crossoverRate; // Prob de cruzamento

gaif.ignore(256, '*');
gaif >> mutation; // Tipo de cruzamento

gaif.ignore(256, '*');
gaif >> mutationRate; // Prob de mutação

gaif.ignore(256, '*');
gaif >> popsize; // Tam. população

gaif.ignore(256, '*');
gaif >> ngen; // Num. de gerações

gaif.ignore(256, '*');
gaif >> randomSeed;

gaif.ignore(256, '*');
gaif >> maxFitnessVariance; // Max. variancia de fitness

gaif.ignore(256, '*');
cout<<"\n pesos penalidades";

gaif.ignore(256, '*');
gaif >> p1;

gaif.ignore(256, '*');
gaif >> p2;

gaif.ignore(256, '*');
gaif >> p3;

gaif.ignore(256, '*');
gaif.ignore(256, '*');
gaif >> p4_g1;

gaif.ignore(256, '*');
gaif >> p4_g2;

gaif.ignore(256, '*');
gaif >> p4_g3;

gaif.ignore(256, '*');
gaif >> p4_g4;
gaif.ignore(256, '*');
gaif >> p5;

gaif.ignore(256, '*');
gaif >> Variaveis; // Número de componentes de controle
if (Variaveis != 0){
    VariavelID1 = new int [Variaveis];
    VariavelID2 = new int [Variaveis];
    for (i=0; i<Variaveis;i++){
        gaif.ignore(256, '*');
        gaif >> ID1 >> ID2;
    }
}

gaif.ignore(256, '*');
gaif >> Horas;

length = Variaveis * Horas;

gaif.ignore(256, '*');
gaif >> Pmin; // Pressão min. no sistema

gaif.ignore(256, '*');
gaif >> R; // num de reservatórios

Nivel = new float [R];
gaif.ignore(256, '*');
for (e=0; e<R; e++){
    gaif.ignore(256, '*');
    gaif >> nivelinicial;
    Nivel[e] = nivelinicial;
}

```

```

    }
    gaif.close();
}

void vInterfDLL(void) //acessa a dll do EPANET
{
    hDll = LoadLibraryA("epanet2.dll");

    ENclose = (_ENclose)GetProcAddress(hDll, "ENclose");
    ENcloseH = (_ENcloseH)GetProcAddress(hDll, "ENcloseH");
    ENgetcount = (_ENgetcount)GetProcAddress(hDll, "ENgetcount");
    ENgetlinknodes = (_ENgetlinknodes)GetProcAddress(hDll, "ENgetlinknodes");
    ENgetlinktype = (_ENgetlinktype)GetProcAddress(hDll, "ENgetlinktype");
    ENgetlinkvalue = (_ENgetlinkvalue)GetProcAddress(hDll, "ENgetlinkvalue");
    ENgetnodetype = (_ENgetnodetype)GetProcAddress(hDll, "ENgetnodetype");
    ENgetnodevalue = (_ENgetnodevalue)GetProcAddress(hDll, "ENgetnodevalue");
    ENinitH = (_ENinitH)GetProcAddress(hDll, "ENinitH");
    ENnextH = (_ENnextH)GetProcAddress(hDll, "ENnextH");
    ENopen = (_ENopen)GetProcAddress(hDll, "ENopen");
    ENopenH = (_ENopenH)GetProcAddress(hDll, "ENopenH");
    ENreport = (_ENreport)GetProcAddress(hDll, "ENreport");
    ENrunH = (_ENrunH)GetProcAddress(hDll, "ENrunH");
    ENsaveH = (_ENsaveH)GetProcAddress(hDll, "ENsaveH");
    ENsetlinkvalue = (_ENsetlinkvalue)GetProcAddress(hDll, "ENsetlinkvalue");
    ENsetnodevalue = (_ENsetnodevalue)GetProcAddress(hDll, "ENsetnodevalue");
    ENsetreport = (_ENsetreport)GetProcAddress(hDll, "ENsetreport");
    ENresetreport = (_ENresetreport)GetProcAddress(hDll, "ENresetreport");
    ENgetlinkid = (_ENgetlinkid)GetProcAddress(hDll, "ENgetlinkid");
    ENgetlinkindex = (_ENgetlinkindex)GetProcAddress(hDll, "ENgetlinkindex");
    ENgetnodeid = (_ENgetnodeid)GetProcAddress(hDll, "ENgetnodeid");
    ENgetnodeindex = (_ENgetnodeindex)GetProcAddress(hDll, "ENgetnodeindex");
    ENgetpatternvalue = (_ENgetpatternvalue)GetProcAddress(hDll, "ENgetpatternvalue");
}

void vDadosEPANET(void) //lê as informações do EPANET
{
    ENopen("Descoberto.inp","Descoberto.rpt","");
    ENgetcount(EN_NODECOUNT, &NumNodes);
    ENgetcount(EN_TANKCOUNT, &NumTanks);
    ENgetcount(EN_LINKCOUNT, &NumLinks);
    NumJunctions = NumNodes - NumTanks;
    ENclose();
}

void vAloca(void) //Alocação dinâmica de memória
{
    int k,j;
    Genoma = new float[length];
    NivelInicial = new float [NumNodes+1];
    Level = new float* [Horas+1];
    for (k = 0; k <= Horas; k++) Level[k] = new float[NumNodes+1];
    Estado = new float *[Horas+1];
    for (k = 0; k <= Horas; k++) Estado[k] = new float[NumLinks+1];
    Energia = new float *[Horas+1];
    for (k = 0; k <= Horas; k++) Energia[k] = new float[NumLinks+1];
    Vazao = new float *[Horas+1];
    for (k = 0; k <= Horas; k++) Vazao[k] = new float[NumLinks+1];
    Demanda = new float* [Horas+1];
    for (k = 0; k <= Horas; k++) Demanda[k] = new float [NumNodes+1];
    Pressao = new float* [Horas+1];
    for (k = 0; k <= Horas; k++) Pressao[k] = new float[NumNodes+1];
    Resultado = new float* [Variaveis];
    for (k = 0; k < Variaveis; k++) Resultado[k] = new float [Horas];
    Bomba = new DadosBombas* [23];
    for (j=0; j<22; j++) Bomba [j] = new DadosBombas [Horas+1]
    Reservatorio = new DadosReservatorios* [18];
    for (j=0; j<17; j++) Reservatorio [j] = new DadosReservatorios [Horas+1];//
    Valvula = new DadosValvulas [11];
}

void vDesaloca(void) //desaloca memória
{
    delete []Genoma;
    delete []Resultado;
    delete []Level;
    delete []Estado;
    delete []Energia;
    delete []NivelInicial;
    delete []Bomba;
}

```

```

/*****

```

```

float fRun_epanet(void) //executa a simulação hidráulica e calcula a aptidão
{
    int i,j,k,n,m,x,z,NA;
    long t,tstep,tt,zz;
    float pressure, RefDem, energy, status, initiallevel, demand, flow;
    float Q=0;
    int f=0,g=0,h=0;
    int a=0; P1= 0; P2= 0; P3= 0; P4= 0; P5= 0; tt=0; zz=0;

    //Iniciando valores das variáveis de energia
    Cd_Etinha=0, Cd_VicPires=0, Cd_Desc=0, Cd_MNorte=0, Cd_TaguaSul=0;
    DemandaEE_Verde_Etinha=0, DemandaEE_Verde_VicPires=0;
    DemandaEE_FPonta_Descoberto=0, DemandaEE_FPonta_MNorte=0, DemandaEE_FPonta_TaguaSul=0;
    DemandaEE_Ponta_Descoberto=0, DemandaEE_Ponta_MNorte=0, DemandaEE_Ponta_TaguaSul=0;
    CcP=0, CcFP=0, Cd=0, Cb=0;
    objF=0;

    ENopen("Descoberto.inp","DescobertoDescarte.rpt","");
    ENopenH();
    ENinitH(00);

    // Escreve nível inicial dos TANKS
    for (i=1;i<=NumNodes;i++){
        ENgetnodetype(i,&z);
        if (z==TANK){
            ENsetnodevalue (i, EN_TANKLEVEL, Nivel[f]);
            f=f+1;
        }
    }

    // Roda o EPANET, setando o genoma e obtendo os dados necessários
    do{
        ENrunH(&t); // Roda o Epanet para "setar" os valores da otimização.
        if(t==zz){
            n=(t/3600);
            if(0<=n && n<Horas){
                for (i=1;i<=NumLinks;i++){
                    ENgetlinknodes(i, &x, &k);
                    for (m=0;m<Variaveis;m++){
                        if ( x == VariavelID1[m] && k == VariavelID2[m]){
                            ENsetlinkvalue(i,EN_STATUS,Genoma[n*Variaveis+m]);
                        }
                    }
                }
            }
            zz=zz+3600;
        }

        // Recupera dados do Epanet para calc. função objetivo
        ENrunH(&t); // Roda o Epanet para "setar" os valores da otimização
        if(t==tt){
            for (i=1;i<=NumLinks;i++){
                ENgetlinknodes(i, &x, &k);// procura todos elementos de controle
                for (m=0;m<Variaveis;m++){
                    if ( x == VariavelID1[m] && k == VariavelID2[m]){
                        ENgetlinkvalue(i,EN_STATUS,&status);
                        Estado[t/3600][i]=status;
                        ENgetlinktype(i,&z);
                        if(z==PUMP){
                            if(status==1){
                                ENgetlinkvalue(i, EN_ENERGY, &energy);
                                Energia[t/3600][i]=energy;
                            }
                        }
                        if(z== EN_TCV){
                            ENgetlinkvalue(i, EN_FLOW, &flow);
                            Vazao[t/3600][i]=flow;//
                        }
                    }
                }
            }
            for (i=1;i<=NumNodes;i++){
                ENgetnodetype(i,&z);
                if(z==JUNCTION){
                    ENgetnodevalue(i, EN_BASEDEMAND, &RefDem);
                    if (RefDem>0){
                        ENgetnodevalue(i, EN_DEMAND, &demand);
                        Demanda[t/3600][i] = demand;
                        ENgetnodevalue(i, EN_PRESSURE, &pressure);
                        Pressao[t/3600][i] = pressure;
                        if(pressure<=0){
                            P1+= demand*p1;
                        }
                    }
                }
            }
        }
    }
}

```

```

        }
        if (z==TANK){
            ENgetnodevalue(i, EN_PRESSURE, &pressure);
            Level[t/3600][i]=pressure;
            ENgetnodevalue(i, EN_TANKLEVEL, &initiallevel);
            NivelInicial[i]=initiallevel;
        }
    }
    tt=tt+3600;
}
ENnextH(&tstep);
} while(tstep > 0);

/*****
vCalculaEnergia();

vCalculaNivel();

vValvulas();

//Cálculo da penalidade por reservatório com nível baixo - "P2"
for (j = 0; j < 17; j++){
    for (t = 0; t <=Horas; t++){
        if(Reservatorio[j][t].fNivel < (0.1 * Reservatorio[j][t].fNivelMaximo)){
            P2+=p2;
        }
    }
}

//Cálculo da penalidade por extravasamento - "P3"
for (j = 0; j < 17; j++){
    for (t = 0; t <=Horas; t++){
        if(Reservatorio[j][t].fNivel >= 0.98 * Reservatorio[j][t].fNivelMaximo){
            P3+=p3;
        }
    }
}

//Cálculo da penalidade por diferença entre nível inicial e final - "P5"
for (j = 0; j < 17; j++){
    float D=(Reservatorio [j][0].fNivelInicial - (0.05 * Reservatorio[j][0].fNivelMaximo));
    if(Reservatorio[j][Horas].fNivel < (Reservatorio [j][0].fNivelInicial - (0.05 *
    Reservatorio[j][0].fNivelMaximo))){
        P5 += (Reservatorio [j][0].fNivelInicial - Reservatorio[j][Horas].fNivel) * p5;//
    }
}

//Calculo a penalidade por excesso do acionamentos - "P4"
P4=0;
for (j=0; j<22; j++){
    NA=0;
    for(t=1; t<=Horas; t++) {
        if((Bomba[j][t].fConsumo == 0) && (Bomba[j][t-1].fConsumo > 0)){
            NA = NA+1;
            P4 += 1.5 * Bomba[j][t-1].fCustoConsumo;
        }
    }
    Bomba[j][Horas].iAccionamentos = NA;

    if(Bomba[j][0].iPotencia >= 11000){
        if(Bomba[j][Horas].iAccionamentos>1)
            P4 = P4 + p4_g1;
    }
    if(Bomba[j][0].iPotencia < 11000 && Bomba[j][0].iPotencia >= 5500){
        if(Bomba[j][Horas].iAccionamentos>2)
            P4 = P4 + p4_g2;
    }
    if(Bomba[j][0].iPotencia < 5500 && Bomba[j][0].iPotencia > 200){
        if(Bomba[j][Horas].iAccionamentos>3)
            P4 = P4 + p4_g3;
    }
    if(Bomba[j][0].iPotencia <= 200){
        if(Bomba[j][Horas].iAccionamentos>4)
            P4 = P4 + p4_g4;
    }
}
for (j=0; j<10; j++){
    NA=0;
    for(t=1; t<=Horas; t++){
        if(Estado[t][Valvula[j].iIndex]==0 && Estado[t-1][Valvula[j].iIndex]==1){
            NA = NA + 1;
        }
    }
    Valvula[j].iAccionamentos = NA;
}

```

```

        if(Valvula[j].iAccionamentos > 4)
            P4 = P4 + p4_g4;
    }

//Recupera valores de energia da rotina "vTabelaEnergia" e calc. inform. finais
for(j=0; j<22; j++){
    CcFP += CustoConsumoTotal[j][FPONTA];
    CcP += CustoConsumoTotal[j][PONTA];
}

Cd_Etinha = (DemandaEE_Verde_Etinha*Preco_Dem_Verde);
Cd_VicPires = (DemandaEE_Verde_VicPires*Preco_Dem_Verde);
Cd_MNorte = (DemandaEE_FPonta_MNorte*Preco_Dem_Foraponta_Azul) +
(DemandaEE_Ponta_MNorte*Preco_Dem_Ponta_Azul);
Cd_TaguaSul = (DemandaEE_FPonta_TaguaSul*Preco_Dem_Foraponta_Azul) +
(DemandaEE_Ponta_TaguaSul*Preco_Dem_Ponta_Azul);
Cd_Desc = (DemandaEE_FPonta_Descoberto*Preco_Dem_Foraponta_Desc) +
(DemandaEE_Ponta_Descoberto*Preco_Dem_Ponta_Desc);
Cd = Cd_Etinha + Cd_VicPires + Cd_MNorte + Cd_TaguaSul + Cd_Desc;
Cb = CcP + CcFP + (Cd/30);

ENcloseH();

ENclose();

objF =(Cb+P1+P2+P3+P4+P5);

cont_runEpanet++;

finish=clock();

Tempo_decorrido = (((float)(finish - start)) / CLOCKS_PER_SEC);

return (objF);
}

/*****
// Seta o EPANET com melhor genoma encontrado
void vResults(void)
{
    int i,j,k,m,x,z,y,b,NA;
    long t,tstep,tt,zz;
    float pressure, RefDem, energy, status, initiallevel, demand, flow;
    float Q=0;
    int f=0;
    int a=0; P1= 0; P2= 0; P3= 0; P4= 0; P5= 0; tt=0; zz=0;
    char label[15];

//Inicia valores das variáveis de energia
objF=0;
Cd_Etinha=0, Cd_VicPires=0, Cd_Desc=0, Cd_MNorte=0, Cd_TaguaSul=0;
DemandaEE_Verde_Etinha=0, DemandaEE_Verde_VicPires=0;
DemandaEE_FPonta_Descoberto=0, DemandaEE_FPonta_MNorte=0, DemandaEE_FPonta_TaguaSul=0;
DemandaEE_Ponta_Descoberto=0, DemandaEE_Ponta_MNorte=0, DemandaEE_Ponta_TaguaSul=0;
CcP=0, CcFP=0, Cd=0, Cb=0;

ENopenH();
ENinitH(11);

// Escreve nível inicial dos TANKS
for (i=1;i<=NumNodes;i++){
    ENgetnodetype(i,&z);
    if (z==TANK){
        ENsetnodevalue (i, EN_TANKLEVEL, Nivel[f]);
        f=f+1;
    }
}

// Roda o EPANET, setando o genoma e obtendo os dados necessários
do{
    ENrunH(&t); // Roda o Epanet para "setar" os valores da otimização
    if(t==zz){
        y=(t/3600);
        if(0<=y && y<Horas){
            b=0; // "b" conta o num. de Elementos Comandáveis
            for (i=1;i<=NumLinks;i++){
                ENgetlinknodes(i, &x, &k);{
                    for (m=0;m<Variaveis;m++){
                        if ( x == VariavelID1[m] && k == VariavelID2[m]){
                            ENsetlinkvalue(i,EN_STATUS,Resultado[b][y]);
                            ENgetlinkid(i,label);//
                            b=b++;
                        }
                    }
                }
            }
        }
    }
}
}

```

```

    }
    zz=zz+3600;
}

// Recupera dados do Epanet para calc. função objetivo
ENrunH(&t); // Roda o Epanet para "setar" os valores da otimização
if(t==tt){
    for (i=1;i<=NumLinks;i++){
        ENgetlinknodes(i, &x, &k); // procura todos elementos de controle
        for (m=0;m<Variaveis;m++){
            if ( x == VariavelID1[m] && k == VariavelID2[m]){
                // pega o status de cada elem. controlável
                ENgetlinkvalue(i,EN_STATUS,&status);
                ENgetlinkid(i,label);
                Estado[t/3600][i]=status;
                ENgetlinktype(i,&z);
                if(z==PUMP){
                    if(status==1){
                        ENgetlinkvalue(i,EN_ENERGY,&energy);
                        Energia[t/3600][i]=energy;
                    }
                }
                if(z==EN_TCV){
                    ENgetlinkvalue(i,EN_FLOW, &flow);
                    Vazao[t/3600][i]=flow; //
                }
            }
        }
    }
    for (i=1;i<=NumNodes;i++){ //Recupera os dados do nó
        ENgetnodetype(i,&z);
        if (z==JUNCTION){
            ENgetnodevalue(i, EN_BASEDEMAND, &RefDem);
            if (RefDem>0){
                ENgetnodevalue(i,EN_DEMAND, &demand);
                Demanda[t/3600][i] = demand; //
                ENgetnodevalue(i, EN_PRESSURE, &pressure);
                if(pressure<=0){
                    P1+= demand*p1; //
                }
            }
        }
        if (z==TANK){
            ENgetnodevalue(i, EN_TANKLEVEL, &initiallevel);
            NivelInicial[i]=initiallevel;
            ENgetnodevalue(i,EN_PRESSURE,&pressure);
            Level[t/3600][i]=pressure;
            ENgetnodeid(i,label);
            foutNivel<<"\n " <<label<< " nivel " <<pressure <<" AT TIME
            "<<(t/3600);
        }
    }
    tt=tt+3600;
    foutAccionamentos<<endl;
    foutNivel<<endl;
}
ENnextH(&tstep);
}while (tstep > 0);

/*****
vGeraArquivoCalibracao ();

vCalculaEnergia();

vCalculaNivel();

vValvulas();

//Cálculo da penalidade por reservatório com nivel baixo - "P2"
for (j = 0; j < 17; j++){
    for (t = 0; t <=Horas; t++){
        if(Reservatorio[j][t].fNivel < (0.1 * Reservatorio[j][t].fNivelMaximo)){
            P2+=p2; //
        }
    }
}

//Cálculo da penalidade por extravasamento - "P3"
for (j = 0; j < 17; j++){
    for (t = 0; t <=Horas; t++){
        if(Reservatorio[j][t].fNivel >= 0.98 * Reservatorio[j][t].fNivelMaximo){
            P3+=p3
        }
    }
}

```

```

}

//Cálculo diferença entre nível inicial e final - "P5"
for (j = 0; j < 17; j++){
    if(Reservatorio[j][Horas].fNivel < Reservatorio [j][0].fNivelInicial - (0.05 *
        Reservatorio[j][0].fNivelMaximo)){
        P5 += (Reservatorio[j][0].fNivelInicial - Reservatorio[j][Horas].fNivel) * p5;//
    }
}

//Calculo a penalidade por excesso do acionamentos - "P4"
P4=0;
for (j=0; j<22; j++){
    NA=0;
    for(t=1; t<=Horas; t++){
        if((Bomba[j][t].fConsumo == 0) && (Bomba[j][t-1].fConsumo > 0)){
            NA = NA+1;
            P4 += 1.5 * Bomba[j][t-1].fCustoConsumo;
        }
    }
    Bomba[j][Horas].iAccionamentos = NA;

    if(Bomba[j][0].iPotencia >= 11000){
        if(Bomba[j][Horas].iAccionamentos>1)
            P4 = P4 + p4_g1;
    }
    if(Bomba[j][0].iPotencia < 11000 && Bomba[j][0].iPotencia >= 5500){
        if(Bomba[j][Horas].iAccionamentos>2)
            P4 = P4 + p4_g2;
    }
    if(Bomba[j][0].iPotencia < 5500 && Bomba[j][0].iPotencia > 200){
        if(Bomba[j][Horas].iAccionamentos>3)
            P4 = P4 + p4_g3;
    }
    if(Bomba[j][0].iPotencia <= 200){
        if(Bomba[j][Horas].iAccionamentos>4)
            P4 = P4 + p4_g4;
    }
}
for (j=0; j<10; j++){
    NA=0;
    for(t=1; t<=Horas; t++){
        if(Estado[t][Valvula[j].iIndex]==0 && Estado[t-1][Valvula[j].iIndex]==1){
            NA = NA + 1;
        }
    }
    Valvula[j].iAccionamentos = NA;
    if(Valvula[j].iAccionamentos > 4)
        P4 = P4 + p4_g4;
}

// Recupera valores de energia da rotina "vTabelaEnergia" e calcula informações finais
for(j=0; j<22; j++){
    CcFP += CustoConsumoTotal[j][FPONTA];
    CcP += CustoConsumoTotal[j][PONTA];
}

Cd_Etinha = (DemandaEE_Verde_Etinha*Preco_Dem_Verde);
Cd_VicPires = (DemandaEE_Verde_VicPires*Preco_Dem_Verde);
Cd_MNorte = (DemandaEE_FPonta_MNorte*Preco_Dem_Foraponta_Azul) +
(DemandaEE_Ponta_MNorte*Preco_Dem_Ponta_Azul);
Cd_TaguaSul = (DemandaEE_FPonta_TaguaSul*Preco_Dem_Foraponta_Azul) +
(DemandaEE_Ponta_TaguaSul*Preco_Dem_Ponta_Azul);
Cd_Desc = (DemandaEE_FPonta_Descoberto*Preco_Dem_Foraponta_Desc) +
(DemandaEE_Ponta_Descoberto*Preco_Dem_Ponta_Desc);
Cd = Cd_Etinha + Cd_VicPires + Cd_MNorte + Cd_TaguaSul + Cd_Desc;
Cb = CcP + CcFP + (Cd/30);

ENsaveH();
ENreport();
ENclose();

objF =(Cb+P1+P2+P3+P4+P5);

vImprimeDadosIndividuo_Results();

vGeraArquivoEstatisticas ();

vGeraArquivoEnergia ();

vGeraArquivoAccionamentos ();
}

//Inicia Genoma

```

```

void vInitializer(GAGenome& g)
{
    GA1DBinaryStringGenome& genome = (GA1DBinaryStringGenome&)g;
    if (Variaveis != 0)
        for (int i=0;i<Variaveis*Horas;i++) genome.gene(i, GARandomBit());
}

//Atribui valor à função objetivo
float fObjetivo(GAGenome& g)
{
    GA1DBinaryStringGenome& genome = (GA1DBinaryStringGenome&)g;
    float fitness;

    for (int i=0;i<genome.length();i++) Genoma[i]=genome.gene(i);

    objF = fRun_epanet();

    fitness = objF;

    return (fitness);
}

/*****
//rotinas auxiliares de cálculo
void vCalculaEnergia(void) // calcula valores de energia
{
    int t=0, j=0, i=0, d=0, c=0;
    float SomaCustoConsumoPonta;
    float SomaCustoConsumoFPonta;
    float SomaCustoConsumoBomba=0;

    float SomaConsumoPonta;
    float SomaConsumoFPonta;
    float SomaConsumoBomba=0;

    DemandaEE_Verde_Etinha=0;
    DemandaEE_Verde_VicPires=0;
    DemandaEE_FPonta_Descoberto=0;
    DemandaEE_Ponta_Descoberto=0;
    DemandaEE_FPonta_MNorte=0;
    DemandaEE_Ponta_MNorte=0;
    DemandaEE_FPonta_TaguaSul=0;
    DemandaEE_Ponta_TaguaSul=0;

    //Construção da Tabela Bomba (índices das bombas comandáveis)
    for(t=0; t<=Horas; t++){
        Bomba[0][t].iIndex=303;
        ENgetlinkid(Bomba[0][t].iIndex, Bomba[0][t].ID);
        Bomba[0][t].iPotencia=5500;
    }
    for(t=0; t<=Horas; t++){
        Bomba[1][t].iIndex=302;
        ENgetlinkid(Bomba[1][t].iIndex, Bomba[1][t].ID);
        Bomba[1][t].iPotencia=11000;
    }
    for(t=0; t<=Horas; t++){
        Bomba[2][t].iIndex=301;
        ENgetlinkid(Bomba[2][t].iIndex, Bomba[2][t].ID);
        Bomba[2][t].iPotencia=5500;
    }
    for(t=0; t<=Horas; t++){
        Bomba[3][t].iIndex=300;
        ENgetlinkid(Bomba[3][t].iIndex, Bomba[3][t].ID);
        Bomba[3][t].iPotencia=11000;
    }
    for(t=0; t<=Horas; t++){
        Bomba[4][t].iIndex=288;
        ENgetlinkid(Bomba[4][t].iIndex, Bomba[4][t].ID);
        Bomba[4][t].iPotencia=350;
    }
    for(t=0; t<=Horas; t++){
        Bomba[5][t].iIndex=274;
        ENgetlinkid(Bomba[5][t].iIndex, Bomba[5][t].ID);
        Bomba[5][t].iPotencia=350;
    }
    for(t=0; t<=Horas; t++){
        Bomba[6][t].iIndex=268;
        ENgetlinkid(Bomba[6][t].iIndex, Bomba[6][t].ID);
        Bomba[6][t].iPotencia=200;
    }
    for(t=0; t<=Horas; t++){
        Bomba[7][t].iIndex=291;
        ENgetlinkid(Bomba[7][t].iIndex, Bomba[7][t].ID);
        Bomba[7][t].iPotencia=200;
    }
}

```

```

for(t=0; t<=Horas; t++){
    Bomba[8][t].iIndex=276;
    ENgetlinkid(Bomba[8][t].iIndex, Bomba[8][t].ID);
    Bomba[8][t].iPotencia=375;
}
for(t=0; t<=Horas; t++){
    Bomba[9][t].iIndex=286;
    ENgetlinkid(Bomba[9][t].iIndex, Bomba[9][t].ID);
    Bomba[9][t].iPotencia=375;
}
for(t=0; t<=Horas; t++){
    Bomba[10][t].iIndex=297;
    ENgetlinkid(Bomba[10][t].iIndex, Bomba[10][t].ID);
    Bomba[10][t].iPotencia=150;
}
for(t=0; t<=Horas; t++){
    Bomba[11][t].iIndex=270;
    ENgetlinkid(Bomba[11][t].iIndex, Bomba[11][t].ID);
    Bomba[11][t].iPotencia=150;
}
for(t=0; t<=Horas; t++){
    Bomba[12][t].iIndex=295;
    ENgetlinkid(Bomba[12][t].iIndex, Bomba[12][t].ID);
    Bomba[12][t].iPotencia=100;
}
for(t=0; t<=Horas; t++){
    Bomba[13][t].iIndex=289;
    ENgetlinkid(Bomba[13][t].iIndex, Bomba[13][t].ID);
    Bomba[13][t].iPotencia=100;
}
for(t=0; t<=Horas; t++){
    Bomba[14][t].iIndex=278;
    ENgetlinkid(Bomba[14][t].iIndex, Bomba[14][t].ID);
    Bomba[14][t].iPotencia=100;
}
for(t=0; t<=Horas; t++){
    Bomba[15][t].iIndex=313;
    ENgetlinkid(Bomba[15][t].iIndex, Bomba[15][t].ID);
    Bomba[15][t].iPotencia=150;
}
for(t=0; t<=Horas; t++){
    Bomba[16][t].iIndex=312;
    ENgetlinkid(Bomba[16][t].iIndex, Bomba[16][t].ID);
    Bomba[16][t].iPotencia=150;
}
for(t=0; t<=Horas; t++){
    Bomba[17][t].iIndex=285;
    ENgetlinkid(Bomba[17][t].iIndex, Bomba[17][t].ID);
    Bomba[17][t].iPotencia=550;
}
for(t=0; t<=Horas; t++){
    Bomba[18][t].iIndex=279;
    ENgetlinkid(Bomba[18][t].iIndex, Bomba[18][t].ID);
    Bomba[18][t].iPotencia=550;
}
for(t=0; t<=Horas; t++){
    Bomba[19][t].iIndex=284;
    ENgetlinkid(Bomba[19][t].iIndex, Bomba[19][t].ID);
    Bomba[19][t].iPotencia=800;
}
for(t=0; t<=Horas; t++){
    Bomba[20][t].iIndex=281;
    ENgetlinkid(Bomba[20][t].iIndex, Bomba[20][t].ID);
    Bomba[20][t].iPotencia=800;
}
for(t=0; t<=Horas; t++){
    Bomba[21][t].iIndex=298;
    ENgetlinkid(Bomba[21][t].iIndex, Bomba[21][t].ID);
    Bomba[21][t].iPotencia=800;
}
for (j=0; j<4; j++){
    for(t=0; t<=Horas; t++){
        Bomba[j][t].iContrato = CONTRATO_DESCOBERTO;
        Bomba[j][t].iTipoTarifa = THS_Azul_Descoberto;
        Bomba[j][t].fConsumo = 0;
        Bomba[j][t].fCustoConsumo = 0;
        if (HORA_PONTA){
            Bomba[j][t].fPrecoConsumo = 0.25613;
            Bomba[j][t].fPrecoDemanda = 17.78373;
        }
        else{
            Bomba[j][t].fPrecoConsumo = 0.16325;
            Bomba[j][t].fPrecoDemanda = 2.50223;
        }
    }
}

```

```

}
for (j=4; j<14; j++){
    for(t=0; t<=Horas; t++){
        Bomba[j][t].iContrato = CONTRATO_MNORTE;
        Bomba[j][t].iTipoTarifa = THS_Azul;
        Bomba[j][t].fConsumo = 0;
        Bomba[j][t].fCustoConsumo = 0;
        if(HORA_PONTA){
            Bomba[j][t].fPrecoConsumo = 0.25613;
            Bomba[j][t].fPrecoDemanda = 28.395;
        }
        else{
            Bomba[j][t].fPrecoConsumo = 0.16325;
            Bomba[j][t].fPrecoDemanda = 7.0471;
        }
    }
}
for (j=14; j<15; j++){
    for(t=0; t<=Horas; t++){
        Bomba[j][t].iContrato = CONTRATO_ETINHA;
        Bomba[j][t].iTipoTarifa = THS_Verde;
        Bomba[j][t].fConsumo = 0;
        Bomba[j][t].fCustoConsumo = 0;
        if(HORA_PONTA){
            Bomba[j][t].fPrecoConsumo = 0.91231;
            Bomba[j][t].fPrecoDemanda = 7.0471;
        }
        else{
            Bomba[j][t].fPrecoConsumo = 0.16325;
            Bomba[j][t].fPrecoDemanda = 7.0471;
        }
    }
}
for (j=15; j<17; j++){
    for(t=0; t<=Horas; t++){
        Bomba[j][t].iContrato = CONTRATO_VICENTEPIRES;
        Bomba[j][t].iTipoTarifa = THS_Verde;
        Bomba[j][t].fConsumo = 0;
        Bomba[j][t].fCustoConsumo = 0;
        if(HORA_PONTA){
            Bomba[j][t].fPrecoConsumo = 0.91231;
            Bomba[j][t].fPrecoDemanda = 7.0471;
        }
        else{
            Bomba[j][t].fPrecoConsumo = 0.16325;
            Bomba[j][t].fPrecoDemanda = 7.0471;
        }
    }
}
for (j=17; j<22; j++){
    for(t=0; t<=Horas; t++){
        Bomba[j][t].iContrato = CONTRATO_TAGUASUL;
        Bomba[j][t].iTipoTarifa = THS_Azul;
        Bomba[j][t].fConsumo = 0;
        Bomba[j][t].fCustoConsumo = 0;
        if(HORA_PONTA){
            Bomba[j][t].fPrecoConsumo = 0.25613;
            Bomba[j][t].fPrecoDemanda = 28.395;
        }
        else{
            Bomba[j][t].fPrecoConsumo = 0.16325;
            Bomba[j][t].fPrecoDemanda = 7.0471;
        }
    }
}
}

//Preenchimento dados de consumo de energia na tabela Dados Bombas
for (j = 0; j < 22; j++){
    for (t = 0; t <=Horas; t++){
        if (Estado[t][Bomba[j][0].iIndex] == 1){
            Bomba[j][t].fConsumo = Energia[t][Bomba[j][0].iIndex];
            Bomba[j][t].fCustoConsumo = Bomba[j][t].fConsumo * Bomba[j][t].fPrecoConsumo;
        }
    }
}

//Preenchimento da tabela de Consumo (KW/h) de Bombeamento por equipamento
for(j=0; j<22; j++){
    SomaConsumoPonta=0;
    SomaConsumoFPonta=0;
    //Soma consumos da hora 0 à hora 23 (24 períodos (horas))
    for(t=0; t<Horas; t++){
        if(HORA_PONTA)

```

```

        SomaConsumoPonta += Bomba[j][t].fConsumo;
    else
        SomaConsumoFPonta += Bomba[j][t].fConsumo;
    }
    ConsumoTotal[j][FPONTA] = SomaConsumoFPonta; //F.Ponta
    ConsumoTotal[j][PONTA] = SomaConsumoPonta; // Ponta
    ConsumoTotal[j][TOTAL] = ConsumoTotal[j][FPONTA] + ConsumoTotal[j][PONTA];
}

//Prench. tabela de Custo (R$) de Consumo de Bombeamento por equipamento
for(j=0; j<22; j++){
    SomaCustoConsumoPonta=0;
    SomaCustoConsumoFPonta=0;
    //Soma consumos da hora 0 á 23, totalizando 24 períodos (horas)
    for(t=0; t<Horas; t++){
        if(HORA_PONTA)
            SomaCustoConsumoPonta += Bomba[j][t].fCustoConsumo;
        else
            SomaCustoConsumoFPonta += Bomba[j][t].fCustoConsumo;
    }
    CustoConsumoTotal[j][FPONTA] = SomaCustoConsumoFPonta; //F. Ponta
    CustoConsumoTotal[j][PONTA] = SomaCustoConsumoPonta; // Ponta
    CustoConsumoTotal[j][TOTAL] = CustoConsumoTotal[j][FPONTA] + CustoConsumoTotal[j][PONTA];
}
//Iniciacao da tab. DemandaTotal (valores iniciais)
for(d=0; d<5; d++){
    //Soma consumos da hora 0 à 23, que totalizam 24 períodos (horas)
    for(t=0; t<=Horas; t++){
        DemandaTotal[d][t]= 0;
    }
}

//Cálculo das demandas das Unid. Consumidoras (energia (Kw))
for (t = 0; t <=Horas; t++){
    for (j = 0; j < 22; j++){
        if(Bomba[j][0].iContrato == CONTRATO_DESCOBERTO)
            DemandaTotal[CONTRATO_DESCOBERTO][t] += Bomba[j][t].fConsumo;

        if(Bomba[j][0].iContrato == CONTRATO_MNORTE)
            DemandaTotal[CONTRATO_MNORTE][t] += Bomba[j][t].fConsumo;

        if (Bomba[j][0].iContrato == CONTRATO_ETINHA)
            DemandaTotal[CONTRATO_ETINHA][t] += Bomba[j][t].fConsumo;

        if(Bomba[j][0].iContrato == CONTRATO_VICENTEPIRES)
            DemandaTotal[CONTRATO_VICENTEPIRES][t] += Bomba[j][t].fConsumo;

        if (Bomba[j][0].iContrato == CONTRATO_TAGUASUL)
            DemandaTotal[CONTRATO_TAGUASUL][t] += Bomba[j][t].fConsumo;
    }
}

// Identificacao do maior valor de demanda para cada Unidade Consumidora
for(t=0; t<=Horas; t++){
    if(HORA_PONTA){
        if (DemandaTotal[CONTRATO_DESCOBERTO][t]>
            DemandaEE_Ponta_Descoberto)
            DemandaEE_Ponta_Descoberto = DemandaTotal[CONTRATO_DESCOBERTO][t];

        if (DemandaTotal[CONTRATO_MNORTE][t]>DemandaEE_Ponta_MNorte)
            DemandaEE_Ponta_MNorte = DemandaTotal[CONTRATO_MNORTE][t];

        if (DemandaTotal[CONTRATO_TAGUASUL][t]>
            DemandaEE_Ponta_TaguaSul)
            DemandaEE_Ponta_TaguaSul = DemandaTotal[CONTRATO_TAGUASUL][t];
    }
    else{
        if (DemandaTotal[CONTRATO_DESCOBERTO][t]>
            DemandaEE_FPonta_Descoberto)
            DemandaEE_FPonta_Descoberto = DemandaTotal[CONTRATO_DESCOBERTO][t];

        if (DemandaTotal[CONTRATO_MNORTE][t]>
            DemandaEE_FPonta_MNorte)
            DemandaEE_FPonta_MNorte = DemandaTotal[CONTRATO_MNORTE][t];

        if (DemandaTotal[CONTRATO_TAGUASUL][t]>
            DemandaEE_FPonta_TaguaSul)
            DemandaEE_FPonta_TaguaSul = DemandaTotal[CONTRATO_TAGUASUL][t];
    }
}
for(t=0; t<=Horas; t++){
    if (DemandaTotal[CONTRATO_ETINHA][t]>
        DemandaEE_Verde_Etinha)
        DemandaEE_Verde_Etinha =
        DemandaTotal[CONTRATO_ETINHA][t];
}

```

```

        if (DemandaTotal[CONTRATO_VICENTEPIRES][t]>
            DemandaEE_Verde_VicPires)
            DemandaEE_Verde_VicPires = DemandaTotal[CONTRATO_VICENTEPIRES][t];
    }
}

void vCalculaNivel (void) //Constrói tabela com informação dos reservatórios
{
    int t=0, j=0;

    for(t=0; t<=Horas; t++){
        Reservatorio[0][t].iIndex=251;
        ENgetnodeid(Reservatorio[0][t].iIndex, Reservatorio[0][t].ID);
        Reservatorio[0][t].fNivelInicial = NivelInicial[Reservatorio[0][t].iIndex];
        Reservatorio[0][t].fDiametro = 48.0;
        Reservatorio[0][t].fNivelMinimo = 0;
        Reservatorio[0][t].fNivelMaximo = 2.0;
        Reservatorio[0][t].fNivel = 0;
        Reservatorio[0][t].fVolume = 0;
    }

    for(t=0; t<=Horas; t++){
        Reservatorio[1][t].iIndex=252;
        ENgetnodeid(Reservatorio[1][t].iIndex, Reservatorio[1][t].ID);
        Reservatorio[1][t].fNivelInicial = NivelInicial[Reservatorio[1][t].iIndex];
        Reservatorio[1][t].fDiametro = 49.0;
        Reservatorio[1][t].fNivelMinimo = 0;
        Reservatorio[1][t].fNivelMaximo = 5.3;
        Reservatorio[1][t].fNivel = 0;
        Reservatorio[1][t].fVolume = 0;
    }

    for(t=0; t<=Horas; t++){
        Reservatorio[2][t].iIndex=253;
        ENgetnodeid(Reservatorio[2][t].iIndex, Reservatorio[2][t].ID);
        Reservatorio[2][t].fNivelInicial = NivelInicial[Reservatorio[2][t].iIndex];
        Reservatorio[2][t].fDiametro = 18.4;
        Reservatorio[2][t].fNivelMinimo = 0;
        Reservatorio[2][t].fNivelMaximo = 5.3;
        Reservatorio[2][t].fNivel = 0;
        Reservatorio[2][t].fVolume = 0;
    }

    for(t=0; t<=Horas; t++){
        Reservatorio[3][t].iIndex=254;
        ENgetnodeid(Reservatorio[3][t].iIndex, Reservatorio[3][t].ID);
        Reservatorio[3][t].fNivelInicial = NivelInicial[Reservatorio[3][t].iIndex];
        Reservatorio[3][t].fDiametro = 97,7;
        Reservatorio[3][t].fNivelMinimo = 0;
        Reservatorio[3][t].fNivelMaximo = 4.0;
        Reservatorio[3][t].fNivel = 0;
        Reservatorio[3][t].fVolume = 0;
    }

    for(t=0; t<=Horas; t++){
        Reservatorio[4][t].iIndex=256;
        ENgetnodeid(Reservatorio[4][t].iIndex, Reservatorio[4][t].ID);
        Reservatorio[4][t].fNivelInicial = NivelInicial[Reservatorio[4][t].iIndex];
        Reservatorio[4][t].fDiametro = 65.8;
        Reservatorio[4][t].fNivelMinimo = 0;
        Reservatorio[4][t].fNivelMaximo = 5.0;
        Reservatorio[4][t].fNivel = 0;
        Reservatorio[4][t].fVolume = 0;
    }

    for(t=0; t<=Horas; t++){
        Reservatorio[5][t].iIndex=258;
        ENgetnodeid(Reservatorio[5][t].iIndex, Reservatorio[5][t].ID);
        Reservatorio[5][t].fNivelInicial = NivelInicial[Reservatorio[5][t].iIndex];
        Reservatorio[5][t].fDiametro = 59.7;
        Reservatorio[5][t].fNivelMinimo = 0;
        Reservatorio[5][t].fNivelMaximo = 5.0;
        Reservatorio[5][t].fNivel = 0;
        Reservatorio[5][t].fVolume = 0;
    }

    for(t=0; t<=Horas; t++){
        Reservatorio[6][t].iIndex=259;
        ENgetnodeid(Reservatorio[6][t].iIndex, Reservatorio[6][t].ID);
        Reservatorio[6][t].fNivelInicial = NivelInicial[Reservatorio[6][t].iIndex];
        Reservatorio[6][t].fDiametro = 90.0;
        Reservatorio[6][t].fNivelMinimo = 0;
        Reservatorio[6][t].fNivelMaximo = 4.0;
        Reservatorio[6][t].fNivel = 0;
    }
}

```

```

        Reservatorio[6][t].fVolume = 0;
    }

    for(t=0; t<=Horas; t++){
        Reservatorio[7][t].iIndex=260;
        ENgetnodeid(Reservatorio[7][t].iIndex, Reservatorio[7][t].ID);
        Reservatorio[7][t].fNivelInicial = NivelInicial[Reservatorio[7][t].iIndex];
        Reservatorio[7][t].fDiametro = 101.0;
        Reservatorio[7][t].fNivelMinimo = 0;
        Reservatorio[7][t].fNivelMaximo = 5.0;
        Reservatorio[7][t].fNivel = 0;
        Reservatorio[7][t].fVolume = 0;
    }

    for(t=0; t<=Horas; t++){
        Reservatorio[8][t].iIndex=261;
        ENgetnodeid(Reservatorio[8][t].iIndex, Reservatorio[8][t].ID);
        Reservatorio[8][t].fNivelInicial = NivelInicial[Reservatorio[8][t].iIndex];
        Reservatorio[8][t].fDiametro = 24.0;
        Reservatorio[8][t].fNivelMinimo = 0;
        Reservatorio[8][t].fNivelMaximo = 5.0;
        Reservatorio[8][t].fNivel = 0;
        Reservatorio[8][t].fVolume = 0;
    }

    for(t=0; t<=Horas; t++){
        Reservatorio[9][t].iIndex=262;
        ENgetnodeid(Reservatorio[9][t].iIndex, Reservatorio[9][t].ID);
        Reservatorio[9][t].fNivelInicial = NivelInicial[Reservatorio[9][t].iIndex];
        Reservatorio[9][t].fDiametro = 60.0;
        Reservatorio[9][t].fNivelMinimo = 0;
        Reservatorio[9][t].fNivelMaximo = 5.3;
        Reservatorio[9][t].fNivel = 0;
        Reservatorio[9][t].fVolume = 0;
    }

    for(t=0; t<=Horas; t++){
        Reservatorio[10][t].iIndex=263;
        ENgetnodeid(Reservatorio[10][t].iIndex, Reservatorio[10][t].ID);
        Reservatorio[10][t].fNivelInicial = NivelInicial[Reservatorio[10][t].iIndex];
        Reservatorio[10][t].fDiametro = 42.2;
        Reservatorio[10][t].fNivelMinimo = 0;
        Reservatorio[10][t].fNivelMaximo = 5.0;
        Reservatorio[10][t].fNivel = 0;
        Reservatorio[10][t].fVolume = 0;
    }

    for(t=0; t<=Horas; t++){
        Reservatorio[11][t].iIndex=264;
        ENgetnodeid(Reservatorio[11][t].iIndex, Reservatorio[11][t].ID);
        Reservatorio[11][t].fNivelInicial = NivelInicial[Reservatorio[11][t].iIndex];
        Reservatorio[11][t].fDiametro = 89.2;
        Reservatorio[11][t].fNivelMinimo = 0;
        Reservatorio[11][t].fNivelMaximo = 4.0;
        Reservatorio[11][t].fNivel = 0;
        Reservatorio[11][t].fVolume = 0;
    }

    for(t=0; t<=Horas; t++){
        Reservatorio[12][t].iIndex=265;
        ENgetnodeid(Reservatorio[12][t].iIndex, Reservatorio[12][t].ID);
        Reservatorio[12][t].fNivelInicial = NivelInicial[Reservatorio[12][t].iIndex];
        Reservatorio[12][t].fDiametro = 119.7;
        Reservatorio[12][t].fNivelMinimo = 0;
        Reservatorio[12][t].fNivelMaximo = 4.0;
        Reservatorio[12][t].fNivel = 0;
        Reservatorio[12][t].fVolume = 0;
    }

    for(t=0; t<=Horas; t++){
        Reservatorio[13][t].iIndex=266;
        ENgetnodeid(Reservatorio[13][t].iIndex, Reservatorio[13][t].ID);
        Reservatorio[13][t].fNivelInicial = NivelInicial[Reservatorio[13][t].iIndex];
        Reservatorio[13][t].fDiametro = 32.6;
        Reservatorio[13][t].fNivelMinimo = 0;
        Reservatorio[13][t].fNivelMaximo = 6.0;
        Reservatorio[13][t].fNivel = 0;
        Reservatorio[13][t].fVolume = 0;
    }

    for(t=0; t<=Horas; t++){
        Reservatorio[14][t].iIndex=270;
        ENgetnodeid(Reservatorio[14][t].iIndex, Reservatorio[14][t].ID);
        Reservatorio[14][t].fNivelInicial = NivelInicial[Reservatorio[14][t].iIndex];
        Reservatorio[14][t].fDiametro = 29.3;
    }

```

```

        Reservatorio[14][t].fNivelMinimo = 0;
        Reservatorio[14][t].fNivelMaximo = 4.5;
        Reservatorio[14][t].fNivel = 0;
        Reservatorio[14][t].fVolume = 0;
    }

    for(t=0; t<=Horas; t++){
        Reservatorio[15][t].iIndex=271;
        ENgetnodeid(Reservatorio[15][t].iIndex, Reservatorio[15][t].ID);
        Reservatorio[15][t].fNivelInicial = NivelInicial[Reservatorio[15][t].iIndex];
        Reservatorio[15][t].fDiametro = 57.0;
        Reservatorio[15][t].fNivelMinimo = 0;
        Reservatorio[15][t].fNivelMaximo = 4.0;
        Reservatorio[15][t].fNivel = 0;
        Reservatorio[15][t].fVolume = 0;
    }

    for(t=0; t<=Horas; t++){
        Reservatorio[16][t].iIndex=273;
        ENgetnodeid(Reservatorio[16][t].iIndex, Reservatorio[16][t].ID);
        Reservatorio[16][t].fNivelInicial = NivelInicial[Reservatorio[16][t].iIndex];
        Reservatorio[16][t].fDiametro = 50.5;
        Reservatorio[16][t].fNivelMinimo = 0;
        Reservatorio[16][t].fNivelMaximo = 6.0;
        Reservatorio[16][t].fNivel = 0;
        Reservatorio[16][t].fVolume = 0;
    }

    //Preenchimento dados de volume nos reservatórios
    for (j = 0; j < 17; j++){
        for (t = 0; t <=Horas; t++){
            Reservatorio[j][t].fNivel = Level[t][Reservatorio[j][0].iIndex];
            Reservatorio[j][t].fVolume = Reservatorio[j][t].fNivel * 3.14/4 *
                pow(Reservatorio[j][0].fDiametro,2)
        }
    }
}

void vValvulas (void) //Constrói tabela com informação das válvulas
{
    Valvula[0].iIndex=223;
    ENgetlinkid(Valvula[0].iIndex, Valvula[0].ID);
    ENgetlinktype(Valvula[0].iIndex, &Valvula[0].iTipo);

    Valvula[1].iIndex=224;
    ENgetlinkid(Valvula[1].iIndex, Valvula[1].ID);
    ENgetlinktype(Valvula[1].iIndex, &Valvula[1].iTipo);

    Valvula[2].iIndex=225;
    ENgetlinkid(Valvula[2].iIndex, Valvula[2].ID);
    ENgetlinktype(Valvula[2].iIndex, &Valvula[2].iTipo);

    Valvula[3].iIndex=253;
    ENgetlinkid(Valvula[3].iIndex, Valvula[3].ID);
    ENgetlinktype(Valvula[3].iIndex, &Valvula[3].iTipo);

    Valvula[4].iIndex=317;
    ENgetlinkid(Valvula[4].iIndex, Valvula[4].ID);
    ENgetlinktype(Valvula[4].iIndex, &Valvula[4].iTipo);

    Valvula[5].iIndex=322;
    ENgetlinkid(Valvula[5].iIndex, Valvula[5].ID);
    ENgetlinktype(Valvula[5].iIndex, &Valvula[5].iTipo);

    Valvula[6].iIndex=324;
    ENgetlinkid(Valvula[6].iIndex, Valvula[6].ID);
    ENgetlinktype(Valvula[6].iIndex, &Valvula[6].iTipo);

    Valvula[7].iIndex=325;
    ENgetlinkid(Valvula[7].iIndex, Valvula[7].ID);
    ENgetlinktype(Valvula[7].iIndex, &Valvula[7].iTipo);

    Valvula[8].iIndex=327;
    ENgetlinkid(Valvula[8].iIndex, Valvula[8].ID);
    ENgetlinktype(Valvula[8].iIndex, &Valvula[8].iTipo);

    Valvula[9].iIndex=328;
    ENgetlinkid(Valvula[9].iIndex, Valvula[9].ID);
    ENgetlinktype(Valvula[9].iIndex, &Valvula[9].iTipo);
}

void vGeraArquivoEnergia (void) //Gera arquivo com os valores de energia
{
    // Para imprimir os resultados de Energia
}

```

```

for (int j = 0; j < 22; j++){
    for(int t=0; t<=Horas; t++){
        // Extrai informações por equipamento a cada hora
        foutEnergia<<"\n "<<Bomba[j][0].ID<<" Index "<<Bomba[j][0].iIndex <<"Hora " <<t<<endl;
        if(HORA_FORA_DE_PONTA){
            foutEnergia << " Consumo Fora de Ponta " << Bomba[j][t].fConsumo <<endl;
        }
        else{
            foutEnergia << " Consumo Ponta " << Bomba[j][t].fConsumo <<endl;
        }
    }
    // Extrai informações por unidade consumidora totalizadas em 24h
    foutEnergia << "\n Index " << Bomba[j][0].iIndex <<" " <<Bomba[j][0].ID <<endl;
    foutEnergia << "Consumo F Ponta;" << ConsumoTotal[j][FPONTA] <<endl;
    foutEnergia << "Custo Consumo F Ponta;" << CustoConsumoTotal[j][FPONTA] <<endl;
    foutEnergia << "Consumo Ponta;" << ConsumoTotal[j][PONTA] <<endl;
    foutEnergia << "Custo Consumo Ponta;" << CustoConsumoTotal[j][PONTA] <<endl;
    foutEnergia << "Consumo Total da Bomba;" << ConsumoTotal[j][TOTAL] <<endl;
    foutEnergia << "Custo de Consumo da Bomba" << CustoConsumoTotal[j][TOTAL] <<endl;
    foutEnergia << "*****" <<endl;
}

// Extrai informações por individuo

foutEnergia << "\n Demanda Ponta Descoberto;" << DemandaEE_Ponta_Descoberto <<endl;
foutEnergia << "Demanda Fora de Ponta Descoberto;" << DemandaEE_FPonta_Descoberto <<endl;
foutEnergia << "Demanda Ponta MNorte;" << DemandaEE_Ponta_MNorte <<endl;
foutEnergia << "Demanda Fora de Ponta MNorte;" << DemandaEE_FPonta_MNorte <<endl;
foutEnergia << "Demanda Verde Etinha;" << DemandaEE_Verde_Etinha <<endl;
foutEnergia << "Demanda Verde Vicente Pires;" << DemandaEE_Verde_VicPires <<endl;
foutEnergia << "Demanda Ponta Tag Sul;" << DemandaEE_Ponta_TaguaSul <<endl;
foutEnergia << "Demanda Fora de Ponta Tag Sul;" << DemandaEE_FPonta_TaguaSul <<endl;
foutEnergia <<"***** Final dados energia individuo" <<cont_runEpanet+1<<"*****" <<endl;
}

void vGeraArquivoAccionamentos (void)
{
    // Imprime o número de acionamentos de cada equipamento

    foutContaAccionamentos <<"\n Número de acionamentos de cada elemento " <<endl;
    for (int j = 0; j < 22; j++){
        foutContaAccionamentos << "\n"<<Bomba[j][0].ID <<"Index:"<<Bomba[j][0].iIndex<<" ";
        foutContaAccionamentos << Bomba[j][Horas].iAccionamentos <<" Accionamentos " <<endl;
    }
    for(int j = 0; j < 10; j++){
        foutContaAccionamentos << "\n"<<Valvula[j].ID <<"Index: " << Valvula[j].iIndex<<" ";
        foutContaAccionamentos << Valvula[j].iAccionamentos <<" Accionamentos " <<endl;
    }
    foutContaAccionamentos << "*****" <<endl;
}

void vImprimeDadosIndividuo_RunEpanet (void)
{
    cout <<"\n P1 = " << P1;
    cout <<"\n P2 = " << P2;
    cout <<"\n P3 = " << P3;
    cout <<"\n P4 = " << P4;
    cout <<"\n P5 = " << P5;
    cout <<endl;
    cout <<"\n Custo de Consumo de Energia FPonta " << CcFP;
    cout <<"\n Custo de Consumo de Energia Ponta " << CcP;
    cout <<"\n Custo Total de Consumo de Energia " << CcP+CcFP;
    cout <<"\n Custo Total de Demanda " << Cd;
    cout <<endl;
    cout <<"\n Custo Total de Bombeamento " << Cb;
    cout <<endl;
    cout <<"\n Aptidao do individuo = " << objF <<endl;
    cout <<"\n ***** fim do individuo "<<cont_runEpanet<<" ***** " <<endl;
    cout <<endl;
    cout << Tempo_decorrido<<endl;
}

void vImprimeDadosIndividuo_Results (void)
{
    cout<<"\n P1 = " << P1;
    cout<<"\n P2 = " << P2;
    cout<<"\n P3 = " << P3;
    cout<<"\n P4 = " << P4;
    cout<<"\n P5 = " << P5;
    cout<<endl;
    cout<<"\n Custo de Consumo de Energia FPonta " << CcFP;
    cout<<"\n Custo de Consumo de Energia Ponta " << CcP;
}

```

```

cout<<"\n Custo Total de Consumo de Energia " << CcP+CcFP;
cout<<"\n Custo Total de Demanda " << Cd;
cout<<endl;
cout<<"\n Custo Total de Bombeamento " << Cb;
cout<<endl;
cout<<"\n Apta do melhor individuo = "<<objf<<endl;
cout<<endl;
cout<< Tempo_decorrido<<endl;
}

void vGeraArquivoEstatisticas (void)
{
    foutEstatisticas<<"\n Dados Gerais "<<endl;
    foutEstatisticas<<"\n Pesos das penalidades: p1 = "<<p1<<" p2 = "<<p2<<" p3 = "<<p3<<" p5 = "<<p5;
    foutEstatisticas<<"\n p4: Grupo1 = "<<p4_g1<<" Grupo2 = "<<p4_g2<<" Grupo3 = "<<p4_g3<<" Grupo4 = "<<p4_g4<<endl;
    foutEstatisticas<<"\n Penalidades:P1 = "<<P1<<" P2 = "<<P2<<" P3 = "<<P3<<" P4 = "<<P4<<" P5 = "<<P5<<endl;

    foutEstatisticas<<"\n Dados AG ";
    foutEstatisticas<<"\n Tamanho da Populacao = " <<popsiz;
    foutEstatisticas<<"\n N. de Geracoes = " <<nngen;
    foutEstatisticas<<"\n Semente Aleatoria = " <<randomSeed;
    foutEstatisticas<<"\n Tipo de Selecao = " <<Selector<<"(0:Rank,1:RodaRoleta,2:Torneio, 3:Uniforme)";
    foutEstatisticas<<"\n Tipo de Recombinacao = " <<crossover<<"(0:Uniforme, 1:Um Ponto, 2:Dois Pontos, 3:Par/Impar)";
    foutEstatisticas<<"\n Prob de Recombinacao = " <<crossoverRate;
    foutEstatisticas<<"\n Tipo de Mutacao = " <<mutation<<" (0: bit a bit)";
    foutEstatisticas<<"\n Prob de Mutacao = " <<mutationRate<<endl;
    foutEstatisticas<<"\n Apta do = " <<objf<<endl;

    foutEstatisticas<<"\n Dados de energia ";
    foutEstatisticas<<"\n Custo Consumo Ponta " << CcP;
    foutEstatisticas<<"\n Custo Consumo Fora Ponta " << CcFP;
    foutEstatisticas<<"\n Custo Total Consumo " << (CcP + CcFP)<<endl;
    foutEstatisticas<<"\n Custo Demanda Etinha " << Cd_Etinha;
    foutEstatisticas<<"\n Custo Demanda Vicente Pires " << Cd_VicPires;

    foutEstatisticas<<"\n Custo Demanda MNorte - FPonta e Ponta "<<
    <<(DemandaEE_FP_MNorte*Preco_Dem_Fora_Ponta_Azul)<<" "<<(DemandaEE_P_MNorte*Preco_Dem_Ponta_Azul);

    foutEstatisticas<<"\n Custo Demanda Tag Sul - FPonta e Ponta "<<
    <<(DemandaEE_FPonta_TaguaSul*Preco_Dem_F_Ponta_Azul)<<" "<<(DemandaEE_Ponta_TaguaSul*Preco_Dem_Ponta_Azul);

    foutEstatisticas<<"\n Custo Demanda Descoberto - FPonta e Ponta "<<
    <<(DemandaEE_FPonta_Descoberto*Preco_Dem_Fora_Ponta_Desc)<<" "<<(DemandaEE_Ponta_Descoberto*Preco_Dem_Ponta_Desc);

    foutEstatisticas<<"\n Custo Total Demanda "<< Cd;

    foutEstatisticas<<"\n Custo Demanda Ponderada "<<(Cd/30)<<endl;

    foutEstatisticas<<"\n Gasto Total de Energia " <<(CcP+CcFP+Cd);

    foutEstatisticas<<"\n Gasto Total de Energia (Ponderado 24h) "<< Cb <<endl;

    foutEstatisticas<<"\n Tempo_Gasto "<< Tempo_decorrido<<endl;

    foutEstatisticas<<"*****"<<endl;
    foutEstatisticas<<endl;
}

```

APÊNDICE C - DADOS DA CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRÁULICO

C.1 - RELATÓRIO DE ESTATÍSTICAS DE CALIBRAÇÃO

Calibration Report - Pressure

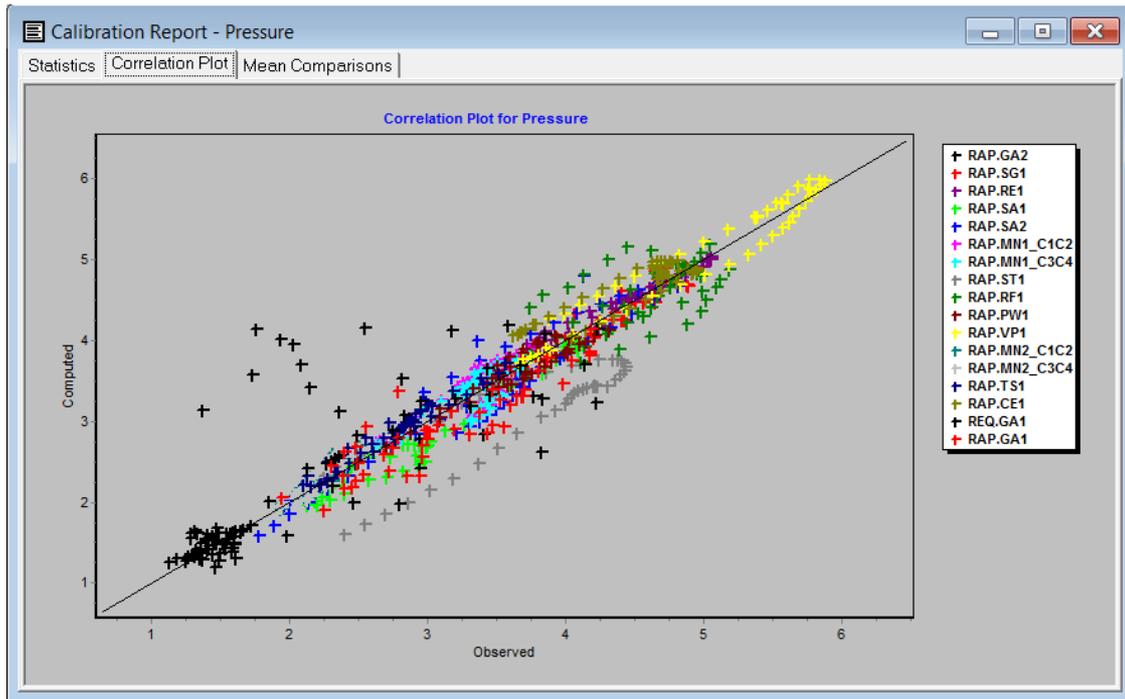
Statistics | Correlation Plot | Mean Comparisons

Calibration Statistics for Pressure

Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
RAP.GA2	48	1.45	1.48	0.095	0.132
RAP.SG1	48	4.36	4.34	0.090	0.116
RAP.RE1	48	4.29	4.35	0.081	0.102
RAP.SA1	48	3.14	2.94	0.198	0.232
RAP.SA2	48	3.44	3.41	0.211	0.256
RAP.MN1_C1C2	48	3.33	3.38	0.157	0.177
RAP.MN1_C3C4	48	3.33	3.34	0.144	0.165
RAP.ST1	48	3.64	3.09	0.558	0.644
RAP.RF1	46	4.55	4.52	0.291	0.368
RAP.PW1	44	3.65	3.63	0.112	0.126
RAP.VP1	48	5.01	5.08	0.153	0.181
RAP.MN2_C1C2	48	2.17	2.22	0.090	0.115
RAP.MN2_C3C4	48	2.17	2.22	0.089	0.113
RAP.TS1	48	2.76	2.87	0.109	0.132
RAP.CE1	48	4.47	4.65	0.210	0.257
REQ.GA1	48	2.61	2.89	0.587	0.854
RAP.GA1	48	3.13	2.93	0.273	0.320
Network	810	3.38	3.37	0.203	0.322

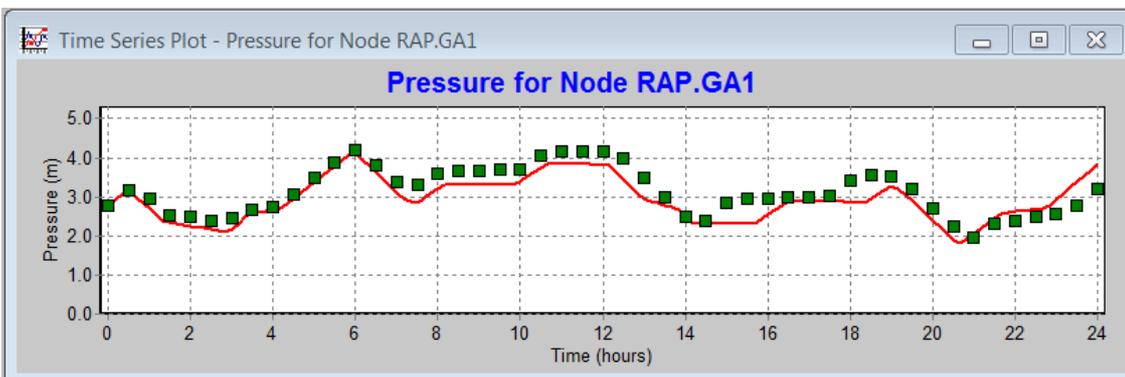
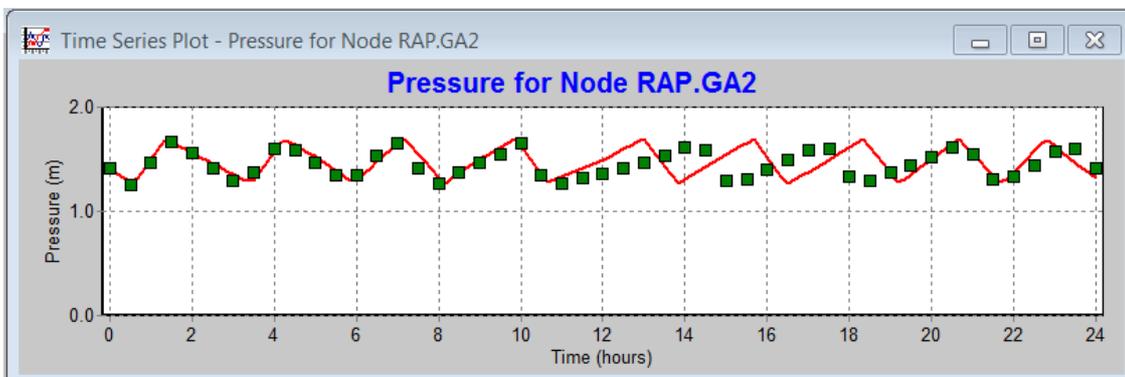
Correlation Between Means: 0.983

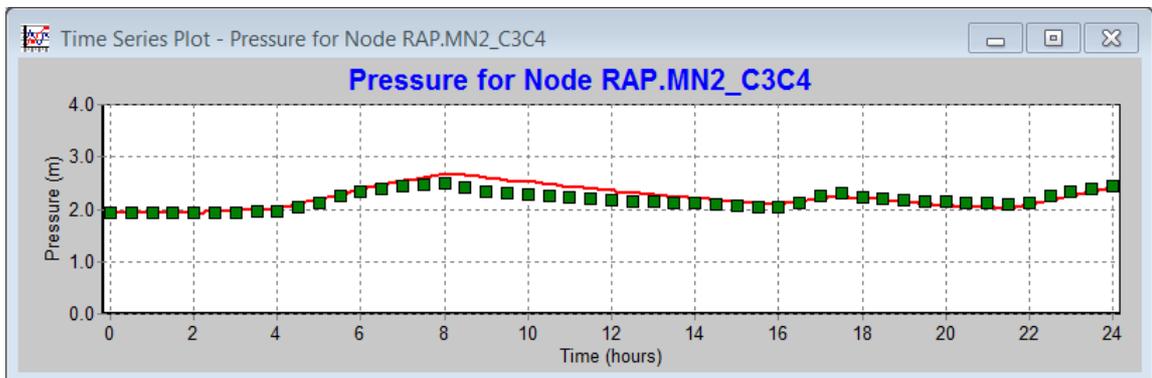
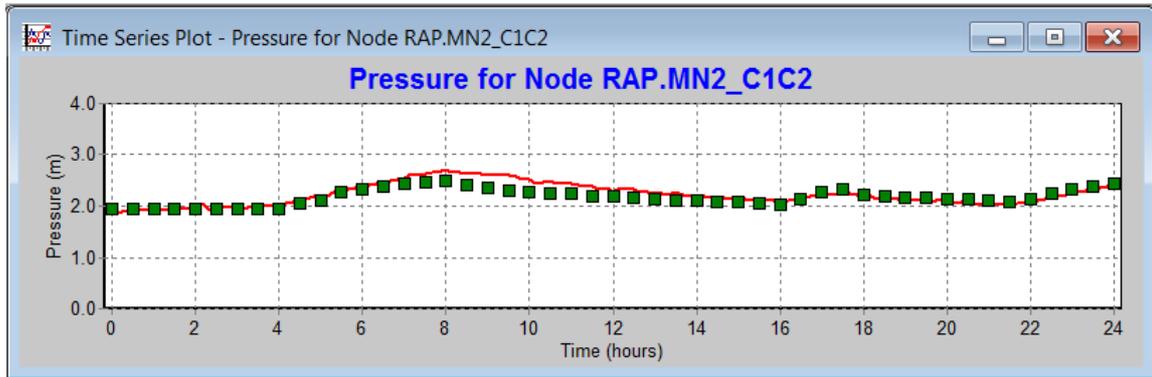
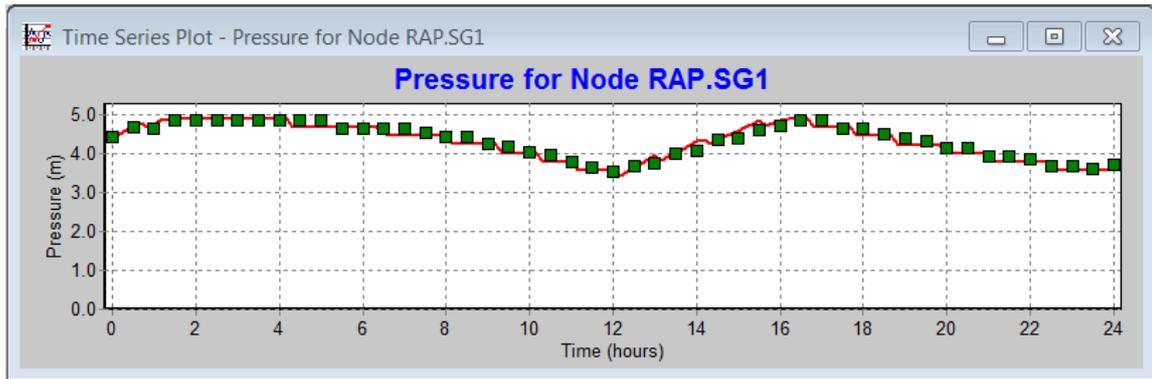
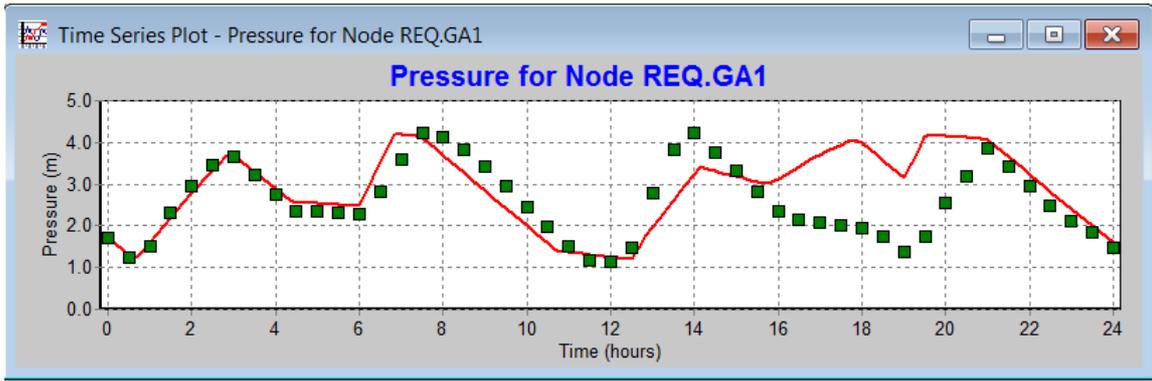
C.2 - GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE VALORES OBSERVADOS E SIMULADOS

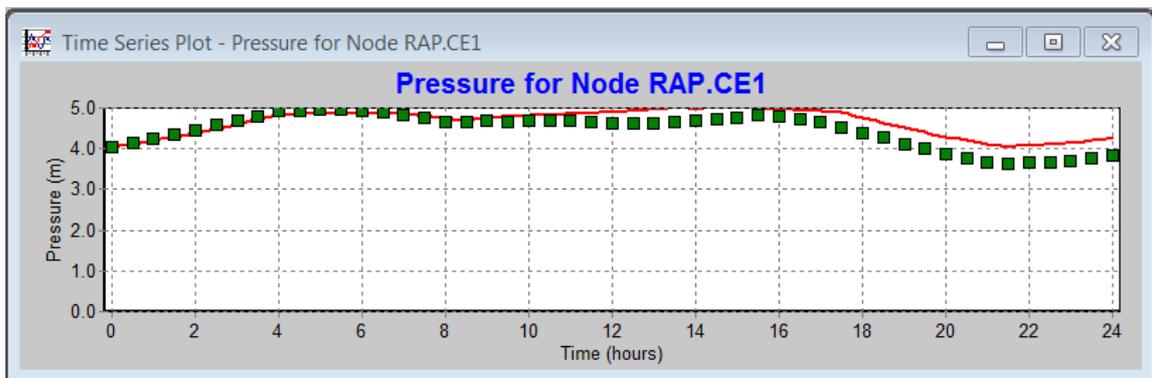
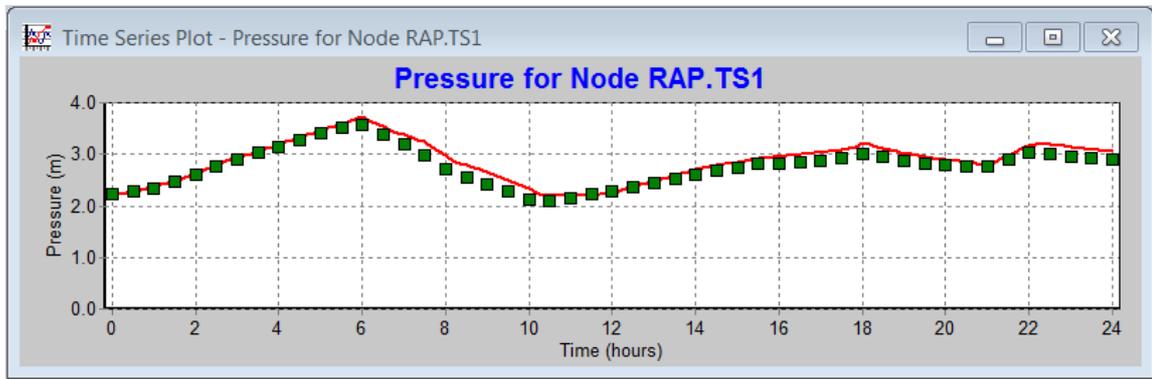
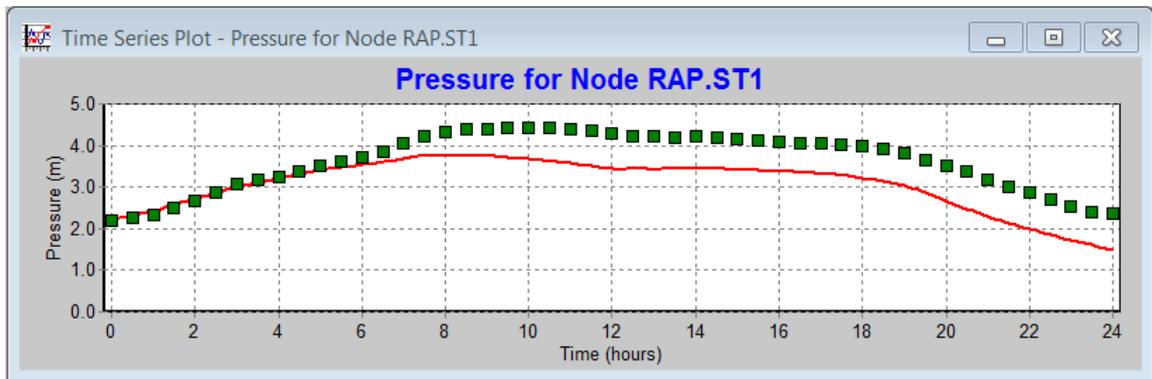
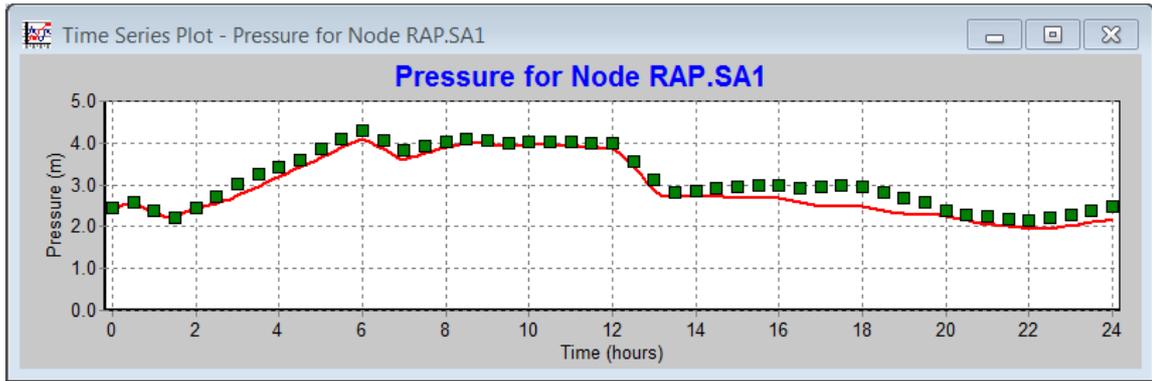


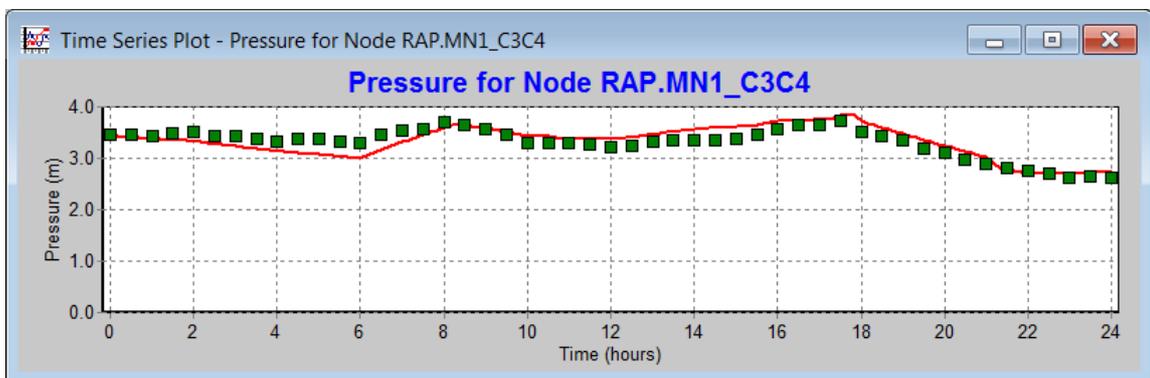
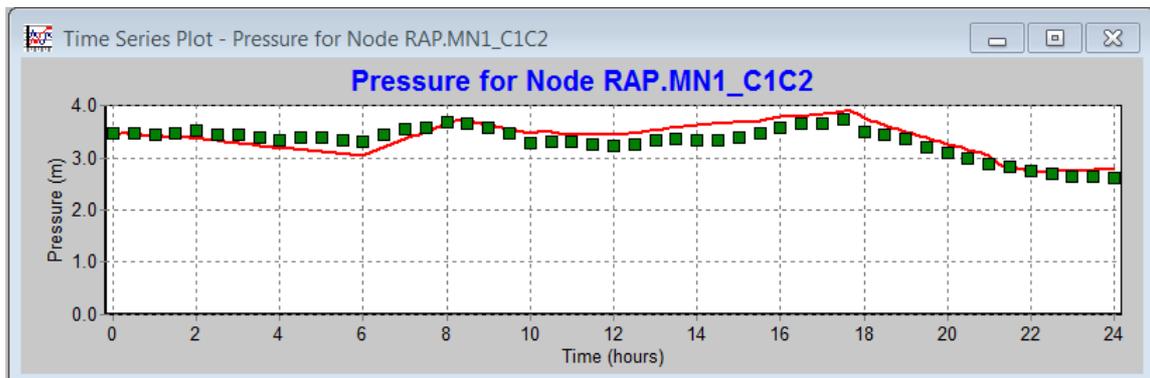
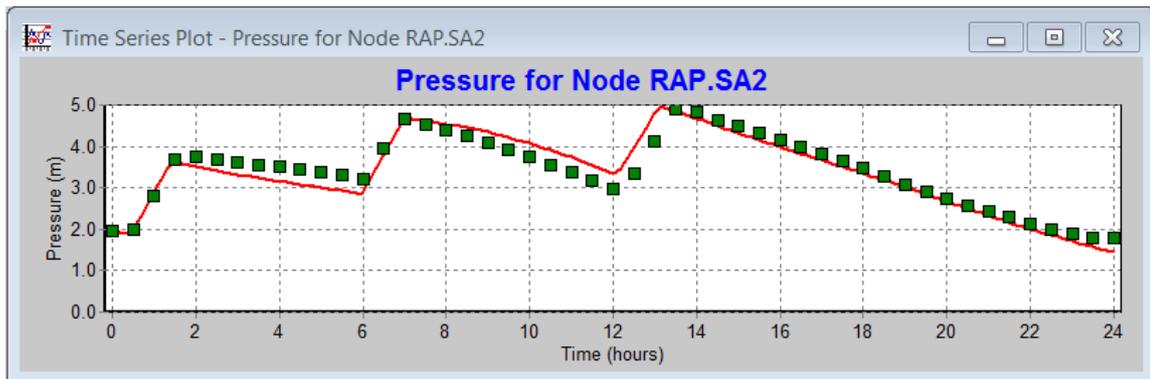
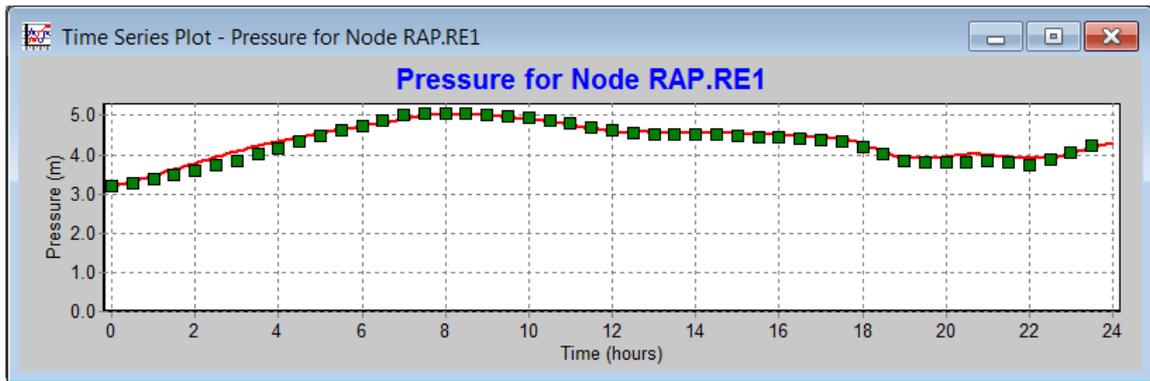
C.3 - GRÁFICOS DOS NÍVEIS DE RESERVATÓRIOS AO FINAL DO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO

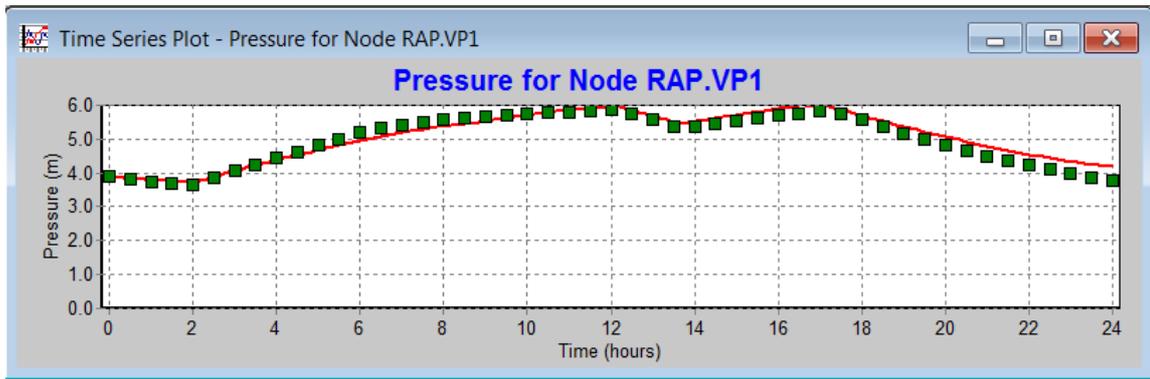
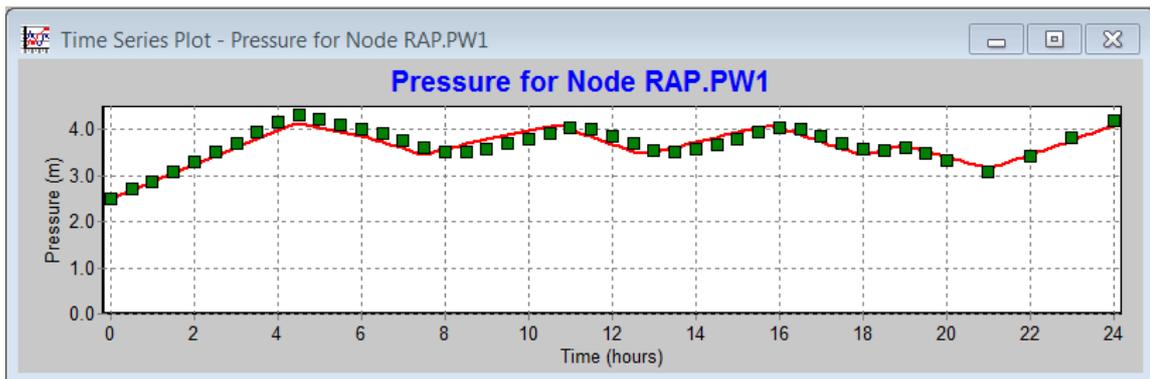
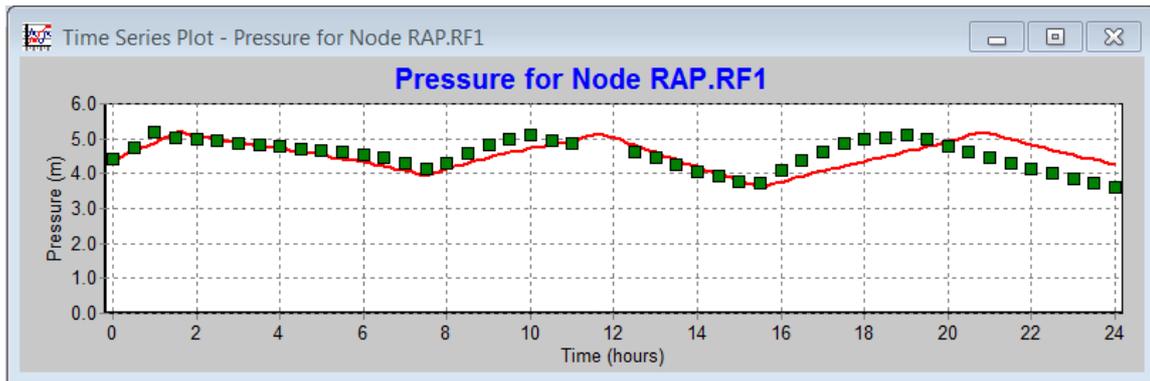
Obs: A linha vermelha representa os valores simulados e os pontos verdes os valores observados.











APÊNDICE D - DEMAIS RESULTADOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Tipo de Cruzamento

	P1	P2	P3	P4	G1 (unid)	G2 (unid)	G3 (unid)	G4 (unid)	P5	Custo Energia (R\$)	Aptidão	Tempo (h)
Uniforme	0	0	0	29.652	1	0	1	3	0	86.727	116.378	17,3
1 Ponto	0	0	0	14.710	0	0	1	3	0	78.283	92.992	15,8
2 Pontos	0	0	0	23.702	1	0	1	2	0	83.520	107.222	16,9
Par /Impar	0	0	0	29.652	1	0	1	3	0	86.727	116.378	17,3

Probabilidade de Cruzamento

	P1	P2	P3	P4	G1 (unid)	G2 (unid)	G3 (unid)	G4 (unid)	P5	Custo Energia (R\$)	Aptidão	Tempo (h)
1,0	0	0	0	29.652	1	0	1	3	0	86.727	116.378	16,7
0,8	0	0	0	47.312	2	0	4	3	0	85.849	133.162	18,1
0,7	0	0	0	14.710	0	0	1	3	0	78.283	92.992	15,8
0,6	0	0	0	15.813	0	0	1	4	0	87.125	102.938	17,6
0,5	0	0	0	29.435	1	0	0	4	0	81.403	110.838	15,5

Probabilidade de Mutação

	P1	P2	P3	P4	G1 (unid)	G2 (unid)	G3 (unid)	G4 (unid)	P5	Custo Energia (R\$)	Aptidão	Tempo (h)
0,010	0	0	0	34.689	1	0	3	6	0	86.202	120.891	14,8
0,007	0	0	0	30.872	1	0	1	3	0	84.465	115.337	13,7
0,004	0	0	0	14.710	0	0	1	3	0	78.283	92.992	15,8
0,001	0	0	0	29.603	1	0	2	3	0	87.528	117.131	9,3

Semente Aleatória

	P1	P2	P3	P4	G1 (unid)	G2 (unid)	G3 (unid)	G4 (unid)	P5	Custo Energia (R\$)	Aptidão	Tempo (h)
100	0	0	0	14.710	0	0	1	3	0	78.283	92.992	15,8
500	0	0	0	26.678	1	0	1	4	0	80.026	106.704	13,2
800	0	0	0	28.947	1	0	0	5	0	79.893	108.840	19,9
1000	0	0	0	13.059	0	0	0	3	0	82.654	95.713	16,1
2000				30.927	1	0	1	4	0	79.575	110.503	17,1