



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA E
AMBIENTAL
– MESTRADO –**

**MODELAGEM DE REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA COM
ÊNFASE NO CONTROLE DE PERDAS**

Por

Cleyton Oliveira da Silva

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba
para obtenção do grau de Mestre*

João Pessoa – Paraíba

Junho de 2014



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA E
AMBIENTAL
– MESTRADO –**

**MODELAGEM DE REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA COM
ÊNFASE NO CONTROLE DE PERDAS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, da Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre.

Cleyton Oliveira da Silva

Orientador: Prof. Dr. Heber Pimentel Gomes

João Pessoa – Paraíba

Junho de 2014

S586m Silva, Cleyton Oliveira da.

Modelagem de rede de distribuição de água com ênfase no controle de perdas / Cleyton Oliveira da Silva.- João Pessoa, 2014.

112f.

Orientador: Heber Pimentel Gomes

Dissertação (Mestrado) – UFPB/CT

1. Engenharia urbana e ambiental. 2. Abastecimento de água. 3. Rede de distribuição. 4. Controle de perdas.
5. Calibração.

UFPB/BC

CDU: 62:711(043)

**"MODELAGEM DE REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA COM ÊNFASE NO
CONTROLE DE PERDAS"**

CLEYTON OLIVEIRA DA SILVA

Dissertação aprovada em 09 de junho de 2014

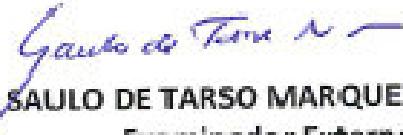
Período Letivo: 2014.1


Prof. Dr. HEBER PIMENTEL GOMES – UFPB

Orientador


Prof. Dr. TARCISO CABRAL DA SILVA – UFPB

Examinador Interno


Prof. Dr. SAULO DE TARSO MARQUES BEZERRA – UFPE

Examinador Externo

João Pessoa/PB
2014

Ao meu filho Cauã Haziel, que veio
neste momento tão especial da minha
vida.

Dedico!

AGRADECIMENTOS

Ao bom Deus que possibilitou concluir esse trabalho.

A minha família que deu o conforto emocional e espiritual.

Ao professor Dr. Heber Pimentel Gomes pela compreensão e apoio durante a pesquisa.

Ao amigo Dr. Moisés Menezes Salvino pela criação e concessão do LensCalibra, *software* adotado neste estudo, e pelo companheirismo durante a pesquisa.

Ao amigo e funcionário da UFPB José Dorivaldo pelo apoio logístico durante minhas idas e vindas a João Pessoa - PB.

À Companhia de Água e Esgoto do Estado do Ceará - CAGECE que forneceu as informações e o apoio na coleta dos dados de campo.

Aos colegas de turma do curso de mestrado e os amigos Eudes Bonfin e Leandro Santos pelo auxílio e incentivo.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

A todas as pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O presente estudo dissertativo tem por objetivo a modelagem e calibração de um sistema de distribuição de água real, com ênfase na identificação das perdas de água. O estudo de caso foi o sistema de abastecimento da comunidade de Juatama, em Quixadá, localizada na região central do Estado do Ceará. A rede de distribuição em estudo foi instalada recentemente e vem operando com estabilidade, o que possibilitou o desenvolvimento de um modelo que descreve satisfatoriamente o sistema real. O processo de calibração foi realizado por meio do aplicativo LenhsCalibra, que utiliza um algoritmo de otimização baseado na técnica de algoritmos genéticos. O programa possibilitou a calibração multivariada, incluindo como variáveis de busca a demanda e a rugosidade das tubulações, cujos valores foram ajustados através de simulações a partir dos níveis de vazão e pressões reais. O modelo calibrado do sistema apresentou resultados satisfatórios, além de identificar o registro de descargas utilizadas para limpeza da rede e pontos na rede com demandas superiores às que, efetivamente, são consumidas pelos clientes.

PALAVRAS-CHAVE: Abastecimento de água. Rede de distribuição. Perdas. Calibração.

ABSTRACT

The present study aims dissertative modeling and calibration of a real distribution system water, with emphasis on the identification of water losses. The case study was the supply system of Juatama community in Quixadá, located in the central region of the state of Ceará. The distribution network under study was recently installed and is operating with stability, which enabled the development of a model that successfully describes the real system. The calibration process was carried out through LenhsCalibra application, which uses an optimization algorithm based on the technique of genetic algorithms. The program allowed multivariate calibration, including how to search the demand variables and the roughness of pipes, whose values were adjusted using simulations from the actual flow levels and pressures. The calibrated model system showed satisfactory results, and identify the record of discharges used for cleaning of the network and network points higher than those with demands effectively, are consumed by customers.

KEY WORDS: Water. Distribution network. Losses. Calibration.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivo Geral e Específicos	2
1.2	Justificativa.....	3
2	PERDAS DE ÁGUA – O ESTADO DA ARTE	4
2.1	Introdução.....	4
2.2	Balanço Hídrico	6
2.3	Controle de Perdas Reais	9
2.4	Controle de Perdas Aparentes.....	14
3	MODELAGEM HIDRÁULICA	17
3.1	Epanet 2.0	20
3.2	Calibração de Redes Hidráulicas	22
3.3	Algoritmos Genéticos	25
4	MATERIAL E MÉTODOS	30
4.1	Área de Estudo	30
4.2	Modelagem da Rede de Distribuição de Água	35
4.2.1	Demandas Nodais	39
4.2.2	Padrão Temporal.....	40
4.3	Calibração da Rede de Distribuição de Água.....	42
4.3.1	Coleta dos Dados em Campo	48
4.3.2	Coletas de Pressão	49
4.3.3	Coletas de Vazão	50
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
5.1	Levantamento dos Índices de Perdas da UN-BBA e do Município de Quixadá....	51
5.2	Variáveis Monitoradas.....	56
5.2.1	Pressão	56
5.2.2	Vazão do Sistema	62
5.3	Comparação entre Dados Coletados e Dados Simulados.....	63
5.3.1	Pressão Estática	63
5.3.2	Pressão Dinâmica	64
5.3.3	Vazão do Sistema	68

5.4 Calibração do Modelo com o LenhsCalibra	70
5.4.1 Calibração da Vazão Total do Sistema.....	70
5.4.2 Análise das demandas e coeficiente C.....	72
5.4.3 Comparativo das Pressões Estáticas	74
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	77
7 REFERÊNCIAS	79
APÊNDICE A – DEMANDA NOS NÓS.....	88
APÊNDICE B – DADOS COLETADOS	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ciclo vicioso e virtuoso das perdas de faturamento.....	6
Figura 2.2 – Síntese das ações para o controle de vazamentos	10
Figura 2.3 – Fatores que influenciam o aumento das perdas reais	11
Figura 2.4 – Relação entre Índice de Perdas e Pressão Média Noturna	12
Figura 2.5 – Principais ações para controle de perdas reais	13
Figura 2.6 – Principais ações para controle de perdas aparentes.....	15
Figura 3.1 – Estrutura de funcionamento de um AG tradicional.....	26
Figura 4.1 – Distribuição das Unidades de Negócio do Interior	31
Figura 4.2 – Distrito de Juatama, Quixadá-Ceará	32
Figura 4.3 – Localização da área de estudo.....	33
Figura 4.4 – Reservatório de distribuição.....	34
Figura 4.5 – Estação de bombeamento	34
Figura 4.6 – Estação de tratamento de água, macromedidor e manômetro analógico ...	35
Figura 4.7 – Rede de distribuição de água de Juatama, Ceará	36
Figura 4.8 – Imagem do Google Earth com informações da rede hidráulica.....	38
Figura 4.9 – Paletas com os ícones do UFC2	38
Figura 4.10 – Padrão de consumo	42
Figura 4.11 – Fluxograma do algoritmo iterativo de calibração	45
Figura 4.12 – Fluxograma do Algoritmo Genético Multiobjetivo	47
Figura 4.13 – Rede de distribuição de água com os pontos monitorados	48
Figura 4.14 – Equipamentos de medição instalados na rede e em uma residência	49
Figura 4.15 – Levantamento da cota topográfica na saída do reservatório e em um cavalete residencial.....	50
Figura 4.16 – Equipamentos instalados na rede de distribuição de água	50

Figura 5.1 – Balanço Hídrico de Quixadá (CE)	52
Figura 5.2 – Balanço Hídrico da Unidade de Negócio da Bacia do Banabuiú	53
Figura 5.3 – Índice de Perdas na Distribuição – IPD (%) da UN-BBA	54
Figura 5.4 – Índice de Água Não Faturada – IANF (%) da UN-BBA	54
Figura 5.5 – Índice de Perdas na Distribuição – IPD (%) do município de Quixadá.....	55
Figura 5.6 – Índice de Água Não Faturada – IANF (%) do município de Quixadá.....	56
Figura 5.7 – Variação da pressão ao longo de 24 horas no Nô 1	57
Figura 5.8 – Variação da pressão ao longo de 24 horas no Nô Usina	58
Figura 5.9 – Isolinhas referentes às cotas topográficas	58
Figura 5.10 – Variação da pressão ao longo de 24 horas no Nô 16	59
Figura 5.11 – Comportamento da pressão ao longo de 24 horas no Nô 27	60
Figura 5.12 – Comportamento da pressão ao longo de 24 horas no Nô 31	60
Figura 5.13 – Comportamento da pressão ao longo de 24 horas no Nô 59.....	61
Figura 5.14 – Comportamento da pressão ao longo de 24 horas no Nô 66.....	61
Figura 5.15 – Comportamento da pressão ao longo de 24 horas nos pontos monitorados	62
Figura 5.16 – Distribuição da vazão de saída do reservatório para um período de 24 horas	63
Figura 5.17 – Comparativo das pressões simuladas e medidas antes da calibração	64
Figura 5.18 – Comportamento das pressões (medidas e simuladas) no Nô 1	65
Figura 5.19 – Comportamento das pressões (medidas e simuladas) no Nô 16	65
Figura 5.20 – Comportamento das pressões (medidas e simuladas) no Nô 27	66
Figura 5.21 – Comportamento das pressões (medidas e simuladas) no Nô 31	66
Figura 5.22 – Comportamento das pressões (medidas e simuladas) no Nô 59	67
Figura 5.23 – Comportamento das pressões (medidas e simuladas) no Nô 66	67
Figura 5.24 – Comportamento das pressões (medidas e simuladas) no Nô Usina.....	68

Figura 5.25 – Comparação das vazões observadas e simuladas.....	69
Figura 5.26 – Simulação da vazão total antes e depois da calibração (l/s).....	70
Figura 5.27 – Estimava de consumo após a calibração, utilizando o parâmetro vazão..	71
Figura 5.28 – Manobra de descarga na rede de distribuição de água.....	72
Figura 5.29 – Estimava dos consumos após a calibração, utilizando os parâmetros vazão e rugosidade das tubulações	73
Figura 5.30 – Rugosidade das tubulações após a calibração	74
Figura 5.31 – Detalhe das pressões antes e depois da calibração.....	75
Figura 5.32 – Comparação das pressões estáticas após a calibração.....	75
Figura 5.33 – Representação em planta da área critica identificada pelo modelo.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Índices de perdas de faturamento (%) dos prestadores de serviços de abrangência regional – Ano base 2010. Fonte: SNIS (2013)	5
Tabela 2.2 – Panorama brasileiro das perdas de água – Índice de Perdas na Distribuição	5
Tabela 2.3 – Balanço Hídrico proposta pela IWA/AWWA	7
Tabela 2.4 – Origem e magnitude das perdas reais	10
Tabela 3.1 – Tabela das características dos modelos de simulação hidráulica	20
Tabela 3.2 – Principais tipos de seleção dos algoritmos genéticos	27
Tabela 3.3 – Exemplos de operadores de mutação dos algoritmos genéticos	28
Tabela 4.1 – Dados da rede de distribuição de água de Juatama, Ceará	37
Tabela 4.2 – Dados adotados no primeiro padrão de consumo	39
Tabela 4.3 – Histórico do consumo comercial e residencial – Ano 2012	40
Tabela 4.4 – Coeficientes e vazões obtidas na saída do reservatório	41
Tabela 4.5 – Parâmetros dos algoritmos genéticos utilizados para a calibração da rede	47
Tabela 5.1 – Pressões medidas e simuladas	64
Tabela 5.2 – Comparativo das vazões medidas em campo e simuladas	69
Tabela 5.3 – Pressões observadas e calibradas.....	75

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, as companhias de saneamento do Brasil experimentaram significativos avanços nos procedimentos operacionais voltados para a redução das perdas reais (físicas) e aparentes (não físicas) de água. Em grande parte das empresas, as ações de melhoria se iniciaram em virtude do Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água, do Ministério das Cidades, que, por meio de assistências técnicas, promove reformas institucionais com vistas à elevação dos níveis de qualidade e eficiência nos sistemas de abastecimento de água.

Entre os programas implementados nas empresas do setor de saneamento, cita-se o Programa de Controle e Redução de Perdas na Região Metropolitana de São Paulo, que avançou significativamente no aumento da eficiência de seus sistemas, através de ações âncoras, a saber: controle da pressão em redes de distribuição de água por meio de válvulas redutoras de pressão, pesquisas de vazamentos não visíveis em áreas críticas, diminuição do tempo de reparo de vazamentos, melhora do sistema de macromedição, troca otimizada de hidrômetros e combate a fraudes em ligações ativas e inativas. Recentemente, o prestador de serviço regional de São Paulo, ou seja, a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) registrou um índice de perdas de 27,8%, que corresponde a uma redução de 6,8% em 6 anos, de acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2013).

Contudo, na grande maioria das companhias, as melhorias apresentam-se de maneira pontual. Segundo o SNIS (2013), as perdas de água na distribuição chegam a 38,8% no Brasil, ultrapassando 50% nas regiões Norte e Nordeste. Apesar do aumento dos investimentos no setor de saneamento voltado para a melhoria do serviço prestado, diversos sistemas de abastecimento de água não possuem controle efetivo das perdas, devido, principalmente, à falta de dados cadastrais confiáveis (SANTOS, 2010). Fato que evidencia a necessidade de modernização do setor.

Neste contexto, mostra-se fundamental para as companhias de água do país o desenvolvimento de ferramentas direcionadas para a gestão eficiente dos sistemas existentes. O uso de modelos calibrados em simuladores hidráulicos apresenta-se como alternativa insubstituível nos sistemas de apoio à gestão em curto prazo, além de possibilitarem o planejamento de longo prazo direcionado para o controle de perdas e para a programação da reabilitação de redes de distribuição de água.

Os simuladores hidráulicos são adotados para o estudo da dinâmica operacional, e, apesar da resistência de alguns técnicos das empresas de saneamento do Brasil, o seu uso está se tornando comum entre os consultores, os acadêmicos e outras categorias envolvidas na análise de projetos, operação e/ou manutenção de sistemas de distribuição de água.

Para que os modelos de simulação de redes hidráulicas possam ser eficazmente utilizados de forma intensiva, torna-se imprescindível calibrá-los. Geralmente, o processo de calibração de um modelo é considerado um problema de otimização, onde é necessário o estabelecimento de uma função objetivo e restrições específicas, como, por exemplo, as leis de conservação de massa e energia.

O processo de calibração de um modelo de um sistema de distribuição de água consiste em ajustar um conjunto de parâmetros físicos e operacionais, com a finalidade de alcançar uma acurácia razoável entre os valores medidos e simulados de pressão e vazão, objetivando-se diminuir a incerteza nos parâmetros do modelo para um nível tal que a sua precisão seja compatível com as decisões que serão adotadas com base nos resultados das simulações.

As pesquisas sobre a aplicação dos modelos hidráulicos no controle de perdas de água em casos reais reportadas são, relativamente, raras. É nessa temática que a pesquisa utilizará a modelagem e a calibração hidráulica das redes, com o objetivo de simular a operação de um sistema real, visando a identificação de vazamentos e a extração de informações que possam ser úteis nos procedimentos de controle de perdas.

1.1 Objetivo Geral e Específicos

O presente estudo tem como objetivo geral realizar a modelagem e calibração de uma rede de distribuição de água visando a compreensão da dinâmica do sistema hidráulico, a identificação de anomalias e a melhoria do processo de decisão voltado para a operação e controle de perdas.

Paralelamente, a pesquisa se propõe alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Modelagem da rede de distribuição de água de Juatama (Ceará).
- Utilização do *software* LenhsCalibra. Identificação de anomalias do sistema real, tais como vazamentos, ligações irregulares e válvulas parcialmente fechadas.

1.2 Justificativa

O crescimento populacional, aliado ao adensamento nos centros urbanos, tem contribuído para a elevação do consumo de água, o que tem levado os sistemas de abastecimento de água a trabalhar em situações extremas. Para atender à demanda, os novos mananciais se encontram cada vez mais distantes, aumentando os custos de exploração e a complexidade das rotinas operacionais. Este fato, acrescido da ineficiência operacional das companhias, que, em muitos casos, operam com rotinas e equipamentos obsoletos, se apresenta como uma busca à comunidade científica e aos profissionais do setor. O principal desafio consiste em atender à crescente demanda e distribuir água de qualidade com o menor desperdício e custo possível. Neste contexto, o surgimento de projetos de eficientização para sistemas reais é crescente. Estes estudos devem ser realizados, impreterivelmente, com modelos calibrados. Esta pesquisa propõe a aplicação do LenhsCalibra a um sistema real, de modo que os resultados apresentem a metodologia do *software* como uma alternativa eficaz aos profissionais do setor.

A calibração é apresentada como uma técnica de busca estocástica, que torna o sistema simulado mais próximo do sistema real, possibilitando aos gestores e técnicos o estudo extensivo de alternativas voltadas para o aumento da eficiência.

2 PERDAS DE ÁGUA – O ESTADO DA ARTE

2.1 Introdução

As perdas de água em sistemas de abastecimento de água são influenciadas por diversos fatores infraestruturais e operacionais. Estas dependem basicamente das características da rede hidráulica e de fatores relacionados às práticas de operação, do nível de tecnologia do sistema e da expertise dos técnicos responsáveis pelo controle dos processos (BEZERRA e CHEUNG, 2013).

Segundo Gonçalves (1998), em um sistema de abastecimento de água as perdas ocorrem na produção (da captação à estação de tratamento) e na distribuição (após o tratamento). Na produção, as perdas relacionam-se a rompimentos das adutoras de água bruta, em equipamentos e conexões de estações elevatórias. Na distribuição, ocorrem perdas em adutoras de recalque de água tratada, estações elevatórias, reservatórios, redes de distribuição, ramais prediais e unidades consumidoras.

Moraes, Gomes e Jerozolimski (2007) relatam que a maioria dos projetos de distribuição de água não prevê instrumentos de controle operacional, como a macromedição, a telemetria, a automação, o controle de pressão, o cadastro, uma adequada integração com o sistema antigo e equipamentos operacionais básicos. E que naqueles que preveem esses componentes, falta pessoal qualificado para operar e manter as ferramentas disponibilizadas. Estes fatores refletem em altos índices de perdas nos sistemas brasileiros, cujas companhias de água apresentam uma gestão operacional ineficiente, classificadas, geralmente, entre o nível intermediário e insatisfatório.

Historicamente, a quantificação das perdas pelos técnicos do setor de saneamento é realizada com base no indicador percentual que relaciona o volume disponibilizado à distribuição (macromedido) com o volume micromedido. Isto porque o seu cálculo e entendimento é intuitivo e imediato para todos, não só para os técnicos das prestadoras de serviço, como para a sociedade. A Tabela 2.1 apresenta o índice de perdas de faturamento de água, que corresponde ao volume não contabilizado, que engloba o consumo autorizado não faturado, as perdas reais (físicas), representando a parcela não consumida, e as perdas aparentes (não físicas), que são a parcela da água distribuída que é consumida e não faturada.

Tabela 2.1 – Índices de perdas de faturamento (%) dos prestadores de serviços de abrangência regional – Ano base 2010. Fonte: SNIS (2013).

Região	Tipo de Prestador de Serviços					Total
	Regional (%)	Micror-regional (%)	Local Direito Público (%)	Local Direito Privado (%)	Empresa Local Privada (%)	
Norte	51,0	-	44,5	-	59,3	51,5
Nordeste	44,8	-	41,8	19,3	-	44,3
Sudeste	34,2	33,2	36,9	24,4	25,3	34,3
Sul	20,9	18,3	31,0	36,7	25,4	24,1
Centro-Oeste	30,5	56,6	39,0	58,5	9,0	32,4
Brasil	35,7	32,9	37,0	32,8	35,9	35,9

Segundo Gomes (2007), o Índice de Perdas na Distribuição (IPD) é amplamente utilizado no Brasil. Para efeito de mensuração do nível de gerenciamento, o autor propõe a seguinte classificação:

- **IPD > 40%** - Sistema com mau gerenciamento.
- **40% ≥ IPD ≤ 25%** - Sistema com gerenciamento de nível intermediário;
- **IPD < 25%** - Sistema com bom gerenciamento.

Como visualizado na Tabela 2.2, o gerenciamento das perdas no Brasil encontra-se no nível intermediário (**40% ≥ IPD ≤ 25%**).

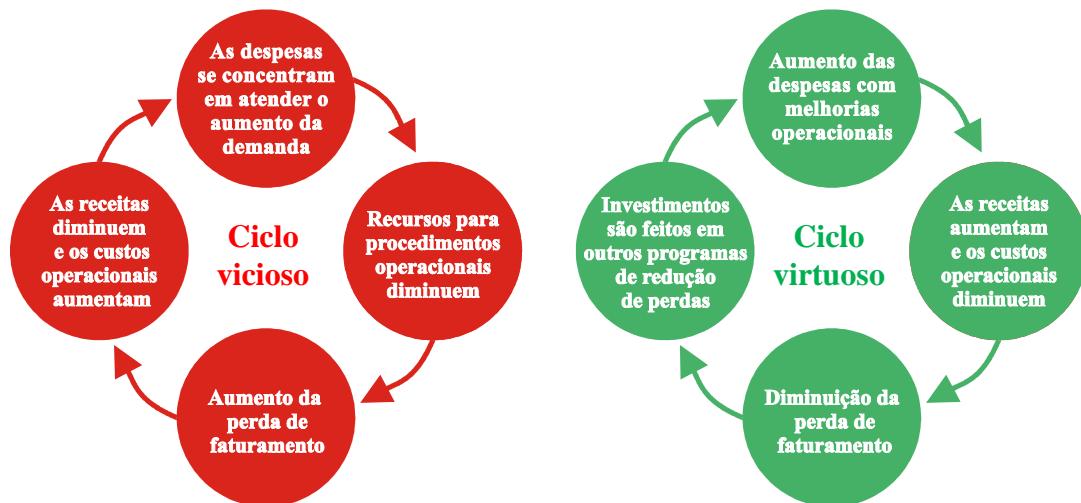
Tabela 2.2– Panorama brasileiro das perdas de água – Índice de Perdas na Distribuição

Região	Tipo de Prestador de Serviços					Total
	Regional (%)	Micror-regional (%)	Local Direito Público (%)	Local Direito Privado (%)	Empresa Local Privada (%)	
Norte	52,7	-	43,0	-	49,9	49,7
Nordeste	53,1	-	37,9	13,1	-	51,4
Sudeste	33,1	52,8	37,7	28,6	32,9	34,3
Sul	36,6	25,0	31,1	51,4	42,6	35,6
Centro-Oeste	30,0	19,3	38,2	59,0	28,9	33,6
Brasil	39,4	49,1	37,0	37,2	38,7	38,8

As perdas reais (perdas físicas) e as perdas aparentes (perdas comerciais ou administrativos) têm impactos sinérgicos e negativos sobre o desempenho global do utilitário. Enquanto as perdas reais provocam aumento dos custos operacionais e investimentos maiores, as perdas aparentes reduzem as receitas de serviços públicos. Ranhill e USAID (2008) ilustram a sinergia dos dois tipos de perdas por meio de um ciclo vicioso e outro virtuoso das perdas de faturamento (Figura 2.1). O vicioso mostra que o aumento do nível de perdas de faturamento leva a um maior custo de produção e, simultaneamente, menos receitas. Resultando no aumento do orçamento para atender o aumento crescente da demanda e do nível de manutenção do sistema. O desafio da concessionária de água é transformar o círculo vicioso em virtuoso. Uma vez virtuoso, a redução de custos e o adiamento dos investimentos proporciona o aumento das receitas.

Figura 2.1 – Ciclo vicioso e virtuoso das perdas de faturamento

Fonte: Adaptado de Farley *et al.* (2008)



2.2 Balanço Hídrico

A auditoria de água nos sistemas de distribuição de água é a ferramenta mais eficaz para a gestão da água companhias. Com o auxílio da auditoria é possível identificar e quantificar quais medidas devem ser implementadas para reduzir o uso e as perdas de água, possibilitando a redução dos custos e a conservação dos recursos hídricos (GANORKAR *et al.*, 2013). O Balanço Hídrico é um padrão internacional para a auditoria de água nas concessionárias. Este quantifica os volumes consumidos e as perdas de água, além de fornecer os dados para o cálculo de diversos indicadores de

desempenho nos sistemas de distribuição de água. Foi divulgado primeiramente por Lambert e Hirner (2000) e Alegre *et al.* (2000) nas publicações da International Water Association (IWA). A Tabela 2.3 apresenta, de maneira esquemática, o Balanço Hídrico adotado pelo IWA Water Loss Task Force (IWA WLTF) e pelo American Water Works Association Water Loss Control Committee (AWWA WLC). O Balanço Hídrico possibilita conhecer o destino da água que vem sendo fornecida ao sistema, contabilizando todos os tipos de utilização. O nível de água perdida é um indicador indispensável para se verificar a eficiência do sistema de distribuição de água.

Tabela 2.3 – Balanço Hídrico proposta pela IWA/AWWA

Volume fornecido ao sistema	Consumo autorizado	Consumo autorizado faturado	Consumo faturado medido (incluir água exportada)	Água faturada	
			Consumo faturado não medido (estimados)		
	Consumo autorizado não faturado	Consumo não faturado medido (usos próprios, caminhão pipa etc.)	Consumo não faturado não medido (combate a incêndios, favelas etc.)		
Perda de água	Perdas aparentes	Uso não autorizado (fraudes e falhas de cadastro)	Água não faturada	Água não faturada	
	Perdas reais	Erros de medição (micromedição)			
		Vazamentos nas adutoras e/ou redes de distribuição			
		Vazamentos e extravasamentos em reservatórios			
		Vazamentos em ramais prediais (a montante do ponto de medição)			

Os componentes do Balanço Hídrico são assim definidos:

- **Volume fornecido ao sistema:** volume de água produzido (volume de entrada) no sistema de abastecimento.
- **Consumo autorizado:** volume anual, medido e não medido, fornecido a consumidores cadastrados para usos doméstico, comercial e industrial, desde que autorizados.
- **Perdas de água:** volume referente à diferença entre o volume fornecido ao sistema e o consumo autorizado.

- **Consumo autorizado faturado:** volume gerador de receita para a companhia de água, correspondente à soma dos volumes informados nas contas emitidas para os consumidores. É constituído pelos volumes medidos nos hidrômetros e pelos volumes estimados nos locais onde não há hidrômetro instalado.
- **Consumo autorizado não faturado:** volume que não gera receita para a companhia de água, oriundo de usos legítimos de água no sistema de distribuição. Compreende volumes medidos e volumes não medidos, a estimar, tais como água utilizada em combate a incêndios, na rega de espaços públicos e em atividades operacionais na própria prestadora de serviços de saneamento, como, por exemplo, lavagem de reservatórios.
- **Perdas reais:** parcela de água correspondente ao volume efetivamente perdido nas estações de tratamento de água, nos reservatórios (vazamentos e extravasamentos) e ao longo das redes de distribuição de água.
- **Perdas aparentes:** parcela correspondente ao volume de água consumido, contudo não contabilizado pela companhia, envolvendo erros de medição nos hidrômetros, fraudes, ligações clandestinas, falhas no cadastro comercial etc.
- **Volume faturado:** representa a parcela da água comercializada, traduzida no faturamento do fornecimento de água ao consumidor.
- **Volume não faturado:** representa a diferença entre o total anual da água que entra no sistema e o consumo total autorizado e faturado. Esses volumes incorporam as perdas reais e as aparentes, bem como o consumo autorizado não faturado.

O uso sistemático do modelo Balanço Hídrico possibilita estimar o volume de água perdido na distribuição, constituindo uma das melhores ferramentas para o gerenciamento de perdas. O estado da arte aponta que a grande maioria das pesquisas atuais voltadas para o levantamento de perdas adotam esta metodologia para a avaliação dos sistemas de distribuição de água (KANAKOUDIS e TSITSIFLI, 2013; WEGELIN e JACOBS, 2013; HAIDER, SADIQ e TESFAMARIAM, 2013; MASIA e ERASMUS, 2013).

Para a elaboração do Balanço Hídrico, é fundamental um estudo mais detalhado dos dados de entrada, pois, cada sistema de gerenciamento contém informações diferentes, advindas dos mais variados setores. A criteriosa adoção da prática garante indicadores mais próximos da realidade, que refletem em uma melhor compreensão do

problema e em decisões mais eficazes quanto à priorização no combate às perdas, viabilizando ações focadas nas necessidades prioritárias da empresa.

A IWA sugere que o Balanço Hídrico seja avalizado com dados anuais, porém esta escala de tempo não é o ideal para redes hidráulicas que experimentam picos de demanda sazonais. Kanakoudis e Tsitsifli (2013) aplicaram o Balanço Hídrico na capital da ilha de Kos na Grécia em uma base bimestral, justamente por se tratar de uma região com forte variação sazonal.

Apesar da consolidação do Balanço Hídrico, é importante citar que outras metodologias estão surgindo para avaliação das perdas. Al-Omari (2013) propôs um método para separar as perdas reais das perdas comerciais com um nível aceitável de precisão. Esta metodologia baseia-se no fato de que as perdas comerciais são entregues ao consumidor final, atingem o sistema de esgotamento sanitário e as perdas reais são perdidas no sistema e, consequentemente, não atingem o sistema de águas residuais. A metodologia foi aplicada em duas cidades da Jordânia.

2.3 Controle de Perdas Reais

As perdas reais estão relacionadas com vazamentos e extravasamentos no sistema, compreendendo desde a captação até a distribuição (ver Tabela 2.4). A redução das perdas reais resulta em diminuição dos custos com a produção de água, através da redução do consumo de energia, de produtos químicos, de serviços de terceiros e outros insumos, além de possibilitar o aumento da oferta sem a necessidade de expansão do sistema de abastecimento. É importante observar que não existem redes totalmente estanques, ou seja, em maiores ou menores proporções, todas vazam. Entretanto, índices de perdas reais da ordem de 40% do total disponibilizado para o abastecimento, com certeza, são inaceitáveis. Ressalta-se que o alto índice de perdas não é “privilegio” só do Brasil, há diversos países com sistemas que possuem índices superiores a média brasileira (BEZERRA e CHEUNG, 2013). Segundo Tardelli Filho (2005), as principais ações para o controle de vazamentos podem ser resumidas conforme a Figura 2.2.

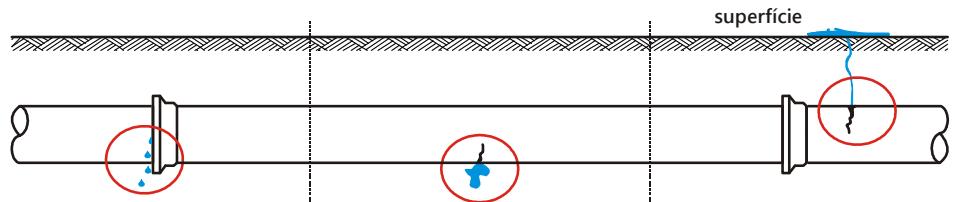
Tabela 2.4 – Origem e magnitude das perdas reais

Fonte: modificado de MARTINS (2009)

Subsistema	Causa	Magnitude
Captação	Vazamento na adução	Variável, dependendo do estado das instalações
Estação de tratamento	Vazamento na estrutura Lavagem dos filtros Descarga de lodo	Significativa, dependendo do estado de conservação das instalações e da eficiência operacional
Reservatório	Vazamentos Extravasamentos Limpeza	Variável, dependendo do estado das instalações e da eficiência operacional
Adução	Vazamento na tubulação Descargas	Variável, dependendo do estado das instalações e da eficiência operacional
Distribuição	Vazamentos na rede de distribuição Vazamentos nos ramais e descargas	Significativa, dependendo do estado da tubulação e, principalmente, das pressões

Figura 2.2 – Síntese das ações para o controle de vazamentos

Fonte: Modificado de Tardelli Filho (2005) *apud* BEZERRA e CHEUNG (2013)



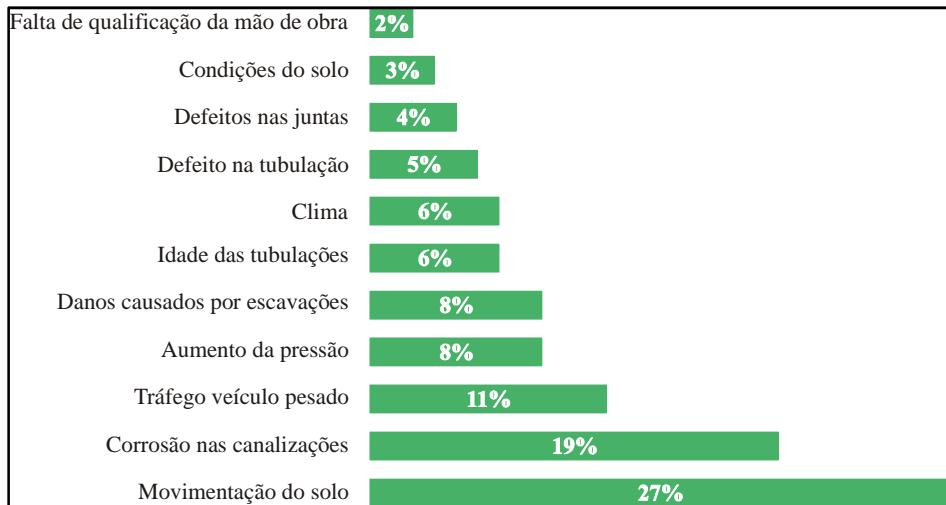
Vazamentos Inerentes	Vazamentos Não Visíveis	Vazamentos Visíveis
Não visíveis e não detectáveis por equipamentos de detecção acústica.	Não afluentes à superfície, detectáveis por métodos acústicos de pesquisa.	Afluentes à superfície, comunicados pela população.
Principais Ações		
<ul style="list-style-type: none"> - Redução de pressão. - Melhora a qualidade dos materiais e da execução da obra. - Redução do número de juntas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Redução de pressão. - Qualidade dos materiais e da execução da obra. - Pesquisa de vazamentos não visíveis. 	<ul style="list-style-type: none"> - Redução de pressão. - Qualidade dos materiais e da execução da obra. - Diminuição do tempo de reparo.

Segundo Farley (2001), é importante verificar os fatores externos e internos relacionados ao aumento das perdas reais de água no sistema de distribuição. Diversos fatores potencializam as perdas, como, por exemplo, a péssima qualidade dos materiais, dos componentes e da mão de obra; características e movimentação dos solos; o tráfego

pesado; a idade da rede etc. (ver Figura 2.3). Os índices apresentados nesta figura estão relacionados aos vazamentos visíveis (rompimentos), que, geralmente, são reparados rapidamente.

Figura 2.3 – Fatores que influenciam o aumento das perdas reais

Fonte: modificado de Martins (2009)

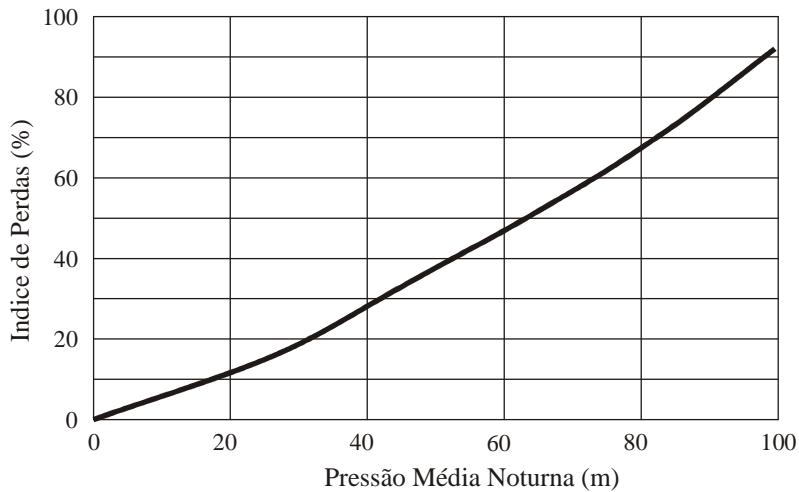


Dentre os fatores apresentados, a falta de controle de pressão nas redes hidráulicas se destaca, pois resulta em um aumento significativo no volume de vazamentos invisíveis e inerentes. A gestão de pressão é uma das mais importantes intervenções para a redução de perdas reais (físicas) em sistemas urbanos de distribuição de água (CHARALAMBOUS e ISAIA, 2013; KANAKOUDIS e MUHAMMETOGLU, 2013; STOKES, HORVATH e STURM, 2013). A influência da pressão nas perdas reais é conhecida há muito tempo pelos pesquisadores e técnicos das companhias de saneamento. No início dos anos 90 foi publicado no Reino Unido vários relatórios como resultado da *National Leakage Initiative*¹, destacando o *Report G – Managing Water Pressure*, que se tornou uma referência tradicional da relação entre pressão e volume de vazamento. De modo geral, a diminuição da pressão em grandes sistemas implica na redução do volume perdido por vazamentos (Figura 2.4). Do ponto de vista econômico, faz-se necessária uma política operacional de controle de pressões excessivas em níveis aceitáveis (YAZBEK FILHO, 2003).

¹ Em 1989, a indústria da água do Reino Unido foi privatizada e regulamentada por um organismo governamental chamada OFWAT. Após a regulamentação do setor, maior ênfase foi dada a redução da perda de água, gerando pressão por medidas para o aumento da eficiência. Como resultado desta conjuntura, surgiu a *National Leakage Initiative*, que após extensas experiências em todo o Reino Unido, culminou em uma série de documentos técnicos (CHARALAMBOUS e SETFORD 2001).

Figura 2.4 – Relação entre Índice de Perdas e Pressão Média Noturna

Fonte: Yazbek Filho (2003)



Destaca-se que a gestão de pressão, que incorpora a redução e a minimização de flutuações da pressão, apresenta resultados mais eficientes do que simplesmente diminuir a pressão da rede. A probabilidade de ocorrência de rompimentos aumenta mais com a amplitude de oscilação de pressão do que com o seu valor médio e máximo. Portanto, a diminuição da oscilação de pressão reduz a frequência de rupturas nos tubos, e, consequentemente, a diminuição do volume perdido nos três tipos de vazamentos (inerentes, não visíveis e visíveis). Os benefícios financeiros derivados da diminuição da frequência de rupturas são muito maiores do que geralmente os técnicos esperam e muitos casos de sucesso já foram relatados. Stokes, Horvath e Sturm (2013) avaliaram a gestão da pressão nas cidades de Philadelphia (EUA) e Halifax (Canadá) e Kanakoudis e Muhammetoglu (2013) analisaram o controle de pressão nas cidades de Kos Town (Grécia) e Antalya City (Turquia).

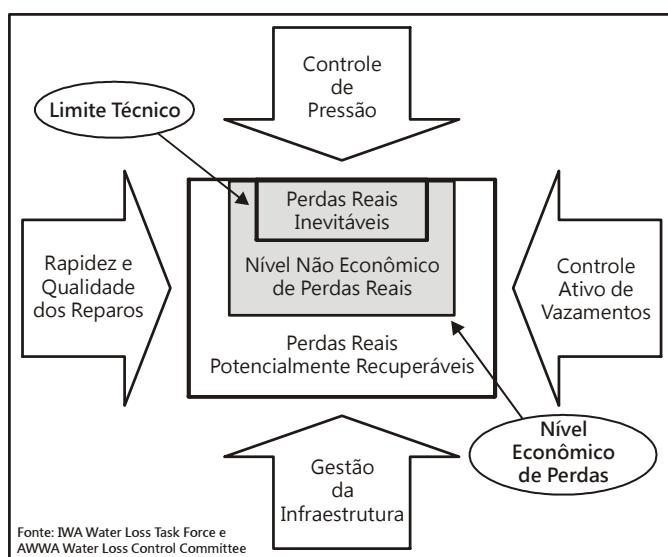
Motta (2010) propõe outras ações preliminares ao combate às perdas reais:

- Manter o cadastro técnico atualizado, digitalizado e georreferenciado.
- Após a implantação do cadastro, realizar uma divisão dos setores de abastecimento e de suas zonas de pressão.
- Macromedição – após a definição e isolamento dos setores, contabilizar os volumes que entram nesses setores, por meio de macromedidores.
- Cadastro comercial – fazer uma comparação entre o cadastro comercial e o cadastro técnico, com o intuito de definir rotas de leitura dos hidrômetros,

compatíveis com os períodos de macromedição, para diminuir os efeitos da defasagem e da sazonalidade.

Diversos estudos foram realizados nas últimas décadas sobre a natureza e o impacto dos vazamentos, várias metodologias e tecnologias eficazes foram desenvolvidas e implementadas com sucesso em todo o mundo para reduzir, controlar e gerenciar as perdas reais. Destacou-se, nos últimos anos, a metodologia proposta pelo Grupo de Trabalho sobre Perdas de Água da IWA, que, em resumo, considera que o volume de perdas reais pode ser significativamente reduzido através da implementação das quatro ações apresentadas na Figura 2.5 (BEZERRA e CHEUNG, 2013).

Figura 2.5 – Principais ações para controle de perdas reais



Diversos trabalhos têm apresentado estudos voltados para o controle de perdas reais de casos reais baseados nos estudos da IWA (QUEVEDO *et al.*, 2013; DINIZ e DALFRÉ FILHO, 2013). Quevedo *et al.* (2013) apresentaram uma metodologia para detectar perdas reais de água em redes urbanas de distribuição de água. O método proposto baseia-se no emprego combinado das técnicas vazão mínima noturna e Balanço Hídrico da IWA. A vazão mínima noturna permitiu distinguir as perdas reais e aparentes em um determinado distrito de medição e controle. A metodologia foi aplicada em um distrito de medição e controle (DMC) da rede de distribuição de água de Barcelona.

Diniz e Dalfré Filho (2013) descreveram um método para diagnóstico e redução do nível de perdas reais. Os autores estudaram o sistema distribuidor do Setor Casa

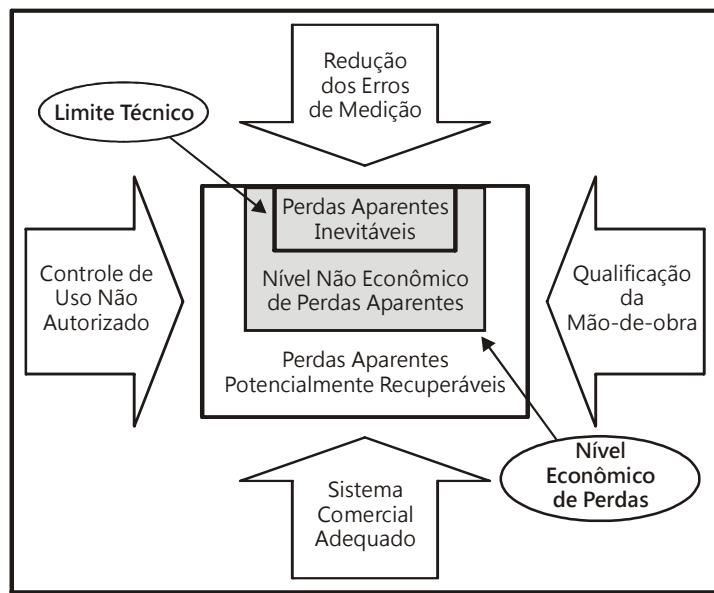
Verde, que é o mais importante no sistema Cantareira de São Paulo (responsável por 60% do fornecimento de água da Região Metropolitana de São Paulo). O diagnóstico foi realizado no *software* WaterAudit4 da American Water Works Association (AWWA).

2.4 Controle de Perdas Aparentes

As perdas aparentes estão relacionadas com ligações clandestinas ou não cadastradas, hidrômetros parados, submedições, fraudes em hidrômetros e *bypass* nos cavaletes. As perdas aparentes resultam diretamente em perdas de faturamento (relação entre o volume disponibilizado e o volume faturado). A redução das perdas aparentes possibilita o aumento da receita tarifária, melhorando a eficiência e o desempenho financeiro do prestador de serviços. Contribui indiretamente para a ampliação da oferta efetiva, já que induz à redução do consumo e a diminuição dos desperdícios por força da aplicação da tarifa aos volumes efetivamente consumidos.

Assim, como para as perdas reais, o Grupo de Trabalho sobre Perdas de Água da IWA indica um conjunto de ações para minimizar o volume de perdas aparentes para um nível econômico (BEZERRA e CHEUNG, 2013). A Figura 2.6 sistematiza as principais ações de combate às perdas aparentes. Dependendo das condições do sistema avaliado, o programa de combate às perdas pode adotar uma ou mais ações.

Figura 2.6 – Principais ações para controle de perdas aparentes



A **redução dos erros de medição** requer o correto dimensionamento dos macromedidores instalados nos sistemas adutores e distribuidor, assim como a adoção de uma política de manutenção preventiva e corretiva dos hidrômetros residenciais e comerciais, pois, sem um sistema de medição confiável, a companhia não terá condições de obter com exatidão o volume de água consumido e o que realmente é perdido. De acordo com Gularte (2005), a submedição é a principal causa das perdas aparentes no parque de hidrômetros, de modo que uma política regular de aferição e substituição de hidrômetros é primordial para o controle de perdas.

O **controle de uso não autorizado** (combate às fraudes e ligações clandestinas) é uma ação complexa, envolvendo o viés social, já que em muitos casos afeta famílias de baixa renda ou clientes em situação de desemprego. A maioria dos casos identificados se dá por meio de *bypass*, fazendo com que parte do fluxo de água não passe pelo hidrômetro, ou através de fraudes nos hidrômetros que diminuem ou evitam o movimento da engrenagem registradora. Gonçalves e Itonaga (2007) e Bezerra e Cheung (2013) recomendam que a companhia tenha um arcabouço legal para autuar clientes com ligações clandestinas ou fraudes.

O **sistema comercial adequado** (melhoria no cadastro comercial) está estreitamente relacionado com o serviço de atualização cadastral dos usuários e com a possibilidade de integração com os setores de abastecimento, o que possibilita o controle preciso dos volumes disponibilizados e consumidos, fundamental para a composição do Balanço Hídrico.

A **qualificação da mão de obra** consiste em um processo contínuo e permanente de capacitação dos recursos humanos envolvidos no combate às perdas, já que a qualidade da leitura depende do nível de qualificação dos leitistas, e um cadastro confiável passa pelo profissional capacitado e atualizado.

3 MODELAGEM HIDRÁULICA

O estudo dos sistemas de abastecimento de água iniciou-se antes do surgimento dos primeiros computadores. Numa fase anterior à era da informática, os engenheiros já projetavam, construíam e geriam sistemas de abastecimento e distribuição de água, mas de um modo experimental ou através de cálculo manual (OLAIA, 2012). Numa fase anterior aos simuladores hidráulicos, o dimensionamento dos sistemas de distribuição de água era efetuado por meio de ábacos e com a aplicação de escalas logarítmicas que simplificavam as expressões matemáticas. Em 1936, Hardy Cross, na Universidade de Illinois, desenvolveu um processo sistemático para calcular sistemas hidráulicos (CROSS, 1936). O método de Hardy-Cross é o mais antigo e o mais adotado no ensino de cálculo das condições de equilíbrio hidráulico de sistemas de distribuição de água.

Em meados do século passado foram desenvolvidos os primeiros simuladores hidráulicos (McLROY, 1950 e SURYAPRAKASAN, REID e GEYER, 1950).

O avanço da engenharia de *softwares* possibilitou o desenvolvimento de programas mais robustos, capazes de realizar uma série de cálculos com grande velocidade e precisão. Os pesquisadores apropriaram-se desse salto tecnológico para estudar problemas reais e complexos. Nas últimas décadas, as pesquisas envolvendo simuladores hidráulicos e calibradores têm evoluído substancialmente (ROCHA *et al.*, 2009; SALVINO, 2012; GIUSTOLISI, BERARDI e LAUCELLI, 2014). Apesar da evolução substancial nas pesquisas, o uso de *softwares* permanece, de forma geral, no plano hipotético e poucos programas têm sido aplicados em casos reais de controle de perdas no Brasil.

Os modelos hidráulicos podem ser definidos, basicamente, de dois modos, o primeiro designa por modelo o *software* de cálculo (simulador) que descreve o comportamento do sistema mediante determinadas solicitações, enquanto o segundo associa os modelos ao conjunto de componentes físicos e não físicos que descrevem o comportamento hidráulico e de qualidade da água do sistema. Neste trabalho, adotaremos o termo simulador para os *softwares* e modelos para as representações dos sistemas.

De acordo com Coelho, Loureiro e Alegre (2006), o modelo de simulação hidráulica é formado por:

- Um conjunto de dados descritivos das características físicas do sistema, das suas solicitações – os consumos – e das suas condições operacionais.

- Um conjunto de equações matemáticas que reproduzem o comportamento hidráulico dos componentes individuais e do sistema como um todo, expressas em termos das principais variáveis de estado, por exemplo, a vazão nos trechos ou a pressão nos pontos de consumo.
- Por algoritmos numéricos necessários para a resolução desse conjunto de equações matemáticas.

A simulação hidráulica de redes de distribuição de água é indispensável para o controle eficiente dos sistemas (JANSEN e PADE, 2013), e constituem atualmente um instrumento com um vasto domínio de aplicabilidade, que podem ser usados no domínio do planejamento, projeto, operação, manutenção e reabilitação de sistemas de abastecimento de água (FERNANDES e MARQUES, 2011). Um *software* de simulação hidráulica, geralmente, resolve as equações de continuidade e energia com base nos dados de entrada fornecidos. Assim, a qualidade das simulações é dependente da qualidade dos dados, ou seja, a precisão do modelo depende de quanto bem este foi calibrado. A implementação eficiente de um modelo requer uma calibração que esteja interligada com um cadastro de redes em meio digital e/ou monitoramento de campo que envolva a medição do consumo e pontos estratégicos de controle de vazão e pressão.

Olaia (2012) apresentou o modelo do sistema de abastecimento de água do Instituto de Investigação Agronómica de Chianga, em Angola. Segundo o autor, a partir dos resultados obtidos formulam-se vários cenários que permitem uma otimização da eficiência do sistema ao nível de dimensionamento, gestão e planejamento.

O desenvolvimento de modelos de redes hidráulicas é precedido pelo levantamento do cadastro técnico que, geralmente, é digitalizado em formato CAD (Desenho Assistido por Computador). Segue-se um processo sistemático de atualização desse cadastro, para se obter um modelo confiável que contem todos os trechos e os diversos acessórios da rede, como registros, válvulas redutoras de pressão, reservatórios, *boosters* etc.

De acordo com Corrijo et al. (2008), a construção de um modelo requer a observância dos seguintes tópicos:

- Determinar os objetivos da modelagem: explicitar a função objetivo, pois os cálculos do modelo requerem objetivos definidos e estabelecidos ao nível desejado de confiança.
- Realizar vistorias no local a ser modelado: desenvolver um modelo bem representativo da área em estudo, em que o bom conhecimento da realidade local possibilita uma adequada representação matemática, através de parâmetros que, se realizados em gabinete, seriam negligenciados.
- Analisar os dados disponíveis: por meio de uma avaliação dos dados agrupados, pode-se provar alguns pressupostos iniciais importantes, bem como reconsiderar os resultados e delinear novas prioridades no processo de representação do sistema real.
- Escolha do programador de modelo: adoção de programas que tenham passado pelo crivo acadêmico, bem fundamentados e de uso comum.
- Modelo simplificado: na construção do modelo, deve-se incluir processos mais representativos, de forma que ele fique simplificado, para melhor compreensão do sistema.
- Conferir a precisão do modelo: efetuar análise de sensibilidade, calibração e análise de erros de simulação. Comparar os dados simulados com os dados de campo. Caso ocorra uma diferença fora da normalidade, adicionar e adquirir mais dados, para aumentar a compreensão dos parâmetros. Esses procedimentos devem ser realizados até se atingir um nível aceitável.

Há diversos simuladores hidráulicos disponíveis para a modelagem de sistemas de abastecimento de água (Hidrocad, Epanet, Watercad, Strumap, SynerGee, INSSA). A seleção de um programa para simulação de um sistema de abastecimento de água deve considerar, prioritariamente, o fim a que se destina. Definiu-se o simulador adotado por meio da análise da síntese apresentada por Rego (2007) dos principais modelos adotados no mundo (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Tabela das características dos modelos de simulação hidráulica

Fonte: adaptado de Rego (2007)

Características	Hidrocad	Epanet	Watercad	Strumap	Synergee
Custo	Bom	Muito Bom	Não Satisfaz	Não Satisfaz	Não Satisfaz
Facilidade de uso	Muito Bom	Muito Bom	Bom	Bom	Não Satisfaz
Operacionalidade e flexibilidade	Não Satisfaz	Bom	Bom	Muito Bom	Bom
Robustez do modelo	Não Satisfaz	Bom	Bom	Bom	Muito Bom
Velocidade de processamento	Não Satisfaz	Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom
Componentes representadas	Não Satisfaz	Muito Bom	Muito Bom	Bom	Muito Bom
Interface com o usuário	Bom	Muito Bom	Bom	Bom	Não Satisfaz
Características do modelo de qualidade	Não Satisfaz	Bom	Muito Bom	Não Satisfaz	Não Satisfaz
Integração com bases de dados de CAD, SIG e SCADA	Bom	Bom	Muito Bom	Bom	Bom

Entre os simuladores investigados, inicialmente, selecionou-se os modelos Epanet, Watercad e Strumap como sendo os que apresentam as melhores características de aplicação nesta pesquisa. Optou-se pelo EPANET por ser um programa gratuito e com grande aceitabilidade nacional e internacional. As principais motivações para a escolha foram:

- Compatível com o LenhsCalibra, adotado para a calibração do modelo.
- Compatível com o *software* UFC2, adotado para importação dos dados CAD.
- Confiabilidade do processo de cálculo.
- Utilização livre e gratuita, não havendo qualquer restrição ao seu uso.
- Utilização universal, existindo fóruns de discussão sobre a matéria.

3.1 Epanet 2.0

O Epanet é um *software* de simulação hidráulica e qualidade da água, desenvolvido pela Environmental Protection Agency (EPA) dos Estados Unidos, que permite executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade em redes pressurizadas de distribuição de água.

O Epanet se destaca entre os programas disponíveis para a simulação de redes de abastecimento de água. É distribuído gratuitamente e seu código-fonte é aberto,

inclusive pode-se incorporar outras rotinas de cálculo. Trata-se de um dos programas mais testados, analisados e confiáveis para estudos hidráulicos.

A partir das características da rede (material e diâmetros das tubulações, e demanda dos nós) e dos dados topográficos (comprimento, cotas topográficas dos nós etc.) obtem-se os valores de perda de carga, velocidade e vazão em cada trecho, e da carga hidráulica e pressão em cada nó ao longo do tempo, considerando a oscilação da demanda dos nós.

Dentro de sua base de cálculo, o programa apresenta três possibilidades para o cálculo das perdas de carga, por meio das equações de Hazen-Williams, de Darcy-Weisbach e de Chezy-Mamnimg, com seus respectivos coeficientes.

O *software* possibilita analisar estratégias alternativas de gestão e pode incorporar outros programas, pelo fato de que as rotinas de cálculos estão disponíveis em uma biblioteca de vínculo dinâmico de funções, que permitem a personalização de acordo com as necessidades do usuário. Trata-se de uma ferramenta útil para o desenvolvimento de aplicações específicas que requerem a execução de muitas análises da rede, como é o caso da calibração do modelo de simulação. Por exemplo, Nicolini e Patriarca (2011), Shen e McBean (2011), Koppel e Vassiljev, 2011; Zhang, Yu e Bai (2012) e Estapé (2013) utilizaram o Epanet em apoio as suas pesquisas na área de calibração de redes hidráulicas. Faria, Calijuri e Oliveira (2009) fizeram uma combinação entre o Spring e o Epanet 2.0 para a simulação de pressão e vazão de redes hidráulicas. Os resultados demonstraram a eficácia na aquisição, representação, manipulação dos dados e gerenciamento de sistemas de distribuição de água.

Silva (2008) realizou uma exploração das potencialidades do Epanet 2.0 para a simulação hidráulica de sistemas de abastecimento de água, apontando que o programa tem a capacidade de interação com diversos pacotes computacionais gratuitos, permitindo analisar e simular várias situações reais por meio de:

- Importação de redes desenhadas em AutoCAD.
- Análise da qualidade da água (idade, cloro residual, trihalometanos etc.).
- Modelagem do funcionamento de válvulas e bombas.
- Análise das condições de combate a incêndio.

3.2 Calibração de Redes Hidráulicas

A calibração é um processo de comparação dos resultados de um modelo com as observações de campo (OSTFELD *et al.*, 2011). Se necessário, deve-se ajustar os dados que descrevem o sistema até que o comportamento previsto pelo modelo concorde razoavelmente com aquele verificado na realidade, para inúmeras condições operacionais (WALSKI, 1986). Segundo Rocha *et al.* (2009), o processo de calibração envolve vários fatores, os quais dependem de equações de condições de equilíbrio hidráulico e características do fluido transportado, geografia local e aspectos físicos das peças do sistema, em que o uso adequado e preciso, tanto quanto possível, dessas variáveis se traduzirá na confiabilidade do modelo hidráulico. A calibração completa de um modelo permite ao projetista uma melhor compreensão do sistema de distribuição de água e confiança nas previsões do modelo.

Os parâmetros ajustados pelos métodos de calibração são, principalmente, a rugosidade dos tubos, as demandas do sistema, as perdas de carga singulares, as cotas topográficas, vazamentos, diâmetros e válvulas.

Os modelos de calibração aplicados a sistemas de distribuição de água podem ser classificados de várias formas. De acordo com Ormsbee e Lingireddy (1997), a calibração pode ser classificada em:

- Calibração do modelo hidráulico e da qualidade da água.
- Calibração estática ou dinâmica.
- Calibração manual ou automatizada.

A calibração hidráulica envolve processo de ajuste dos parâmetros que controlam o comportamento hidráulico do modelo. Coelho, Loureiro e Alegre (2006) relatam que a calibração hidráulica de um modelo consiste no ajuste até se obter uma concordância dos valores de pressão e vazão, em que as duas fontes de incerteza são a rugosidade das tubulações e os consumos nodais. Essas duas variáveis podem ser estimadas, diferentemente do comprimento, diâmetros e cotas, que podem ser medidos. Já a calibração da qualidade da água, de modo semelhante, realiza o ajuste dos parâmetros de qualidade da água do modelo. Para calibração estática, o modelo não varia ao longo do tempo, enquanto no processo dinâmico, os dados variam no tempo.

Ostfeld *et al.* (2011) relatam que os métodos de calibração podem envolver técnicas de otimização formal ou métodos manuais, em que o modelador informalmente

examina os parâmetros do modelo alternativo. O desenvolvimento de um quadro de calibração geralmente envolve:

- Definição das variáveis do modelo, dos coeficientes e das equações.
- Seleção de uma função objetivo para medir a qualidade da calibração.
- Seleção do conjunto de dados a serem usados para o processo de calibração.
- Seleção de um esquema de otimização manual para alterar os valores dos coeficientes, no sentido de reduzir a função objetivo.

A calibração manual adota a metodologia de tentativa e erro, enquanto a calibração automatizada utiliza técnicas de otimização para determinar um conjunto de parâmetros que proporcione bons resultados entre os dados medidos e modelados.

Walski (1986) propôs duas etapas para calibração: realizar comparações entre valores simulados e observações em situações operacionais iguais; e ajustar os parâmetros de entrada do modelo, quando necessário, com o intuito de obter melhor concordância entre dados simulados e observados.

De maneira geral, um modelo de calibração de rede deve compreender sete passos básicos (PIZZO, 2004):

- Identificar o uso pretendido para o modelo.
- Determinar as estimativas iniciais dos parâmetros do modelo.
- Coletar os dados para calibração.
- Avaliar os resultados do modelo.
- Executar a macrocalibração.
- Realizar análise de sensibilidade.
- Executar a microcalibração.

O processo de calibração de redes hidráulicas não é um problema resolvido nas companhias, já que as ferramentas computacionais desenvolvidas não são, geralmente, adotadas na prática, devido às incertezas no procedimento e no número de cenários a serem utilizados nas simulações (ZAQUE *et al.*, 2012).

O método de calibração prevê que os valores simulados das variáveis de estado (pressões e vazões) sejam confrontados com os respectivos valores observados. Os valores simulados são obtidos através de um modelo hidráulico que envolve basicamente as equações da continuidade e da conservação da energia. O equilíbrio hidráulico é resolvido através do Método Híbrido Nô-Malha. Todini e Pilati (1987) e, mais tarde, Salgado *et al.* (1988) optaram por designá-lo como sendo o “Método do

Gradiente”. Abordagens semelhantes foram descritas por Hamam e Brameller (1971) (“Método Híbrido”) e por Osiadacz (1987) (“Método de Newton Malha-Nó”). A única diferença entre estes métodos é o modo como as vazões nos trechos são atualizadas após uma nova solução de cotas piezométricas nos nós ter sido encontrada, durante o processo iterativo. Em virtude do método apresentado por Todini e Pilati (1987) ser o mais simples, este foi adotado no EPANET 2, *software* utilizado no desenvolvimento deste trabalho.

O processo de calibração resultará, inevitavelmente, em resultados melhores quanto maior o número de pontos monitorados das grandezas que refletem o comportamento do sistema físico a que corresponde. Partindo do princípio de que não é viável medir e registrar essas grandezas em todos os pontos de interesse e em todos os momentos de interesse – caso contrário a utilidade do modelo seria questionável, pelo menos na gestão corrente do sistema tentar-se-á obter tantas observações quanto possível, e basear a explicação da incerteza remanescente em estimativas razoáveis (COELHO, LOUREIRO e ALEGRE, 2006).

Diversos modelos foram desenvolvidos nas últimas décadas, destacam-se alguns trabalhos recentes: Nicolini *et al.* (2011), Wu e Walski (2012), Jiang *et al.* (2012), Ashby (2013), Hutton *et al.* (2013).

Wu e Walski (2012) apresentaram uma metodologia para a calibração dinâmica de um sistema de distribuição de água em um longo período de simulação, usando como referência o problema de calibração desenvolvido para o Battleof Water Calibration Networks. A calibração foi efetiva de forma progressiva, ajustando os parâmetros do modelo de forma iterativa.

Nicolini *et al.* (2011) aplicaram duas metodologias para uma rede real de distribuição de água. A primeira envolve um modelo de calibração, enquanto a segunda é específica para resolver o problema da estimativa ótima do coeficiente de vazamentos. O algoritmo utilizado foi o algoritmo genético e proporcionou, como resposta, a rugosidade e o coeficiente de vazamentos. O controle do vazamento no modelo proposto é realizado através da introdução e manobra de uma válvula reguladora de pressão. O posicionamento e regulação das válvulas teve como algoritmo de otimização os Algoritmos Genéticos Multiobjetivos.

Ashby (2013) construiu uma rede de distribuição de água na Universidade de Kentucky com a finalidade de investigar a influência dos pontos de monitoramento na calibração de redes hidráulicas. Os resultados da pesquisa apontaram a necessidade da

adoção, simultânea, de dados de velocidade e pressão na calibração. Hutton *et al.* (2013) aplicaram uma abordagem bayesiana probabilística para calibrar a rugosidade das tubulações de um modelo de uma rede real de distribuição de água implementado no Epanet. Jiang *et al.* (2013) calibraram o modelo de uma rede real, localizada em uma cidade do norte da China, com algoritmos genéticos.

3.3 Algoritmos Genéticos

Os Algoritmos Genéticos são métodos de otimização e busca inspirados nos mecanismos de evolução das espécies. Estes algoritmos seguem o princípio da seleção natural e sobrevivência do mais apto, declarado pelo naturalista e fisiologista inglês Charles Darwin em seu livro “A Origem das Espécies”. Foram propostos inicialmente por Holland (1975) e popularizados por um dos seus alunos, Goldberg (1989), como parte de suas tentativas em explicar processos ocorrendo em sistemas naturais e de construir sistemas artificiais baseados em tais processos (PADILHA, 2013).

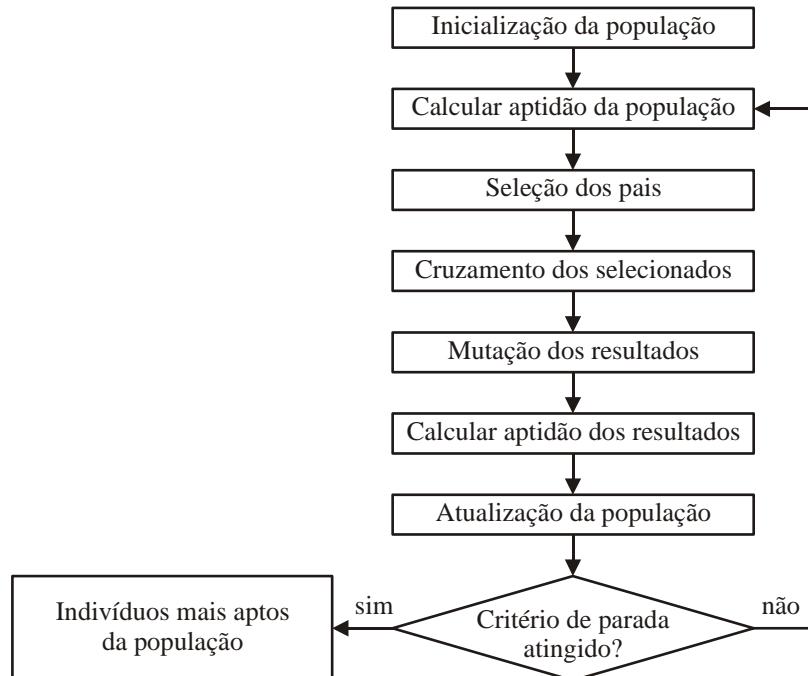
Os Algoritmos Genéticos oferecem uma alternativa interessante aos métodos de otimização “clássicos” baseados em gradientes e são particularmente úteis para os problemas e modelos altamente não lineares (KRAJNÁK, 2012). Os AG procuram reproduzir os mecanismos da evolução natural das espécies, através da lógica e da matemática, realizando uma busca aleatória entre os indivíduos que apresentem uma solução baseada no desempenho evolucionário (SALVINO, 2012). Em geral, os AG abordam todo o espaço de solução de forma aleatória e, em seguida, melhoram as soluções encontradas por meio da aplicação de princípios baseados em genética e critérios de seleção probabilística. Segundo Darwin, quanto melhor um indivíduo se adaptar ao seu meio ambiente, maior será sua chance de sobreviver e gerar descendentes.

AG é uma metodologia de otimização estocástica que, geralmente, encontra uma solução próxima ao ótimo global. É aplicável quando prevalece a natureza do princípio da sobrevivência dos indivíduos mais fortes e a necessidade de eliminação dos mais fracos ou não viáveis. Cada solução potencial é representada por um conjunto ordenado de parâmetros ou valores chamados de genes, que são dispostos em sequências chamadas de “cromossomos”. Uma população de cromossomos representa um conjunto de soluções.

O Algoritmo Genético canônico (tradicional ou simples) pode ser visto como uma junção de três componentes: (a) a representação do cromossomo, comumente uma cadeia de bits ou um conjunto de valores em ponto flutuante; (b) seleção dos pais da próxima geração, usando a função de aptidão, através de uma roleta, torneio, ou outro método de seleção; (c) a síntese de novos indivíduos, usando operadores inspirados na biologia como o crossover e a mutação. A estrutura de funcionamento de um AG tradicional pode ser vista na Figura 3.1.

O algoritmo genético básico gera aleatoriamente um conjunto de cromossomos que resultam em possíveis alternativas para questão-problema. A função de aptidão (função objetivo) avalia cada cromossomo, medindo o grau de sucesso ou condição da solução. A cada solução é atribuído um valor da aptidão, o qual afere o grau de qualidade da solução. Na etapa seguinte, os indivíduos menos aptos são descartados, e os sobreviventes serão selecionados para procriar novos descendentes, por meio das operações de recombinação (*crossover*) e mutação, continuando o biociclo até ser encontrada a solução satisfatória (SILVA, 2006).

Figura 3.1 – Estrutura de funcionamento de um AG tradicional



Santos (2010) destaca algumas vantagens dos algoritmos genéticos em relação a outros métodos de calibração:

- Funcionam tanto parâmetros contínuos e com parâmetros discretos, ou com uma combinação deles.

- Realizam buscas simultâneas em varias regiões do espaço de busca.
- Trabalham com uma população e não com um único ponto.
- Utilizam informações de custo ou recompensa, e não derivadas ou outro conhecimento auxiliar.
- Otimizam um grande número de variáveis.
- Otimizam parâmetros de funções-objetivos com superfícies complexas, reduzindo a incidência de mínimos ou máximos locais.
- Fornecem uma gama de parâmetros ótimos e não uma simples solução.
- São facilmente implementados em computadores.
- São facilmente hibridizados com outras técnicas heurísticas.

Salvino (2012) descreve alguns aspectos conceituais dos principais operadores genéticos utilizados na calibração, destacando-se a seleção, a recombinação ou cruzamento (*crossover*) e a mutação.

O operador genético baseado na **seleção** biológica realiza a seleção dos indivíduos mais aptos da população inicial, para compor a população intermediária, cujos indivíduos sobreviventes passarão pelo processo de recombinação e mutação. A seleção é o mecanismo através do qual os “cromossomos” são copiados para a próxima geração, resultando na sobrevivência das soluções mais aptas, ou seja, que resultem em valores mais eficientes na função objetivo. Dentro os mecanismos utilizados para realização da seleção, destacam-se os apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Principais tipos de seleção dos algoritmos genéticos

Tipo de Seleção	Descrição
Torneio	Nesse processo, são escolhidos, de forma aleatória, dois ou mais indivíduos. Os valores da função objetivo são comparados e o que obtiver o melhor desempenho irá compor o rol da população intermediária, que passará pelo processo seguinte de mutação e recombinação.
Roda da roleta	Nesse mecanismo é estabelecida uma probabilidade de seleção para cada indivíduo, de acordo com o valor da aptidão. Esse processo continua até o preenchimento da população intermediária. Silva (2006) relata que esse método apresenta como limitação o fato de não funcionar com aptidões negativas.
Uniforme	A população intermediária é resultante da ordenação decrescente, pelo valor da aptidão de cada cromossomo, ou crescente, pelo valor da função objetivo.
Aleatória	Como o próprio nome sugeri, a escolha dos indivíduos para formar a população intermediária se dá aleatoriamente.
Elitismo	Esse operador tem a função de conservar os indivíduos considerados os melhores dentro da população avaliada a cada geração.

Segundo Santos (2010), a **recombinação** é o principal mecanismo de sondagem do espaço de busca, permitindo gerar cromossomos filhos com características genéticas dos pais (indivíduos geradores). Com isso, haverá indivíduos mais adaptados.

O processo de **mutação** ocorre devido ao enxertamento de uma característica genética na população de soluções, através da modificação da cadeia cromossômica dos indivíduos. Exemplos de operadores de mutação são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Exemplos de operadores de mutação dos algoritmos genéticos

Tipo de Mutação	Descrição
Mutação <i>Flip</i>	Cada gene que sofrerá mutação recebe um valor sorteado do alfabeto válido
Mutação por Troca	São sorteados n pares de genes e os elementos do par trocam de valor entre si
Mutação <i>Creep</i>	Um valor aleatório é somado ou subtraído do valor do gene

A utilização dos algoritmos genéticos tem sido bem-sucedida na otimização de projetos de sistema de distribuição de água em todo o mundo (NICOLINI, 2012; MELIA *et al.*, 2013; OSTFELD, OLICKER e SALOMONS, 2013; DI NARDO *et al.*, 2013). O estado da arte possui inúmeros estudos e pesquisas utilizando algoritmos genéticos no processo de calibração de redes hidráulicas (TAKAHASHI *et al.*, 2010; NICOLINI, GIACOMELLO e DEB, 2011; ZHANG, YU e BAI, 2012; SALVINO *et al.*, 2012).

Nicolini, Giacomello e Deb (2011) desenvolveram um estudo de otimização, para um sistema de distribuição de água. Na primeira etapa, realizou a calibração do modelo, e na segunda fez uma abordagem sobre avaliação das perdas. Para calibração, foram utilizados algoritmos genéticos que geraram os valores ótimos dos coeficientes de atrito dos tubos. Para o controle das perdas, realizou-se a regularização das válvulas redutoras de pressão por meio do algoritmo que deu o melhor posicionamento e controle das válvulas.

Takahashi *et al.* (2010) e Salvino *et al.* (2012) desenvolveram um algoritmo de programação que considera critérios hidráulicos na aplicação dos algoritmos genéticos, de modo a avançar no espaço de soluções e resultar na diminuição do tempo de processamento. Takahashi *et al.* (2010) aplicaram a metodologia em um sistema real colombiano. Zhang, Yu e Bai (2012) empregaram algoritmos genéticos em uma rede real de uma cidade chinesa.

Salvino *et al.*(2012) desenvolveu um algoritmo genético computacional que realiza a calibração multivariada de modelos hidráulicos de distribuição de água. Denominado LenhsCalibra, o programa possibilita identificar vazamentos, obstruções nas tubulações, válvulas inoperantes ou estranguladas, e possíveis incompatibilidades com os dados reais de operação. Essa técnica foi aplicada no sistema-piloto do LENHS-UFPB (SALVINO *et al.*, 2013) e no complexo Lagunar de distribuição de água em Maceió – AL (GOMES *et al.*, 2013).

Os inúmeros trabalhos baseados em algoritmos genéticos mostram que a abordagem é satisfatória e alcança bons resultados na calibração de sistemas de distribuição de água.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O procedimento metodológico desta pesquisa foi dividida em quatro partes principais. Na primeira parte, foi analisada a divisão administrativa da gestão dos sistemas de abastecimento de água da Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE), especialmente da unidade de negócio do Banabuiú e a delimitação da área de estudo. Em seguida, avaliou-se o cadastro técnico do sistema de abastecimento de água em estudo com base em dados levantados em campo de caminhamento dos tubos, diâmetros, interligações, registros de manobras, cotas topográficas e ocorrências operacionais. Também foram utilizadas imagens de satélite para contagem das residências. Em terceiro lugar, foram instalados transdutores de pressões em pontos estratégicos para a obtenção e o armazenamento de dados para a calibração do modelo. Por último, foi realizada a calibração da rede, verificando-se as divergências nos pontos monitorados, com o intuito de se identificar no modelo calibrado possíveis anomalias do sistema, tais como vazamentos, ligações irregulares, válvulas parcialmente fechadas e trechos com necessidade de reabilitação.

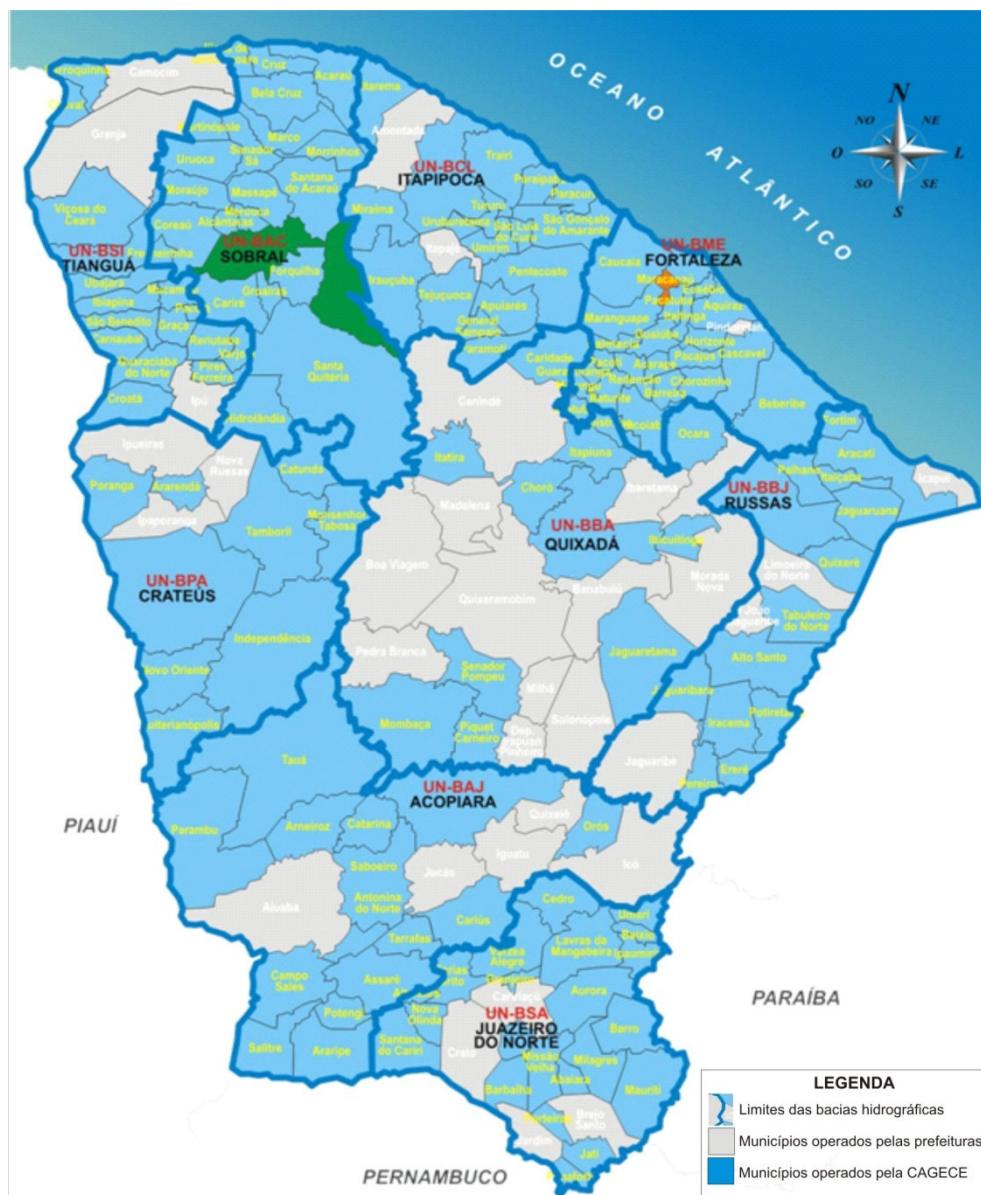
4.1 Área de Estudo

A Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE) foi criada pela Lei nº 9.499, de 20 de julho de 1971. É uma sociedade de economia mista, vinculada à Secretaria das Cidades de Estado do Ceará. Sua estrutura administrativa é descentralizada em treze unidades de negócio, sendo quatro da capital e nove do interior (Figura 4.1), dispostas segundo as bacias hidrográficas do Estado, cobrindo 149 municípios.

A criação das unidades de negócio foi estabelecida de acordo com as bacias hidrográficas existentes no Estado, visando proporcionar uma melhor gestão hídrica e uma integração com a Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (Cogerh) e comitês de bacia. Proporciona, ainda, redução nos tempos de deslocamento, agilizando as atividades, minimização de custos, melhor rateio na distribuição das ligações de água e de localidades abastecidas e mais eficiência na gestão e na qualidade dos serviços.

Figura 4.1 – Distribuição das Unidades de Negócio do Interior

Fonte: www.cagece.gov.br



A Unidade de Negócio da Bacia do Banabuiú – UN-BBA é responsável pelo abastecimento de água tratada e coleta e tratamento de esgoto de Quixadá e outros 11 municípios do Estado. O sistema de distribuição de água selecionado para o estudo está localizado no distrito de Juatama (Figura 4.2), pertencente ao município de Quixadá, Ceará (Figura 4.3). Distando aproximadamente 16 quilômetros da sede, em direção ao município de Banabuiú, o distrito ocupa parte da microrregião denominada Sertões de Quixeramobim, região central do estado do Ceará.

Figura 4.2 – Distrito de Juatama, Quixadá-Ceará



O sistema de distribuição de água de Juatama foi escolhido por ser setorizado, ter pouco tempo de operação (desde novembro de 2011) e ser operacionalmente estável, o que aponta para dados confiáveis.

A atual população residente no distrito de Juatama é, aproximadamente, de 2.489 habitantes, conforme projeção horizontal do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) a partir do ano 2010. O distrito possui 610 residências, o que dá uma taxa de ocupação média de quatro habitantes por domicílio.

A água do sistema de abastecimento do distrito de Juatama é de origem superficial do açude Pedra Branca, sendo bombeada através de uma adutora de água bruta (500 mm) até um reservatório elevado. A partir deste reservatório tem uma adutora de 200 mm e, aproximadamente, 13 km de extensão para a estação de tratamento de água. Após o tratamento, a água é bombeada para um reservatório apoiado, que alimenta a rede de distribuição do distrito por gravidade. As Figuras 4.4 e 4.5 apresentam o reservatório apoiado, que está localizado em um afloramento rochoso, e a estação de bombeamento da ETA, respectivamente.

Figura 4.3 – Localização da área de estudo



Figura 4.4 – Reservatório de distribuição



Figura 4.5 – Estação de bombeamento



Na saída, a estação de tratamento de água possui um sistema de monitoramento manual do nível do reservatório, através de um manômetro analógico, e um macromedidor de vazão (Figura 4.6).

Figura 4.6 – Estação de tratamento de água, macromedidor e manômetro analógico

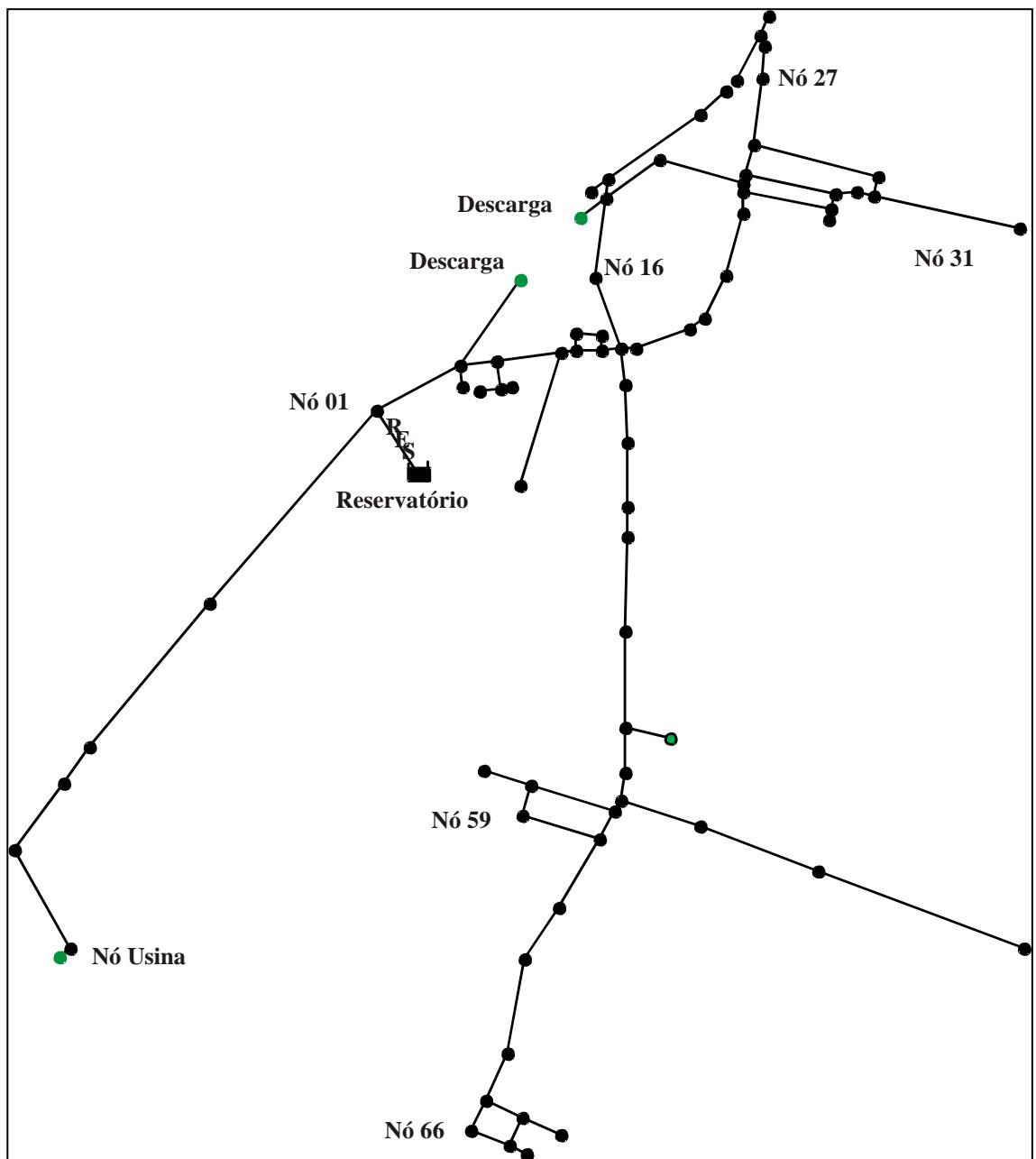


4.2 Modelagem da Rede de Distribuição de Água

A rede de distribuição é do tipo mista (malhada com ramificações) e possui um comprimento total de aproximadamente 9 km. As tubulações possuem diâmetros de 50 mm (5.345 m), 75 mm (1.673 m), 100 mm (180 m) e 150 mm (1.720 m) em PVC, e 78 m em ferro fundido. A rede é composta por 76 nós e 84 trechos, sendo que um desses nós representa uma usina de processamento de biodiesel da Petrobras. A Figura 4.7 apresenta a rede de distribuição e os dados da rede são apresentados na Tabela 4.1.

A modelagem do sistema de distribuição de água iniciou-se com uma representação esquemática do conjunto de trechos ligados aos nós. Os trechos representam os tubos, bombas e válvulas de controle. Os nós, cuja posição é definida através de coordenadas planimétricas e de uma cota, representam pontos de consumos, alterações de diâmetros e o reservatório apoiado da rede hidráulica.

Figura 4.7 – Rede de distribuição de água de Juatama, Ceará



A base de desenvolvimento do modelo foi criada no Autocad, que permitiu a esquematização dos elementos que constituem o modelo. O processo de modelagem utilizou dados oriundos da planta da rede hidráulica digitalizada no AutoCAD e imagem do Google Earth (Figura 4.8), os quais forneceram o quantitativo de residências, curvas de nível com as cotas topográficas e características físicas da rede de distribuição (diâmetros, comprimentos, tipos de material). O processo de conversão e importação para o Epanet 2.00.12 utilizou o programa UFC2 (ver Figura 4.9) para traçar a rede e os elementos hidráulicos.

Tabela 4.1 – Dados da rede de distribuição de água de Juatama, Ceará

Trecho	Comprimento	Diâmetro	Trecho	Comprimento	Diâmetro
RES	145,00	150	41	121,82	75
1	179,99	150	42	93,70	75
2	200,00	50	43	34,17	75
3	40,00	50	44	107,86	75
4	73,21	150	45	28,40	75
5	53,60	50	46	70,00	100
6	40,00	50	47	110,00	100
7	20,01	50	48	120,00	100
8	122,79	150	49	59,99	75
9	265,99	50	50	180,00	75
10	27,49	150	51	185,20	75
11	32,60	50	52	88,40	50
12	49,40	50	53	84,00	75
13	25,40	50	54	53,00	75
14	50,29	150	55	160,00	50
15	37,80	150	56	240,00	50
16	142,99	75	57	420,00	50
17	153,47	75	58	25,33	75
18	60,00	50	59	165,00	50
19	127,99	50	60	97,00	50
20	37,17	50	61	60,48	75
21	40,00	50	62	58,00	50
22	213,70	50	63	152,00	50
23	97,00	50	64	152,00	50
24	60,70	50	65	120,00	50
27	126,01	50	66	179,99	50
28	245,00	50	67	100,01	50
29	40,00	50	68	80,00	50
30	287,00	50	69	80,00	50
31	33,00	50	70	66,37	50
32	42,20	50	71	62,00	50
33	27,00	50	72	80,00	50
34	173,81	50	73	38,00	50
35	172,00	50	74	21,10	50
36	63,00	50	75	1.335,30	150
37	16,00	50	82	23,10	50
38	166,01	50	83	32,64	50
39	14,73	50	84	89,49	50
40	42,45	75			

Figura 4.8 – Imagem do Google Earth com informações da rede hidráulica



As perdas de carga foram determinadas pela fórmula de Hazen-Williams, adotando-se o coeficiente de rugosidade C igual a 140 para os tubos de PVC e 120 para as tubulações de ferro fundido, pois a rede em estudo tem pouco tempo de operação.

Figura 4.9 – Paletas com os ícones do UFC2

	Tubo da rede		Conexão entre as redes
	Reservatório circular		Demanda especial
	Reservatório retangular		Aspersor/ sprinkler
	Booster		Tubo de adutora
	Poço profundo		Estaqueamentos de adutora
	Estação de bombeamento		Editar
	Reservatório de nível fixo		Definir padrões
	Registro fechado		Editar e capturar cotas de curvas de nível
	Válvula controladora de pressão e vazão		Gera e insere arquivos de demanda
	Gerar arquivos do Epanet		Gotejador

4.2.1 Demandas Nodais

Consideraram-se, neste trabalho, dois padrões de consumo nos nós, o primeiro corresponde às demandas calculadas com base na projeção populacional do IBGE, enquanto o segundo adota as demandas reais calculadas com base na média histórica dos consumos residenciais da CAGECE (ano base 2012).

No primeiro padrão, os consumos da população projetada foram adotados baseado no projeto original da rede de distribuição que considerou uma *per capita* de 110 L/hab.dia e os coeficiente K1 e K2 iguais a 1,20 e 1,50, respectivamente. Estes foram adicionados ao modelo e as vazões nos trechos foram determinadas proporcionalmente à soma dos semicomprimentos das canalizações incidentes nos mesmos. Os dados adotados neste padrão estão apresentados na Tabela 4.1. As vazões nos nós foram obtidas pela Equação 4.1 são apresentadas no Apêndice A.

O consumo da indústria de biodiesel é considerado especial, razão pela qual não foi incluído nesse cálculo.

Tabela 4.2 – Dados adotados no primeiro padrão de consumo

População Estimada (2012)	2.489 habitantes
Consumo <i>per capita</i>	110 L/hab./dia
K1	1,20
K2	1,50
Vazão máxima horária	5,70 L/s
Vazão em marcha	0,000759

$$q_i = q_l \times \sum L_j , \quad (4.1)$$

Onde:

q_i = vazão de ponta (L/s)

q_l = taxa de vazão linear (L/s/m)

L_j = semicomprimento do trecho “j”, incidente no nó “i” (m)

No segundo padrão, a demanda foi imposta pelo histórico do consumo residencial, e consistiu basicamente em obter o consumo *per capita* de cada ligação e depois distribuir os consumos das residências nos nós de acordo com as áreas de influência destes. A Tabela 4.3 apresenta a relação do histórico do consumo.

Tabela 4.3 – Histórico do consumo comercial e residencial – Ano 2012

Mês	Usina da Petrobras (m ³)	Volume Total (m ³)
Janeiro	-	6.493
Fevereiro	4.180	6.314
Março	2.090	6.324
Abril	3.480	6.686
Maio	2.900	6.517
Junho	3.380	6.266
Julho	4.810	11.066
Agosto	4.860	11.259
Setembro	4.820	11.389
Outubro	6.330	13.179
Novembro	6.020	12.788
Dezembro	6.050	12.937

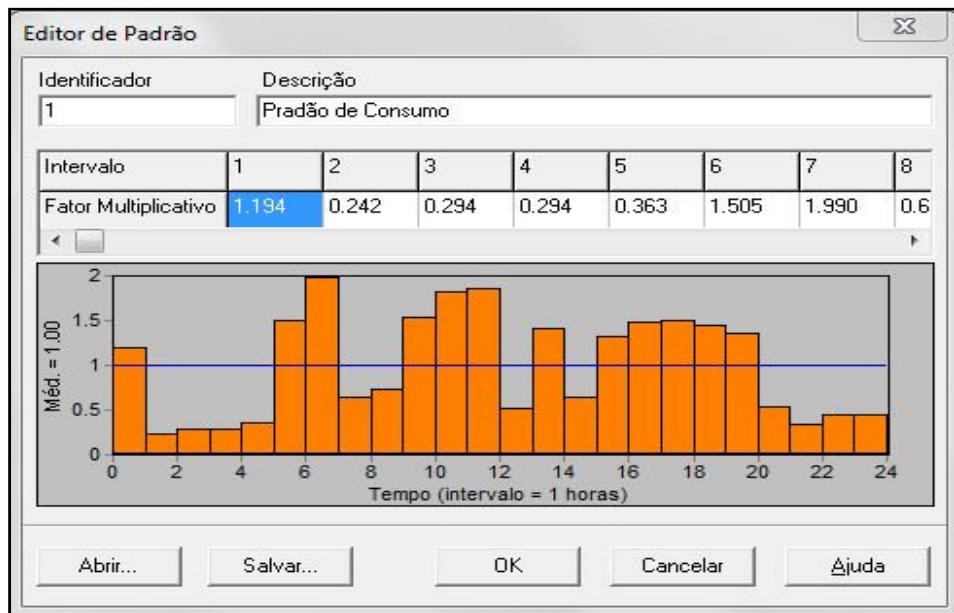
4.2.2 Padrão Temporal

O padrão de variação horária da demanda adotado foi obtido através da medição da vazão de entrada na rede de distribuição. As medições foram realizadas por meio do medidor de vazão ultrassônico (marca GE, modelo Transport PT878) durante um período de 24 horas, sendo a cada hora estabelecida pela média da vazão do período. Para cada intervalo horário, obteve-se o fator multiplicativo em relação ao valor médio de todo o período (Tabela 4.4). O padrão temporal foi obtido pelo uma análise simples é apresentado na Figura 4.10 representa as demandas das residências e da usina da Petrobras em um período de 24 horas.

Tabela 4.4 – Coeficientes e vazões obtidas na saída do reservatório

Hora	Vazão Distribuída		Coeficiente da Curva (Fator Multiplicativo)
	L/s	m³/h	
0:00	6,9	24,88	1,194
1:00	1,4	4,94	0,242
2:00	1,7	5,95	0,294
3:00	1,7	5,95	0,294
4:00	2,1	7,48	0,363
5:00	8,7	31,25	1,505
6:00	11,5	41,39	1,990
7:00	3,7	13,26	0,640
8:00	4,2	15,27	0,727
9:00	8,9	22,09	1,540
10:00	10,6	38,11	1,834
11:00	10,8	39,06	1,869
12:00	3,0	10,91	0,519
13:00	8,2	29,53	1,419
14:00	3,7	13,34	0,640
15:00	7,7	27,64	1,332
16:00	8,6	30,85	1,488
17:00	8,7	31,14	1,505
18:00	8,4	30,32	1,453
19:00	7,9	28,48	1,367
20:00	3,1	11,29	0,536
21:00	2,0	7,25	0,346
22:00	2,6	9,21	0,450
23:00	2,6	9,21	0,450
Média	5,77	508,02	

Figura 4.10 – Padrão de consumo



4.3 Calibração da Rede de Distribuição de Água

Um modelo é desenvolvido para simular o comportamento de determinado sistema existente ou a construir, para uma dada gama de configurações e de condições ou cenários operacionais (COELHO, LOUREIRO e ALEGRE, 2006). Quando o modelo incide sobre um sistema existente, deve-se realizar o processo de calibração através da aferição dos resultados obtidos na simulação. Nesta acepção, Cesario (1995) define calibração como o processo de ajuste fino de um modelo até este ser capaz de simular as condições verificadas no sistema para um determinado horizonte temporal, com um grau de exatidão pré-estabelecido. A calibração é feita com base na comparação entre resultados do modelo e resultados de medições realizadas no sistema físico.

A calibração da rede hidráulica de Jatuama dar-se-á em três etapas, a saber:

- Calibração do modelo anteriormente desenvolvido, utilizando-se os parâmetros de entrada de vazão e pressão, por meio do programa LenhsCalibra, desenvolvido por Salvino (2012).
- Comparação hidráulica das medições observadas e simuladas no Epanet 2.00.12.
- Avaliação do desempenho do modelo, baseada nos critérios estabelecidos pelo Water Research Centre (WRC, 1989), com ênfase no controle de perdas,

averiguando a existência de eventuais vazamentos aparentes ou ligações clandestinas.

Conforme os critérios da WRC (1989), o erro absoluto, que é a diferença entre o valor calibrado e o observado, dos valores de pressão deve estar dentro das seguintes faixas:

- $\pm 0,50$ m para 85% das medidas de pressão.
- $\pm 0,75$ m para 95% das medidas de pressão.
- $\pm 2,00$ m para 100% das medidas de pressão.

Para os valores de vazão, o erro relativo deve estar dentro das seguintes faixas:

- $\pm 5\%$ para as medidas de vazão, quando estas excedem 10% da vazão total.
- $\pm 10\%$ para as medidas de vazão, quando estas não excedem 10% da vazão total.

Para calibração da rede, foi utilizado o programa LenhsCalibra, desenvolvido por Salvino (2012). O LenhsCalibra foi desenvolvido na linguagem Delphi/Pascal. Segundo o autor, esta linguagem foi escolhida pela facilidade de incorporação na biblioteca do EPANET fornecida pela EPA (agência americana desenvolvedora do EPANET). Toda a programação aplicada no *software* foi desenvolvida levando-se em consideração a otimização do tempo de processamento, uma vez que os Algoritmos Genéticos requerem um processamento elevado de cálculos.

Segundo Silva (2008), os vazamentos inerentes e grosseiros devem ser considerados na calibração dos modelos hidráulicos. A metodologia adotada no *software* LenhsCalibra busca possíveis vazamentos, porém, a rede em questão apresenta índice de vazamentos dentro do índice de perdas reais inevitáveis.

O programa de calibração desenvolvido denominado de LenhsCalibra incorpora duas alternativas distintas para calibração de redes de distribuição. A primeira alternativa utiliza um Algoritmo iterativo e a outra é realizada através dos Algoritmos Genéticos Multiobjetivo. O processo de calibração tem por objetivo, utilizando redes modeladas no simulador hidráulico Epanet, produzir informações compatíveis com suas respectivas redes reais (SALVINO, 2012). A possibilidade de se trabalhar com mais de uma função objetivo caracteriza o algoritmo como Algoritmo Genético Multiobjetivo.

Conforme mencionado, o programa tem uma flexibilidade de processamento, podendo calibrar através do algoritmo iterativo ou dos algoritmos genéticos. No primeiro módulo, permite a modificação dos parâmetros do modelo da rede, como

rugosidade e demandas, e faz um ajuste dos valores das medidas de pressão e vazão aos valores simulados no modelo hidráulico, de forma incremental.

No processo de calibração através da iteração, é possível ajustar o modelo por meio da rugosidade absoluta ou do coeficiente C, dependendo da fórmula da perda de carga utilizada e das demandas nodais.

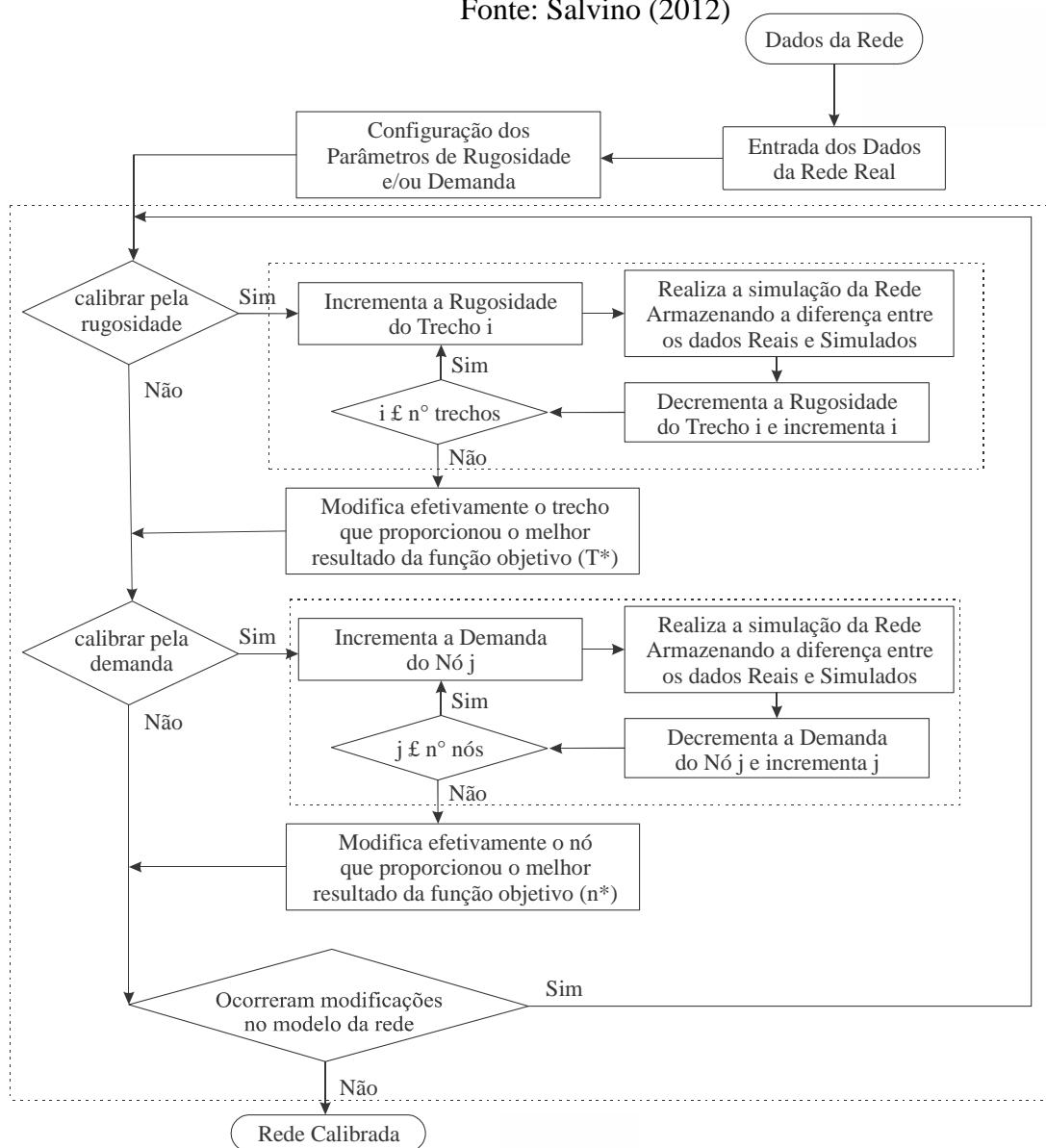
A função objetivo utilizada é formada pela minimização do somatório dos valores absolutos das diferenças entre os valores simulados (X_s) e os valores reais (X_r) das n leituras informadas, conforme a Equação 4.2.

$$F = \sum_{i=1}^n (|X_s - X_r|)i \quad (4.2)$$

O algoritmo desenvolvido incrementa a nova rugosidade no trecho ou demanda no nó, conforme o parâmetro hidráulico utilizado como variável na calibração. O programa realiza uma nova simulação para verificar a melhoria da função objetivo. O algoritmo seleciona a região que teve um avanço através da minimização da função objetivo para todas as medidas disponíveis e modificadas. Ao valor final da rugosidade ou demanda é adicionado o incremento. Caso a função objetivo não obtenha melhorias na minimização, o algoritmo finaliza e utiliza como resposta a última modificação da rede. Esses processos podem ser visualizados no fluxograma do algoritmo iterativo na Figura 4.11.

Figura 4.11 – Fluxograma do algoritmo iterativo de calibração

Fonte: Salvino (2012)



Salvino (2012) desenvolveu uma biblioteca de funções, com a finalidade de utilizar o Algoritmo Genético Multiobjetivo (AGM) como ferramenta de calibração de modelos hidráulicos. Assim, quando se deseja utilizar vários objetivos que produzirão um conjunto de soluções ótimas, o programa apresenta a vantagem de utilizar até sete variáveis ou uma combinação entre elas.

Foram adicionados os principais parâmetros genéticos conhecidos e utilizados nos estudos acadêmicos brasileiros e estrangeiros. Em seu programa, Salvino (2012) relaciona os seguintes parâmetros:

- Tamanho da população: especifica o tamanho da população fixa, do início até o final das gerações.

- População intermediária: população composta dos cromossomos selecionados para a reprodução.
- Seleção
 - Uniforme: seleciona os melhores cromossomos.
 - Roda da roleta: seleciona segundo uma probabilidade, em que os melhores são mais prováveis, mas permite uma chance aos demais.
 - Torneio: seleciona aleatoriamente três cromossomos, e o melhor deles é escolhido.
- Reprodução ou operador *crossover*
 - Elitismo: permite que os melhores cromossomos sejam repassados para a próxima geração.
 - Probabilidade: representa a probabilidade de a reprodução ser bem-sucedida; caso contrário, os cromossomos dos pais são repassados para a próxima geração.
 - Tipo: a formação do cromossomo dos filhos é herdada dos pais.
 - Mutação: probabilidade de um *bit* do cromossomo inverter seu valor.

O *software* em questão possibilita uma análise de sensibilidade, por meio da convergência da função objetivo. O programa tem na sua base de cálculos a possibilidade de escolha de três funções objetivo:

- Soma das diferenças absolutas dos pontos de pressão e vazão (Equação 4.3).

$$F = \sum_{i=1}^n |P_S - P_M|_i + \sum_{j=1}^m |Q_S - Q_M|_j \quad (4.3)$$

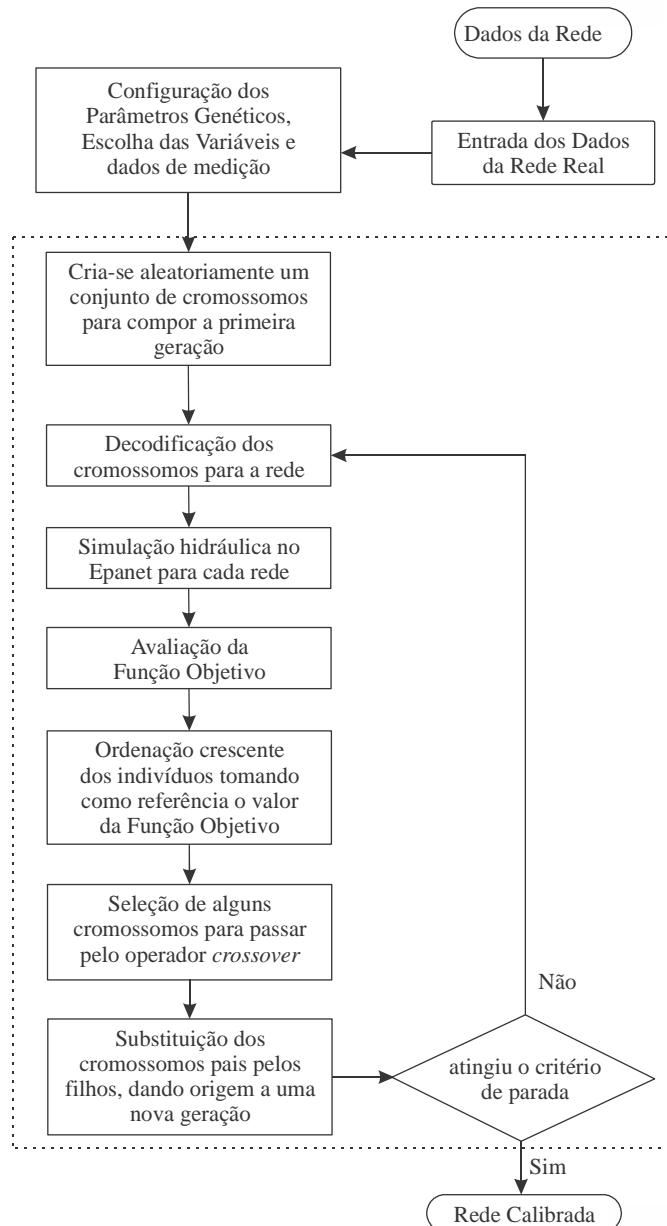
- Soma das diferenças ao quadrado dos pontos de pressão e vazão (Equação 4.4)

$$F = \sum_{i=1}^n |P_S - P_M|_i^2 + \sum_{j=1}^m |Q_S - Q_M|_j^2 \quad (4.4)$$

- Soma das maiores diferenças dos pontos de pressão e vazão (Equação 4.5)

$$F = \text{Maior} (P_S - P_M) + \text{Maior} (Q_S - Q_M) \quad (4.5)$$

Figura 4.12 – Fluxograma do Algoritmo Genético Multiobjetivo



De acordo com informações anteriores, o algoritmo genético possibilita utilizar diversas variáveis no processo de calibração. Os parâmetros adotados nesta pesquisa foram consolidados por Salvino (2012). A Tabela 4.5 apresenta os parâmetros dos algoritmos genéticos adotados para a calibração.

Tabela 4.5 – Parâmetros dos algoritmos genéticos utilizados para a calibração da rede

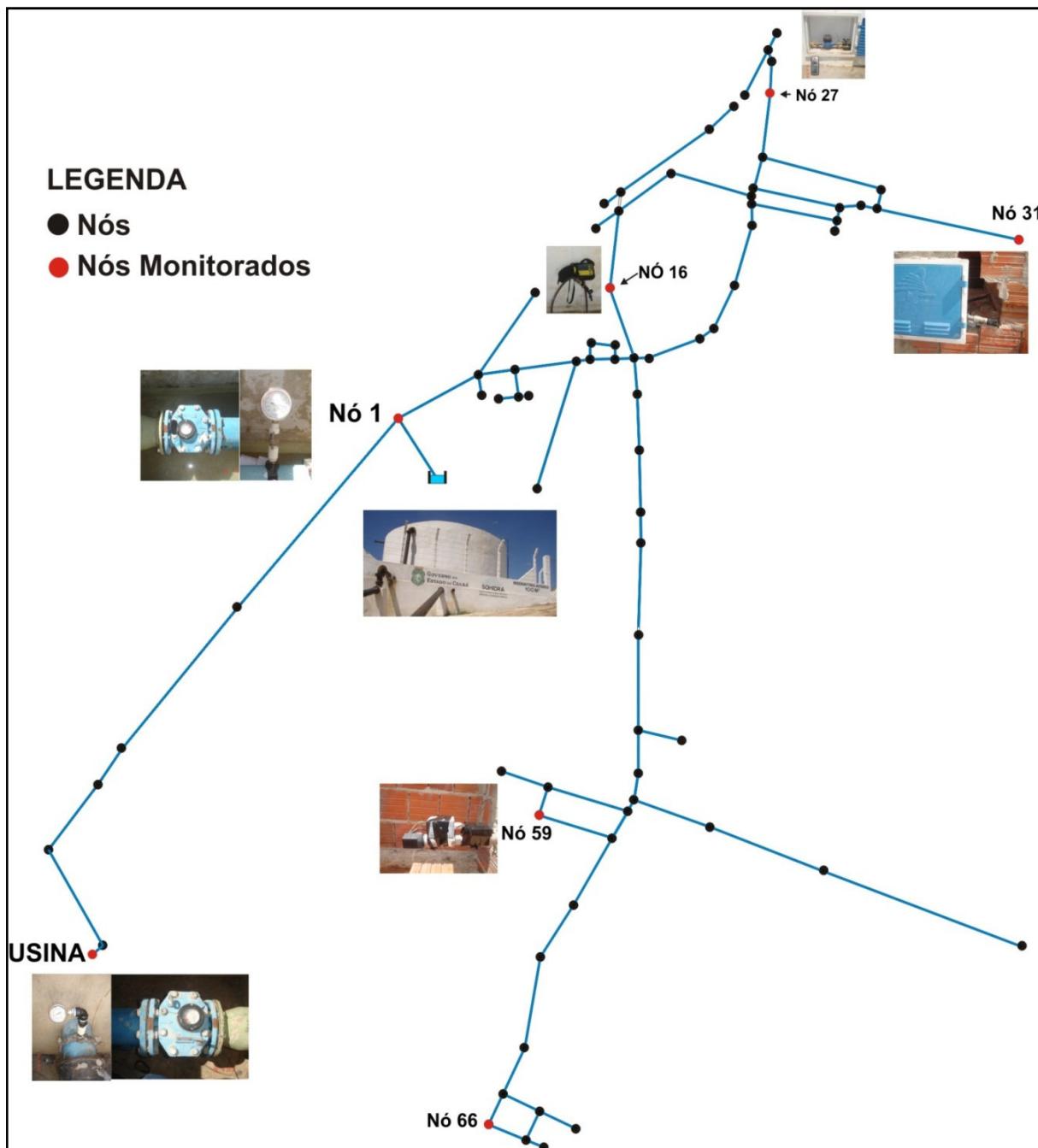
Fonte: Salvino (2012)

População inicial	500
População temporária	250
Probabilidade de reprodução	80%
Tipo de seleção	Uniforme e mutação de 3%

4.3.1 Coleta dos Dados em Campo

Para calibração do modelo, foram utilizados dados como diâmetros, cota topográfica, rugosidade do tubo, comprimento, nível do reservatório e demanda nodal. As principais grandezas que refletem o comportamento hidráulico de um sistema de distribuição de água são a vazão e a pressão. Neste estudo, a pressão e a vazão são as variáveis de estado, obtidas por meio de campanhas de medições em campo nos locais mais representativos da rede em estudo. A Figura 4.13 apresenta os pontos de monitoramento de vazão e pressão da rede de distribuição.

Figura 4.13 – Rede de distribuição de água com os pontos monitorados



4.3.2 Coletas de Pressão

Para a coleta de pressão, foram utilizados dois *dataloggers*, sendo um da marca MaxxiLogger e outro da marca Novus, acoplados a transmissores de pressões (marca Druck) instalados diretamente na rede nos nós 1, nº 66 e nº Usina, além de medições em cavaletes residenciais (nós 26, 27, 31 e 59), assim como manômetro analógico na de biodiesel da Petrobras.

Os armazenadores de pressão foram programados para coletar as pressões de hora em hora; da mesma forma foi realizada a coleta manual da pressão nos manômetros analógicos.

Os pontos selecionados são representativos para o sistema, com pontos de máxima, média e mínima pressão. Levou-se em consideração a segurança dos equipamentos. A Figura 4.14 apresenta uma visualização geral dos equipamentos e a forma como foram instalados na rede e nas residências. Para a simulação hidráulica, foram desprezadas as perdas de carga das conexões dos equipamentos.

Figura 4.14 – Equipamentos de medição instalados na rede e em uma residência



Foi realizado o levantamento *in loco* das cotas topográficas nos pontos monitorados, para verificação em relação às cotas informadas pela planta em CAD, através de um GPS de marca Garmim x33 (Figura 4.15). Foi realizado levantamentos

topográficos em campo, com o intuito de obter mais exatidão conforme recomendado por Pizzo (2004).

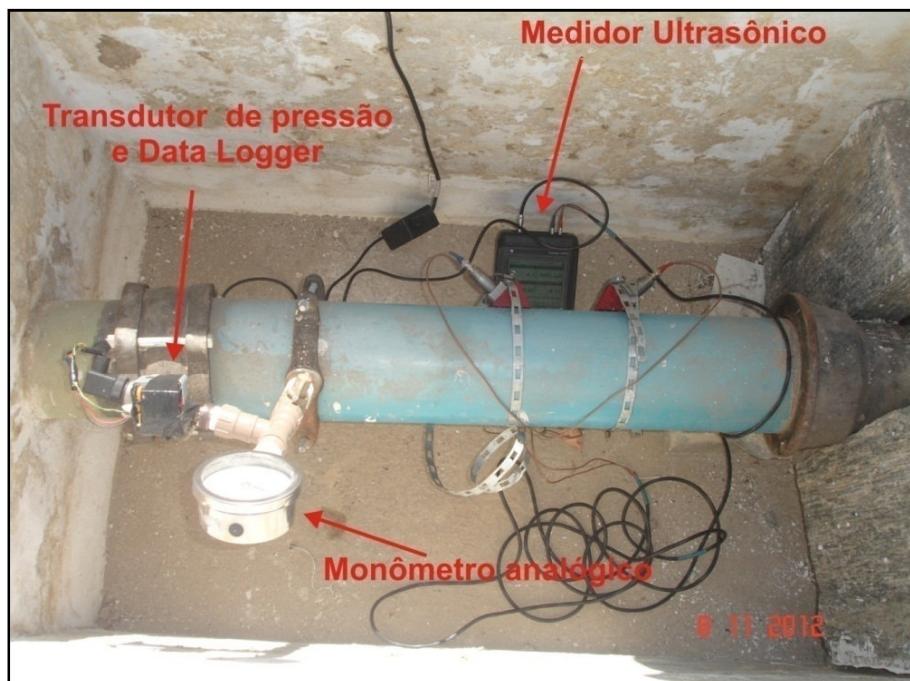
Figura 4.15 – Levantamento da cota topográfica na saída do reservatório e em um cavalete residencial



4.3.3 Coletas de Vazão

A rede em estudo é abastecida por um reservatório exclusivo. Para a coleta dos dados de vazão, foi instalado um medidor ultrassônico (marca GE, modelo Transport PT878) na saída da estação de tratamento de água, coletando as informações de hora em hora, durante 24 horas (Figura 4.16).

Figura 4.16 – Equipamentos instalados na rede de distribuição de água



5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Levantamento dos Índices de Perdas da UN-BBA e do Município de Quixadá

Na gestão dos sistemas de abastecimento de água do Ceará, adotou-se uma estrutura descentralizada em unidades de negócio na Capital e no Interior, cada uma responsável por um grupo de municípios. O município de Quixadá está inserido na Unidade de Negócio da Bacia do Banabuiú (UN-BBA), constituída por 12 municípios.

Verificou-se previamente o Balanço Hídrico do Município de Quixadá e da UN-BBA. O Balanço Hídrico realizado pela CAGECE é modelado através do Sistema de Controle de Perdas (Siscope), uma ferramenta de gestão operacional que tem como principal objetivo a otimização da gestão de perdas em sistemas de abastecimento através de módulos, que oferecem aos gestores o suporte necessário para conduzi-los a tomar decisões eficientes e precisas, e que possibilite, em duas grandes linhas mestras, a saber:

- O aporte de ferramentas de gestão para análise, registro e acompanhamento dos resultados das ações, permitindo que seus técnicos enriqueçam e aprofundem seu conhecimento no tocante aos problemas e soluções da gestão das perdas.
- A otimização da prestação dos serviços de campo.

O Balanço Hídrico é um dos módulos inseridos no Siscope é baseado no modelo da International Water Association (IWA), o qual foi otimizado, detalhado e adaptado para as condições locais. A análise do Balanço Hídrico é subdividido em: manutenção dos lançamentos, geração do Balanço Hídrico, geração dos índices de perdas, comparativo entre unidades de negócio e relatórios gerenciais. O sistema possibilita consultas de todo o Estado, por unidade de negócio, por sistema, por localidade e por município. Após a seleção do período do intervalo de dados e a definição do universo (abrangência) a ser pesquisado, o Siscope executa os cálculos, buscando os dados nos sistemas-base, apresentando o balanço com elevado grau de detalhamento, superior ao preconizado pela IWA. As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam o Balanço Hídrico de Quixadá e da Unidade de Negócio da Bacia do Banabuiú, respectivamente.

Figura 5.1 – Balanço Hídrico de Quixadá (CE)

					Volume de Água Faturado Não Consumido R	569,986 20.2%	Volume de Água Faturada S 2,734,920 96.91%
VPC A 2,821,997 100.0%	VDis AA 2,821,997 100.0%	Volume de Água Consumo Autorizado B 2,189,273 77.58%	Volume de Água de Consumo Autorizado Faturado D 2,164,934 76.72%	Volume de Água Faturado Medido H 2,137,407 75.74%	Consumo de Ligações Hidrometradas	2,108,138 74.7%	
					Recup. Cons. Elevado + Rec. Erro Leitura	26 0.0%	
					Venda de Água em Carro-Pipa	29,243 1.04%	
				Volume de Água Faturado Não Medido I 7,527 0.98%	Volume Recuperado de Fraude	26,560 0.94%	
					Ligações Não Hidrometradas	967 0.03%	
			Volume de Água de Consumo Autorizado Não Faturado E 24,339 0.86%	Volume de Água Não Faturado Medido J 11,922 0.42%	Consumos Especiais	0 0.0%	
					Volume Dispensado por Consumo Excessivo	9,637 0.34%	
					Consumo das Unidades Próprias da Cagece	2,285 0.08%	
				Volume de Água Não Faturado Não Medido L 12,417 0.44%	Retirada de Água dos Hidrantes Pelo Corpo de Bombeiros	0 0.0%	
					Consumo Operacional	Descargas de Limpeza de Redes de Água	282 0.01%
						Esvaziamento de Redes para Serviços de Manutenção	5,644 0.2%
						Limpeza de reservatórios no sistema distribuidor	6,491 0.23%
Volume de Água Perdas Aparentes F 260,728 9.24%	Volume de Perdas de Água C 632,725 22.42% (IPD)	Volume de Perdas Aparentes F 260,728 9.24%	Volume de Água Não Autorizado M 117,985 4.18%	Volume de Água Não Autorizado M 117,985 4.18%	Fraudes em Ligações Factíveis / Potenciais	19,112 0.68%	Volume de Água Não Faturada T 657,063 3.09% (IANF)
					Fraudes em Ligações Inativas	19,497 0.69%	
					Fraudes em Ligações Ativas nos Hidrômetros	23,909 0.85%	
					By-Pass em Ligações Ativas	23,980 0.85%	
					Ramal Clandestino em Ligações Ativas	31,487 1.12%	
			Volume de Perdas por Inexistência ou Erros de Medição N 142,743 5.06%	Volume de Perdas por Inexistência ou Erros de Medição N 142,743 5.06%	Submedição Fabricação dos Hidrômetros	16,865 0.6%	
					Desgaste Vida Útil dos Hidrômetros	109,248 3.87%	
					Superdimensionamento dos Hidrômetros	14,757 0.52%	
					Subestimação Ligações Não Hidrometradas	1,874 0.07%	
					Vazamentos Visíveis em Adutoras e Redes	98,780 3.5%	
Volume de Água Perdas Reais G 371,996 13.18%	Volume de Água Perdas Reais G 371,996 13.18%	Volume de Vazamentos em Redes e Adutoras O 160,451 5.69%	Volume de Vazamentos em Redes e Adutoras O 160,451 5.69%	Vazamentos Não Visíveis em Adutoras	Vazamentos Detectáveis	51,989 1.84%	Volume de Água Perdas Reais G 371,996 13.18%
					Vaz. Não Detectáveis	9,682 0.34%	
					Vazamentos Visíveis em Ramais	87,049 3.08%	
			Volume de Vazamentos nos Ramais Prediais até o Hidrômetro P 205,901 7.3%	Vazamentos não Visíveis em Ramais	Vazamentos Detectáveis	49,515 1.75%	
					Vazamentos Não Detectáveis (Inerentes)	69,338 2.46%	
			Volumes de Vazamentos e Extravazamentos em Reservatórios Q 5,644 0.2%	Extravasamentos em Reservatórios	Vazamentos em Elementos da Estrutura	2,822 0.1%	
					Vaz. em Acessórios dos Reservatórios	1,411 0.05%	
					Perdas no Sistema Distribuidor	0 0.0%	

Fonte: CAGECE

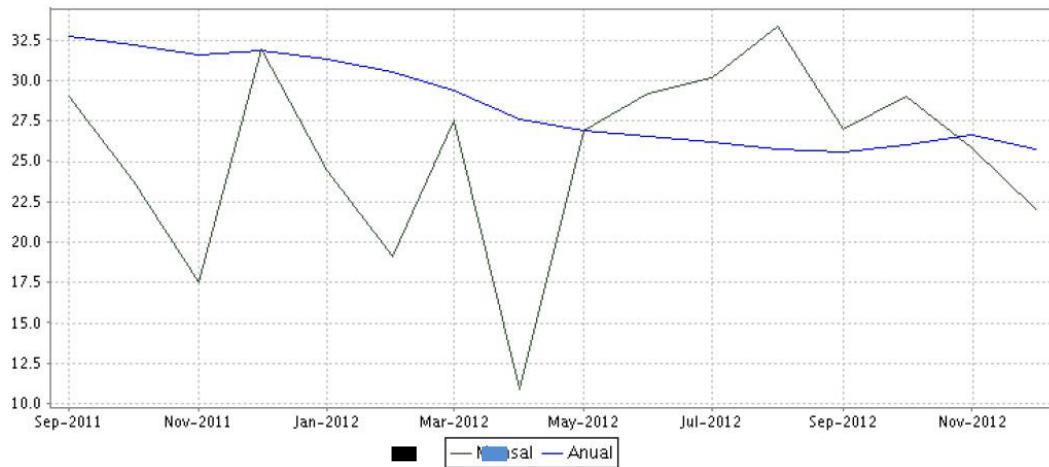
Figura 5.2 – Balanço Hídrico da Unidade de Negócio da Bacia do Banabuiú

					Volume de Água Faturado Não Consumido R	1,612,939 19.59%	Volume de Água Faturada S 7,631,437 92.68%
VPC A 8,234,201 100.0%					Consumo de Ligações Hidrometradas	5,890,088 71.53%	
					Recup. Cons. Elevado + Rec. Erro Leitura	157 0.0%	
					Venda de Água em Carro-Pipa	32,596 0.4%	
					Volume Recuperado de Fraude	94,234 1.14%	
					Ligações Não Hidrometradas	1,423 0.02%	
					Consumos Especiais	0 0.0%	
					Volume Dispensado por Consumo Excessivo	53,128 0.65%	
					Consumo das Unidades Próprias da Cagece	6,044 0.07%	
					Retirada de Água dos Hidrantes Pelo Corpo de Bombeiros	0 0.0%	
					Consumo Operacional	Descargas de Limpeza de Redes de Água Esvaziamento de Redes para Serviços de Manutenção Limpeza de reservatórios no sistema distribuidor	823 0.01% 16,468 0.2% 18,939 0.23%
VDis AA 8,145,871 98.93%					Fraudes em Ligações Factíveis / Potenciais	131,283 1.59%	Volume de Água Não Faturada T 2,215,703 7.32% (IANF)
					Fraudes em Ligações Inativas	154,354 1.87%	
					Fraudes em Ligações Ativas nos Hidrômetros	147,224 1.79%	
					By-Pass em Ligações Ativas	147,692 1.79%	
					Ramal Clandestino em Ligações Ativas	200,457 2.43%	
					Submedição Fabricação dos Hidrômetros	46,323 0.56%	
					Desgaste Vida Útil dos Hidrômetros	297,193 3.61%	
					Superdimensionamento dos Hidrômetros	40,533 0.49%	
					Subestimação Ligações Não Hidrometradas	5,442 0.07%	
					Vazamentos Visíveis em Adutoras e Redes	212,464 2.58%	
Volume de Perdas Aparentes F 1,170,501 14.22%					Vazamentos Não Visíveis em Adutoras	Vazamentos Detectáveis Vazamentos Não Detectáveis	Volume de Perdas de Água C 2,120,300 25.75% (IPD)
					Vazamentos Visíveis em Ramais	185,208 2.25%	
					Vazamentos Detectáveis	105,167 1.28%	
					Vazamentos não Visíveis em Ramais	Vazamentos Não Detectáveis	
					Vazamentos Visíveis em Reservatórios	8,234 0.1%	
					Vazamentos em Elementos da Estrutura	4,117 0.05%	
					Vazamentos em Acessórios dos Reservatórios	4,117 0.05%	
					Perdas no Sistema Distribuidor	88,330 1.07%	

Fonte: CAGECE

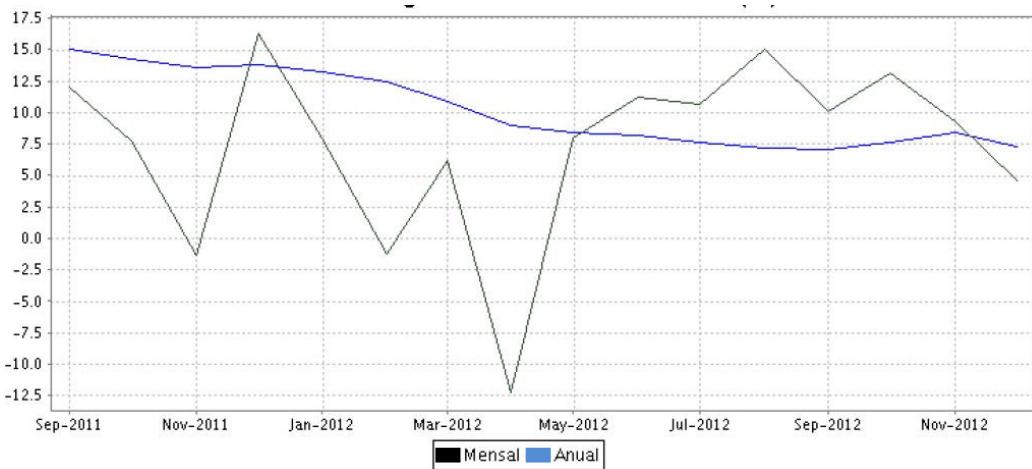
A UN-BBA registrou o Índice de Perdas na Distribuição (IPD) correspondente a 25,75%, média mensal, e 22,01%, anual, para o ano de 2012. O Índice de Água Não Faturada (IANF) mensal ficou em 4,55% e o anual em 7,32%. As Figuras 5.3 e 5.4 mostram o comportamento desses índices no período de setembro de 2011 a dezembro de 2012.

Figura 5.3 – Índice de Perdas na Distribuição – IPD (%) da UN-BBA



O comportamento do IPD anual (acumulado dos últimos 12 meses) durante o período analisado ficou estável, assinalando uma diminuição no final do período. No entanto, o gráfico referente ao IPD mensal apresentou variações significativas, que provavelmente estão relacionadas com alterações no volume mensal perdido por vazamentos.

Figura 5.4 – Índice de Água Não Faturada – IANF (%) da UN-BBA



Com base no IANF, a Unidade de Negócio do Banabuiú pode ser classificada, segundo GOMES (2007), como um sistema com bom gerenciamento. Contudo, esses baixos índices não refletem a realidade brasileira, isso devido à política tarifária, que aplica uma taxação injusta para os pequenos consumidores. Com efeito, os clientes que consumem pouco e pagam o consumo relativo a 10 m^3 , o que faz o IANF ficar negativo em alguns meses, ou seja, o levantamento que o volume faturado é maior do que o distribuído.

Na consulta relacionada ao Município de Quixadá, no mesmo período, os índices citados apresentaram comportamentos semelhantes aos da UN-BBA. O IPD mensal permaneceu em 22,42%, enquanto o anual diminuiu para 16,42 % (Figura 5.5). O IANF mensal de Quixadá ficou em -2,33%, enquanto o anual assinalou 3,09%, o que não reflete a realidade dos sistemas de abastecimento do Brasil, cujas perdas no faturamento chegam a 35,9% (SNIS, 2013).

Figura 5.5 – Índice de Perdas na Distribuição – IPD (%) do município de Quixadá

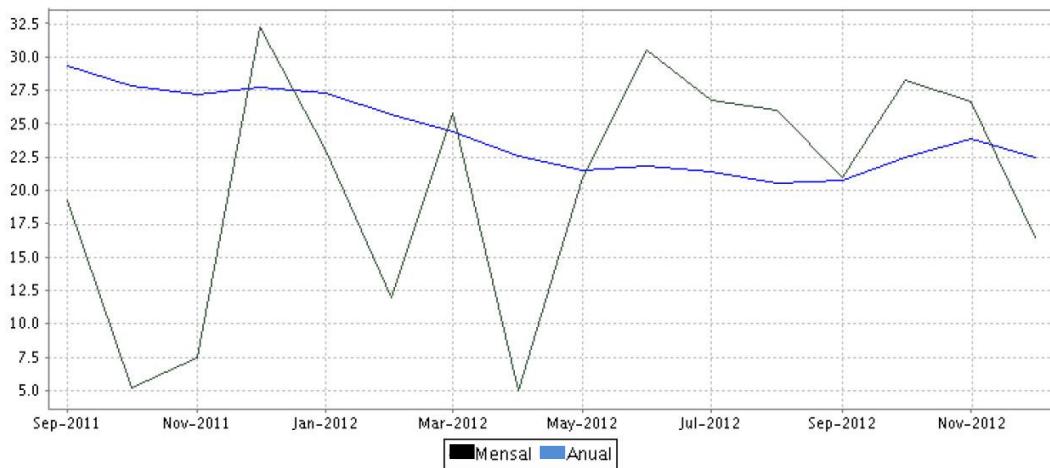
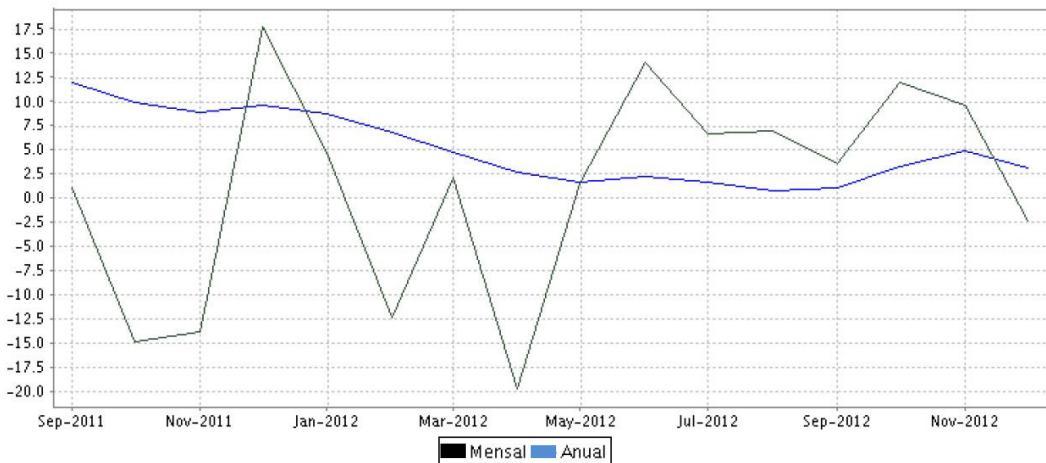


Figura 5.6 – Índice de Água Não Faturada – IANF (%) do município de Quixadá



Os dados disponíveis relativos ao distrito de Juatama não são suficientes para gerar o Balanço Hídrico anual referente ao ano de 2012, já que o sistema de abastecimento começou a operar em novembro de 2011, e somente em junho de 2012 os dados de medição começaram ser inseridos no Siscope. Para mensurar o nível de perdas na área da pesquisa, foram contabilizados os volumes macro e micromedidos de todo ano de 2013. Para o volume macromedio obteve-se 141.791 m^3 e 130.847 m^3 para micromedido, fazem uma subtração, temos 10.944 m^3 de diferencia, representado 7.7 % de perdas na rede de distribuição.

5.2 Variáveis Monitoradas

Para a calibração do sistema analisado foram realizadas medições de vazão na saída do reservatório (vazão total do sistema) e monitorados sete pontos de pressão (Figura 4.13). A seguir, apresenta-se os resultados do monitoramento das variáveis de estado que serviram para compor os dados de entrada do processo de calibração da rede hidráulica do distrito de Juatama.

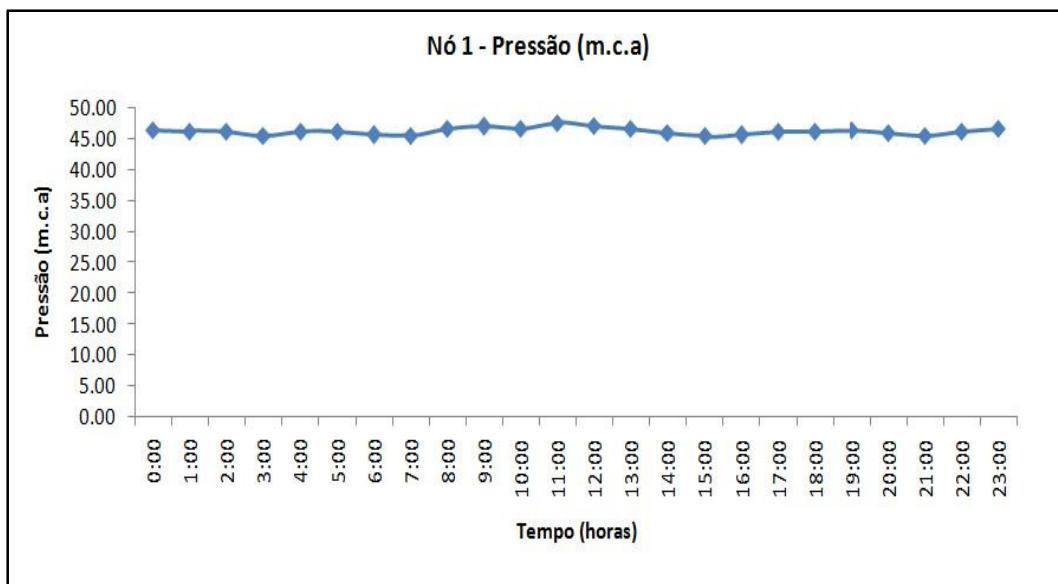
5.2.1 Pressão

A rede de distribuição de água de Juatama é abastecida, exclusivamente, por um reservatório apoiado num afloramento rochoso, na cota 245 m, e não há um sistema de automação para acionamento da estação elevatória que o alimenta. A regra operacional adotada consiste em desligar o conjunto motobomba quando o reservatório estiver cheio, e depois acompanhar a pressão no manômetro analógico, na saída do

reservatório, com o intuito de não deixar o nível diminuir dois metros de coluna da água.

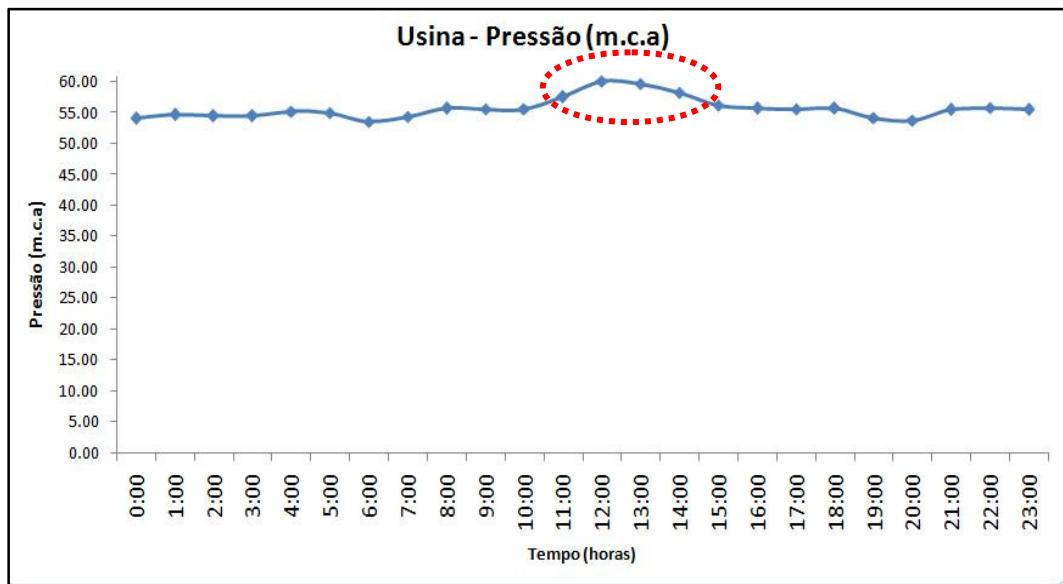
A seguir, é apresentado o comportamento das pressões (Figura 5.7 a Figura 5.15) nos sete pontos de monitoramento de pressão. Os valores são apresentados em tabelas no Apêndice A. A Figura 5.7 apresenta a variação da pressão durante 24 horas na saída do reservatório, onde se observa que não apresenta variação da pressão durante o período avaliado, isso mostra a prática operacional de permanecer o reservatório de distribuição cheio.

Figura 5.7 – Variação da pressão ao longo de 24 horas no Nô 1



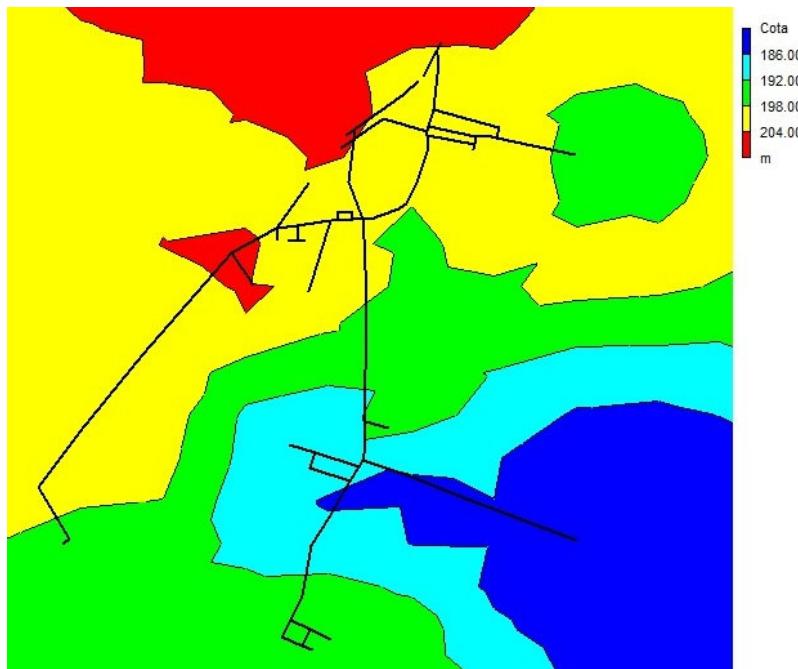
A Figura 5.8 apresenta a variação no ponto de consumo da usina de biodiesel. Observa-se que no período de 10 às 14 horas há um aumento de pressão, refletindo a diminuição da demanda por parte da usina. A tubulação que alimenta a usina tem diâmetro de 150 mm e comprimento de 1.250 metros.

Figura 5.8 – Variação da pressão ao longo de 24 horas no Nô Usina



A rede em estudo pode ser dividida em duas regiões, a primeira possui cotas topográficas que variam de 198 metros para 204 metros, e a segunda de 186metros para 192 metros (ver Figura 5.9). A primeira região é representada pelos nós 1, 16, 27 e 31, e a segunda região é representada pelos nós 59 e 66 e Usina.

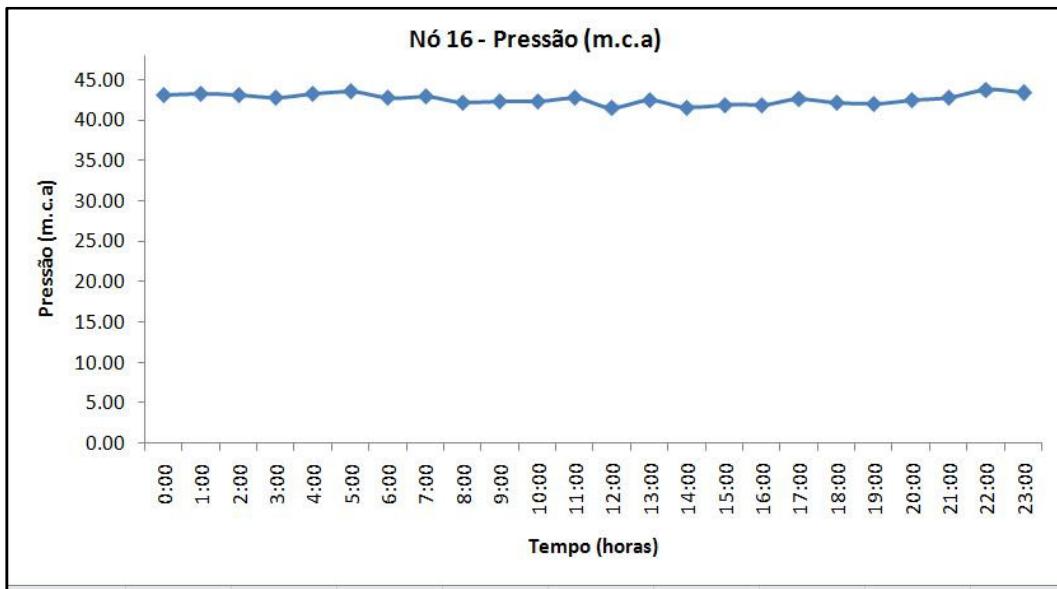
Figura 5.9 – Isolinhas referentes às cotas topográficas



O nó 16 se encontra na região com maiores altitudes (parte amarela do gráfico de isolinhas – Figura 5.9), que representa a parte central da rede distribuição, com presença de adensamento residencial. Observa-se uma variação de pressão entre 41,5 e 43,7 m.c.a.

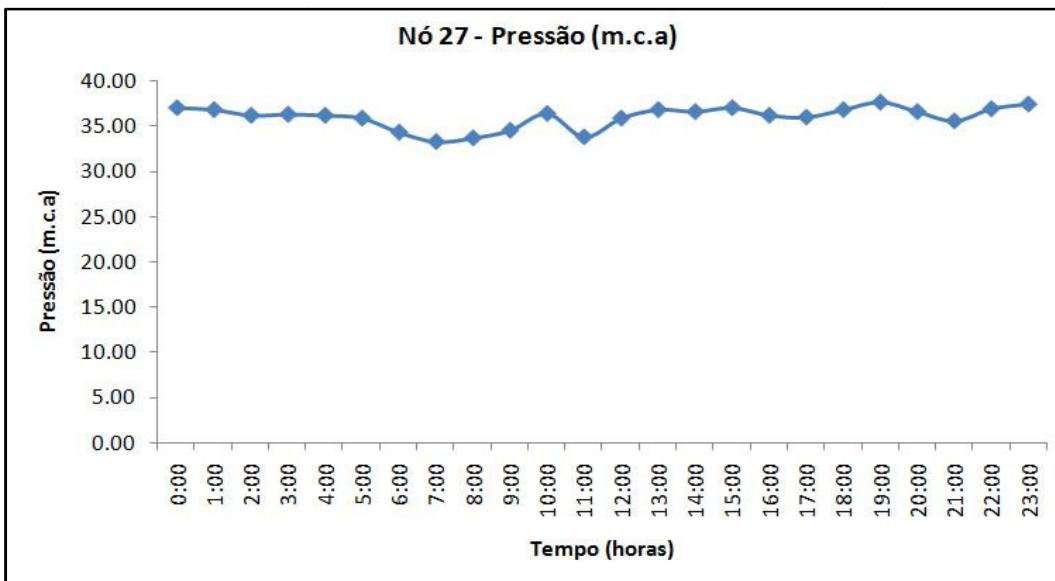
O comportamento da pressão no nó 16 (Figura 5.10) caracteriza-se como padrão residencial, em que nos períodos de 22h às 5h apresentam pressão elevada, enquanto no período compreendido entre 6h e 18h apresenta diminuição da pressão em relação aos outros horários.

Figura 5.10 – Variação da pressão ao longo de 24 horas no Nô 16



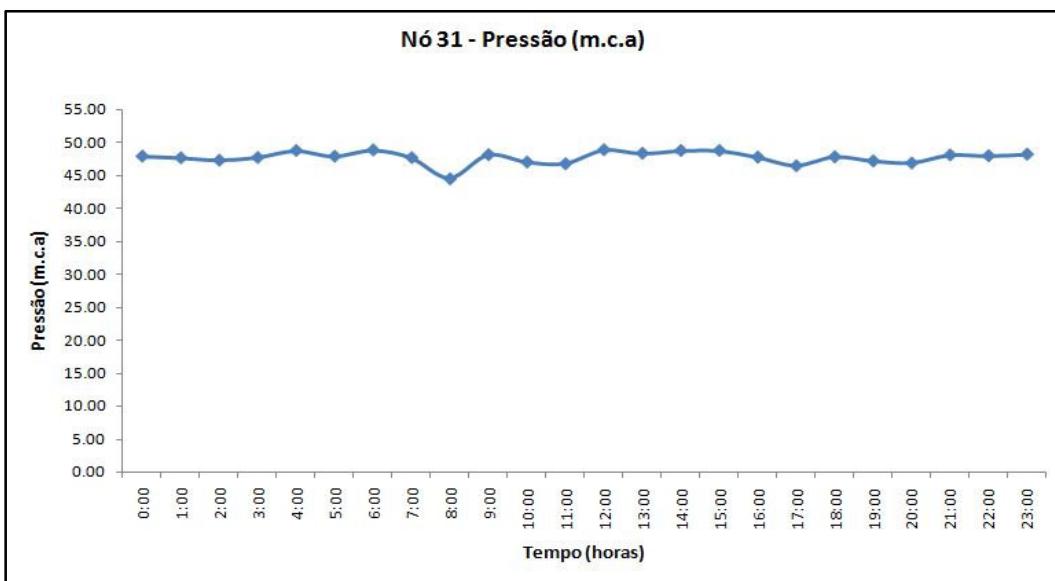
A Figura 5.11 mostra a variação da pressão no nó 27, situado na mesma região do nó 16. O nó 27 está localizado na parte mais alta do distrito. Logo, as pressões registradas para esse nó foram os menores entre todos os pontos monitorados. Nos períodos das 7h às 9h e das 11h às 12h foram registrados os menores picos de pressão na rede. No entanto, ainda podem ser classificadas como pressões elevadas, considerando a pressão mínima de serviço de 10 m.c.a. A variação da pressão no nó 27 apresenta características semelhantes à do nó 16, justamente porque os horários de maior demanda coincidem com os horários das principais atividades domésticas rotineiras.

Figura 5.11 – Comportamento da pressão ao longo de 24 horas no Nô 27



O nô 31 (Figura 5.12) representa o último ponto monitorado dentre aqueles situados na região mais alta do distrito de Juatama. Os dados coletados representam as pressões de uma residência situação na extremidade da rede, onde foram verificadas poucas casas. O gráfico apresenta uma variação semelhante às dos demais gráficos, com a pressão oscilando numa faixa de 2 mca para mais ou para menos em relação à média, com exceção da pressão coletada às 8h, que registrou 44,54 mca.

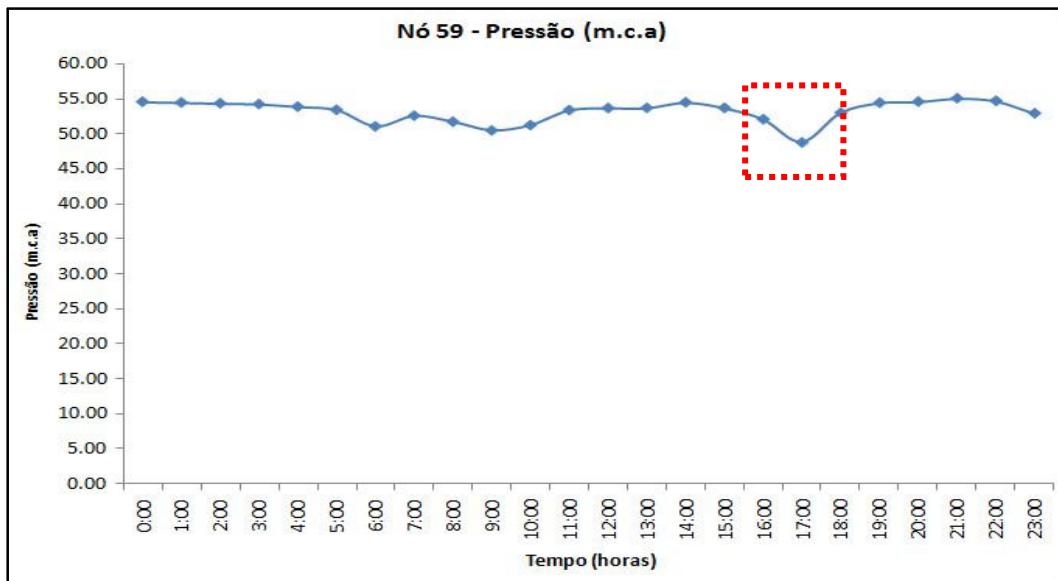
Figura 5.12 – Comportamento da pressão ao longo de 24 horas no Nô 31



A Figura 5.13 apresenta o comportamento no Nô 59, que pertence a 2^a região da rede hidráulica monitorada (altitudes de média para baixa). No período das 16h às 18h

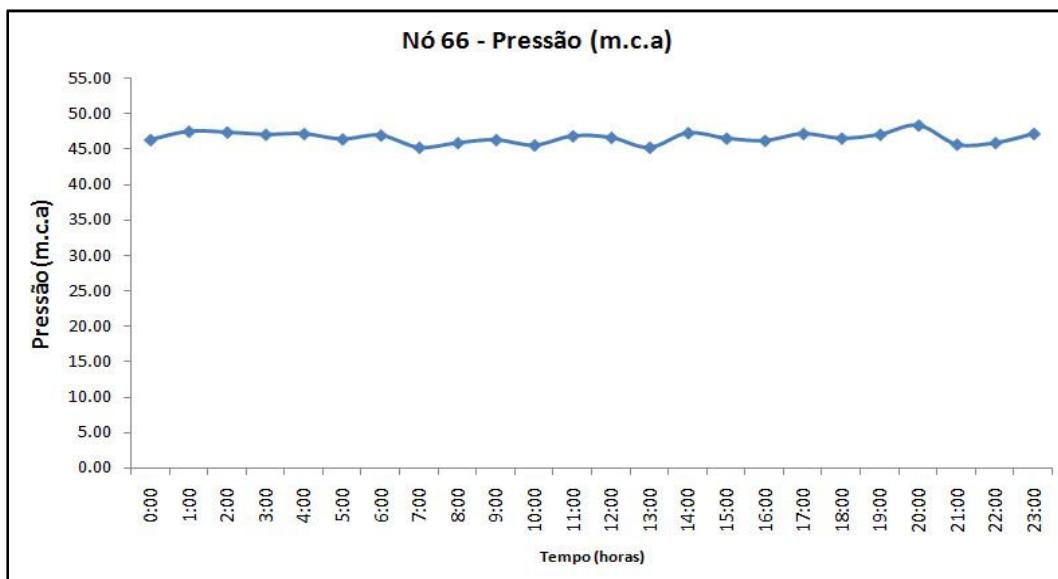
apresenta uma queda da pressão. Essa baixa pode estar relacionada com o aumento da demanda, pois a área de influência do nó reúne um grande número de residências.

Figura 5.13 – Comportamento da pressão ao longo de 24 horas no Nô 59



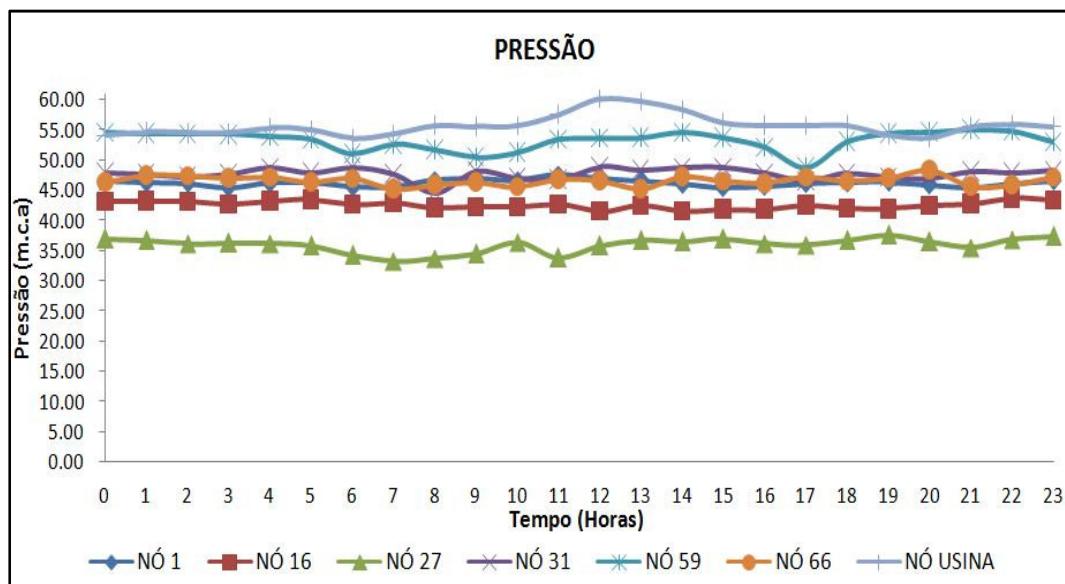
O gráfico da Figura 5.14 representa o último nó monitorado dentre os pontos selecionados para formar o conjunto de variáveis de estado (pressão) que irão compor o arquivo de entrada do programa LenhsCalibra. O nó 66 apresentou um comportamento considerado normal, onde a demanda residencial não alterou o comportamento da pressão. Essa região tem baixo adensamento populacional.

Figura 5.14 – Comportamento da pressão ao longo de 24 horas no Nô 66



O gráfico da Figura 5.185 representa o comportamento dos pontos de monitoramento da pressão no período de 24 horas. Pode-se observar que a rede em estudo apresenta um comportamento estável, com elevada pressão. Ficou evidente a influência da altitude do reservatório, apoiado com altura de 45 metros. Todos os gráficos em observação geral têm forma retilínea, o que demonstra estabilidade operacional. A faixa de pressão na rede varia de 35 a 60 mca. O nó 27 foi o que registrou as menores pressões, pelo fato de se localizar na parte alta da comunidade. Já os nós 59 e Usina registraram-se as maiores pressões, pois se encontram em cotas inferiores. Os demais registram pressões medianas em relação aos anteriores.

Figura 5.15 – Comportamento da pressão ao longo de 24 horas nos pontos monitorados



5.2.2 Vazão do Sistema

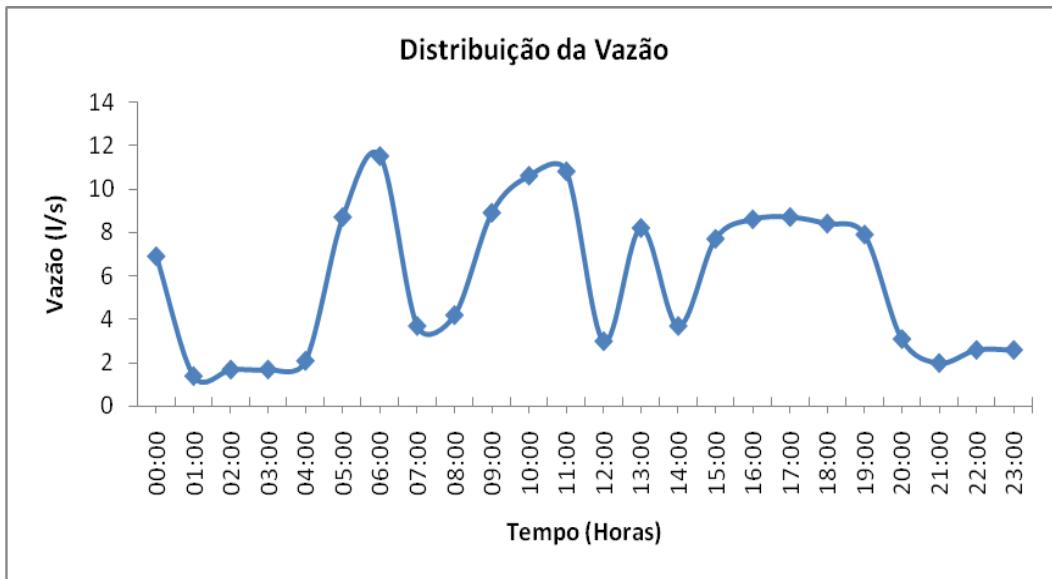
O gráfico da Figura 5.16

Figura 5.16 representa a variação da vazão na saída do reservatório durante 24 horas. Observa-se que a vazão não apresenta o padrão residencial, este fato está relacionado ao consumo da indústria de processamento de biodiesel da Petrobras, que possui bastante influência na demanda total, além de operar no período noturno.

No período de 1h às 4h o consumo se mantém praticamente constante. Às 12h, horário que a literatura e os técnicos consideram que possui um elevado consumo residencial, a rede em estudo apresentou um dos menores consumos medidos, provavelmente devido à paralisação de alguns setores e o processamento para o almoço

dos funcionários da usina. De maneira geral, o período em que começa a aumentar o consumo está compreendido entre 5h e 19h. Logo, conclui-se que o perfil da demanda total não é residencial.

Figura 5.16 – Distribuição da vazão de saída do reservatório para um período de 24 horas



5.3 Comparação entre Dados Coletados e Dados Simulados

5.3.1 Pressão Estática

O gráfico da Figura 5.17 e a Tabela 5.1 mostram um comparativo entre as pressões medidas às 12h e as simuladas (baseadas na demanda real e na demanda projetada) sem calibração, ambas estáticas. Pode-se observar que as pressões simuladas e medidas apresentam a mesma tendência para todos os nós. Essa proximidade aponta que os dados inseridos no modelo estão coerentes com a realidade, e que a distribuição das demandas é aceitável, pois a pressão está relacionada com a demanda.

Figura 5.17 – Comparativo das pressões simuladas e medidas antes da calibração

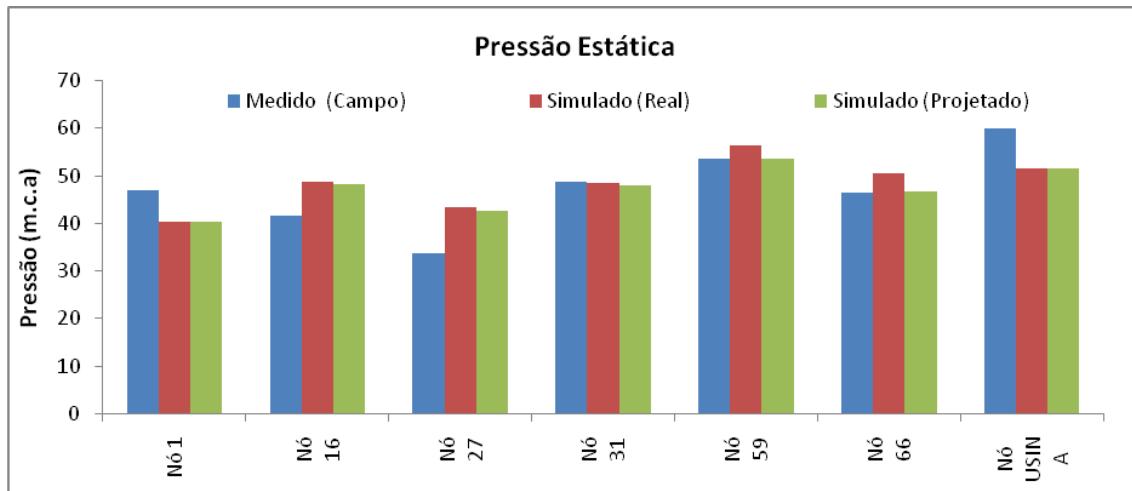


Tabela 5.1 – Pressões observadas e simuladas(antes da calibração)

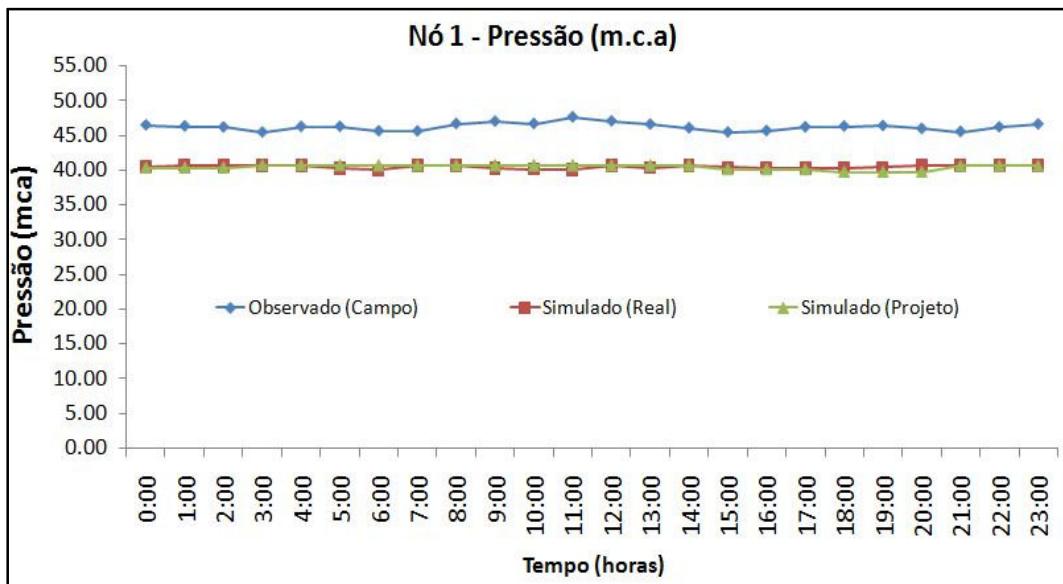
ID Nº	Pressão medida ao meio-dia (mca)	Pressão estática simulada (mca)	Diferença absoluta (mca)
1	47,03	40,41	6,62
16	41,52	48,73	7,21
27	33,79	43,37	9,58
31	48,86	48,58	0,28
59	53,67	56,47	2,80
66	46,62	50,53	3,91
Usina	60,11	51,58	8,53

Baseado nas recomendações do Water Research Centre, que estabelece que a rede hidráulica esteja calibrada quando 100% das medidas de pressão realizadas em campo não ultrapassam ± 2 metros das pressões simuladas, conclui-se que o estado inicial da rede hidráulica não é satisfatório.

5.3.2 Pressão Dinâmica

Os sete gráficos seguintes (Figura 5.18 a Figura 5.24) representam, no que tange aos nós em análise (nós 1, 16, 27, 31, 59, 66 e Usina), a junção dos dados de pressões medidas *in loco* com os dados de pressões simuladas com base nas demandas de projeto e no histórico do consumo do ano 2012.

Figura 5.18 – Comportamento das pressões (medidas e simuladas) no Nô 1



De acordo com a Figura 5.18, as pressões medidas em campo foram superiores às pressões simuladas no modelo, com diferença média de 5 mca. Essa diferença pode ser reflexa de uma maior demanda no período observado. As pressões de campo revelaram-se, ao longo de um determinado caminho, inferiores ao esperado, sendo provável que as demandas para o trecho estejam subdimensionadas no modelo. Caso contrário, as pressões medidas superiores às calculadas indicariam o oposto (Figura 5.19 e Figura 5.20).

Figura 5.19 – Comportamento das pressões (medidas e simuladas) no Nô 16

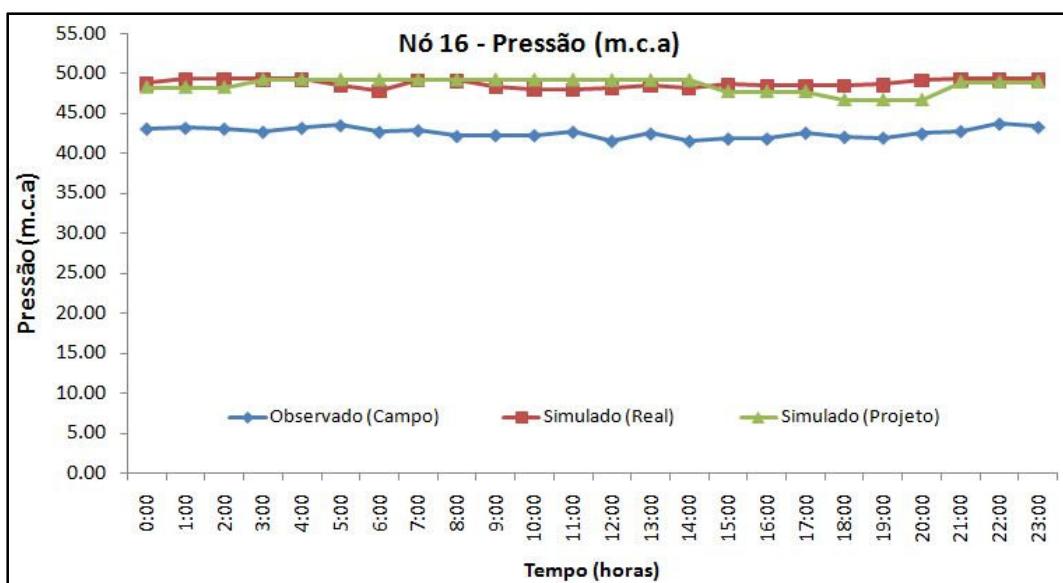
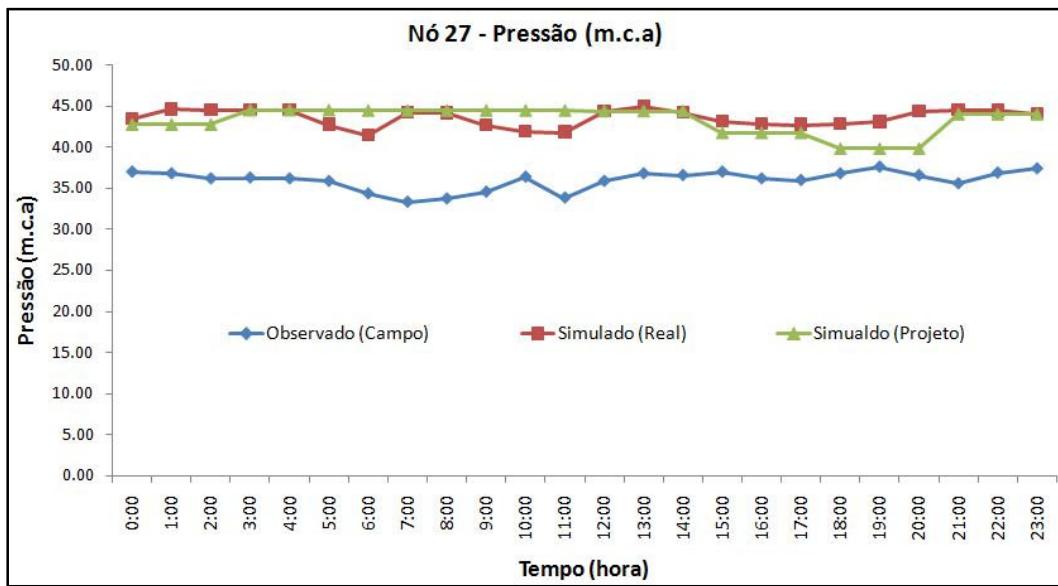


Figura 5.20 – Comportamento das pressões (medidas e simuladas) no Nô 27



De acordo com os gráficos das Figuras 5.21 a 5.23, os nós 31, 59 e 66 apresentaram comportamento diferente em relação aos nós 1, 16 e 27, onde as pressões simuladas ficaram, relativamente, próximas das pressões baseadas nos históricos de consumo e na demanda de projeto.

Figura 5.21 – Comportamento das pressões (medidas e simuladas) no Nô 31

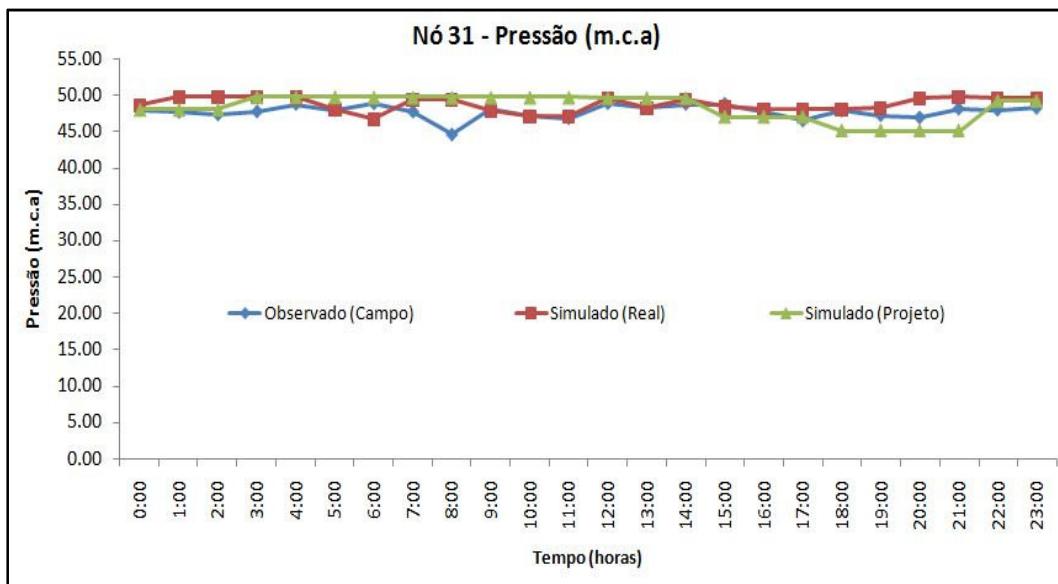


Figura 5.22 – Comportamento das pressões (medidas e simuladas) no Nô 59

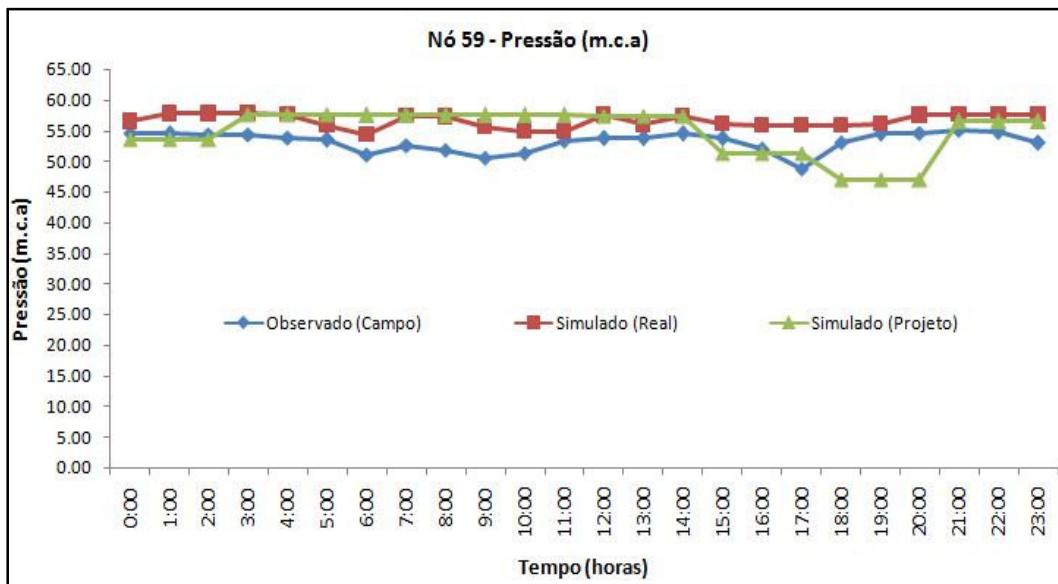
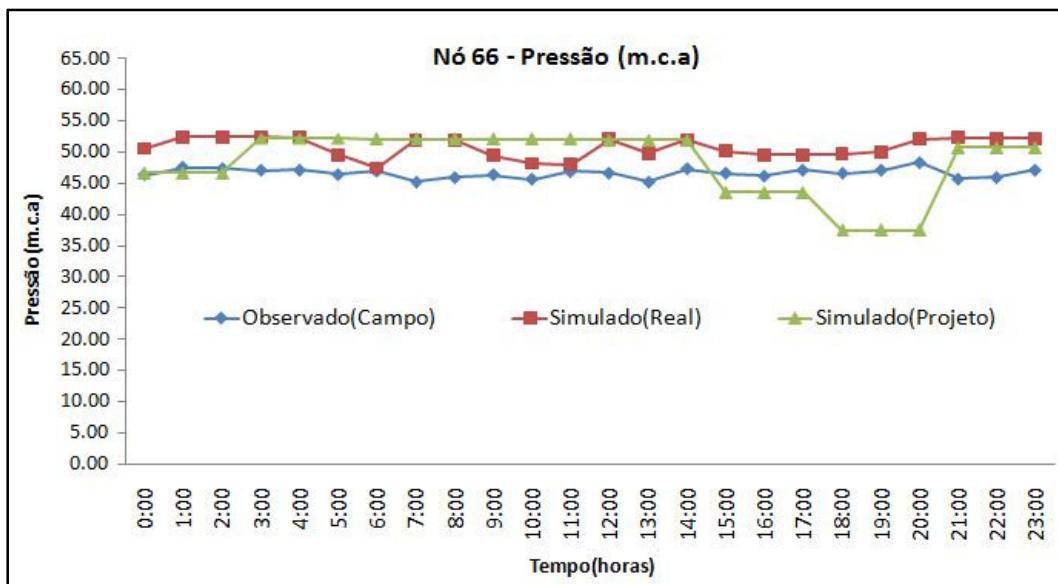
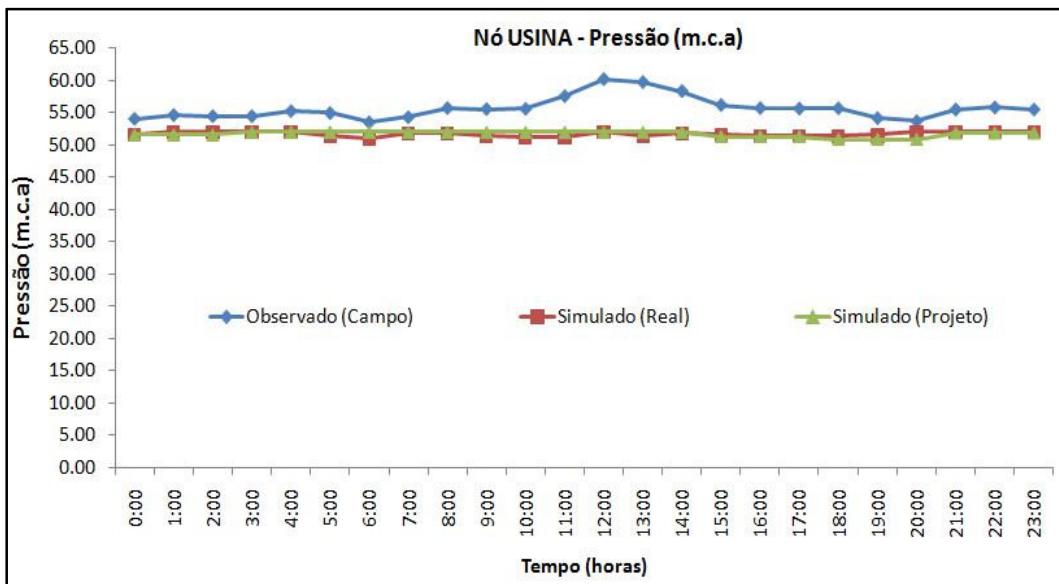


Figura 5.23 – Comportamento das pressões (medidas e simuladas) no Nô 66



O gráfico da Figura 5.24 representa o comportamento das pressões da indústria de processamento de biodiesel, podendo-se observar que as pressões medidas apresentaram valores superiores aos das pressões simuladas. Esse fato pode ser devido a uma menor demanda por parte da usina.

Figura 5.24 – Comportamento das pressões (medidas e simuladas) no Nô Usina



5.3.3 Vazão do Sistema

O gráfico da Figura 5.25 representa a relação das vazões medidas e coletadas, cujo modelo foi desenvolvido utilizando a demanda com base no consumo histórico residencial fornecido pela CAGECE. O uso da demanda baseada no histórico residencial apresentou melhores do que o modelo que adotou a demanda baseada no número populacional projetado para ano 2012 (Tabela 5.2). Neste caso, o modelo utilizando dados projetados foi descartado. O modelo simulado, baseado no consumo real antes mesmo da calibração, concorda com o que é preconizado pelo Water Research Centre (WRC), apresentando um somatório de erro relativo de 0,37 negativos.

Figura 5.25 – Comparação das vazões observadas e simuladas

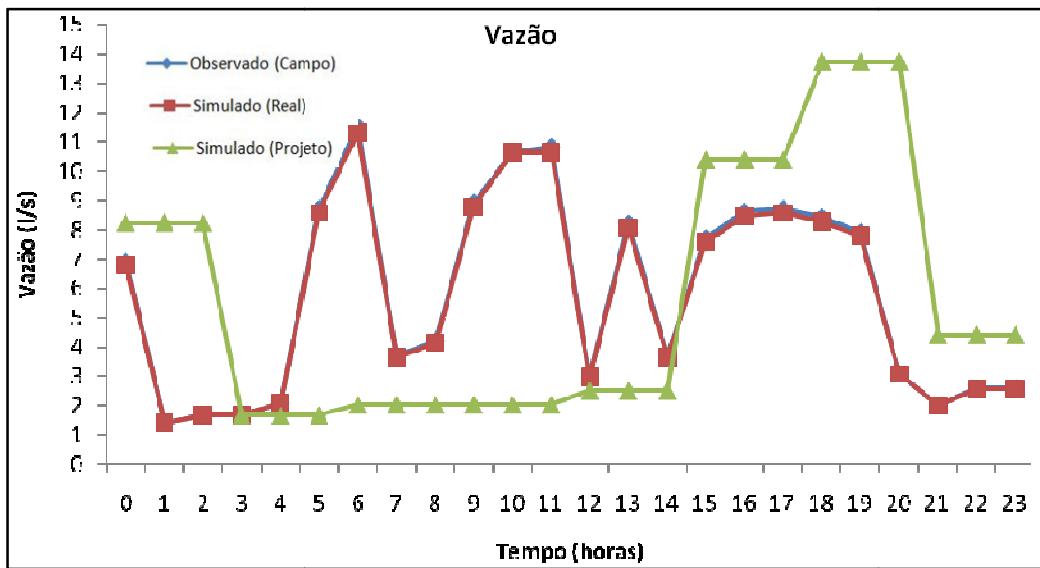


Tabela 5.2 – Comparativo das vazões medidas em campo e simuladas

Tempo (horas)	Medições de campo(l/s)	Simulado (histórico)(l/s)	Erro Relativo (l/s)	Simulado (projeto)(l/s)	Erro Relativo (l/s)
00:00	6,90	6,79	-0,016	8,23	0,19
01:00	1,40	1,38	-0,014	8,23	4,88
02:00	1,70	1,67	-0,018	8,23	3,84
03:00	1,70	1,67	-0,018	1,67	-0,02
04:00	2,10	2,06	-0,019	1,67	-0,20
05:00	8,70	8,56	-0,016	1,67	-0,81
06:00	11,50	11,31	-0,017	2,03	-0,82
07:00	3,70	3,64	-0,016	2,03	-0,45
08:00	4,20	4,13	-0,017	2,03	-0,52
09:00	8,90	8,76	-0,016	2,03	-0,77
10:00	10,60	10,63	0,003	2,03	-0,81
11:00	10,80	10,63	-0,016	2,03	-0,81
12:00	3,00	2,95	-0,017	2,50	-0,17
13:00	8,20	8,07	-0,016	2,50	-0,70
14:00	3,70	3,64	-0,016	2,50	-0,32
15:00	7,70	7,57	-0,017	10,37	0,35
16:00	8,60	8,46	-0,016	10,37	0,21
17:00	8,70	8,56	-0,016	10,37	0,19
18:00	8,40	8,26	-0,017	13,71	0,63
19:00	7,90	7,77	-0,016	13,71	0,74
20:00	3,10	3,05	-0,016	13,71	3,42
21:00	2,00	1,97	-0,015	4,41	1,21
22:00	2,60	2,56	-0,015	4,41	0,70
23:00	2,60	2,56	-0,015	4,41	0,70
Somatório	138,7	136,65	-0,37	41,88	3,70

5.4 Calibração do Modelo com o LenhsCalibra

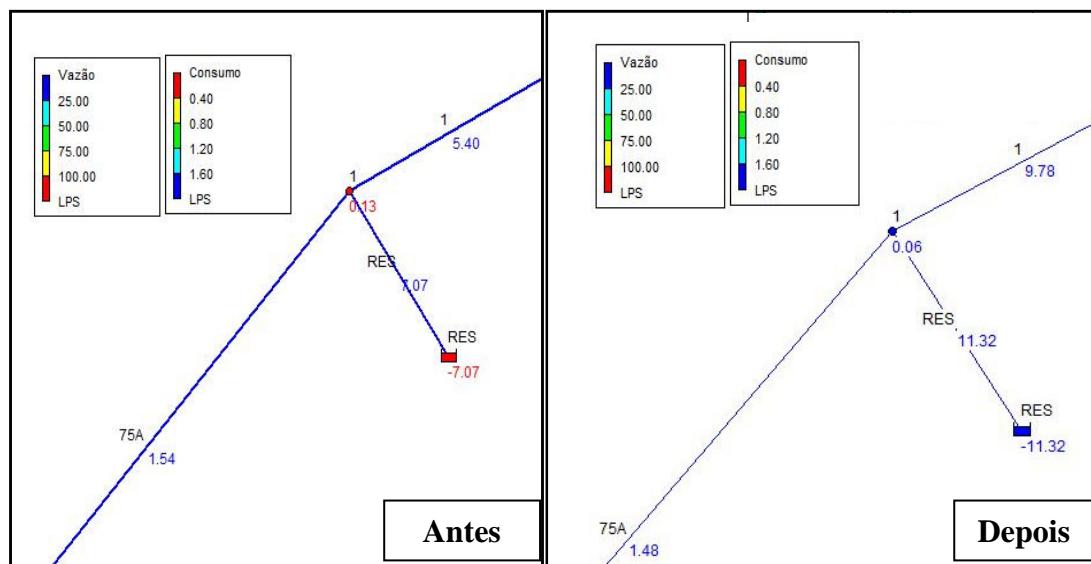
Para se considerar um sistema de distribuição de água calibrado, um modelo deverá simular adequadamente tanto os valores de vazão como os valores de pressão, não sendo suficiente obter bons resultados em apenas uma destas variáveis.

Para a calibração do sistema analisado foram realizadas medições de vazão na saída do reservatório (vazão total do sistema) e monitorados sete pontos de pressão (Figura 4.13). Conforme comentado anteriormente, foi utilizado o *software* de calibração LenhsCalibra, com os parâmetros genéticos ótimos obtidos apresentado na (Tabela 4.5).

5.4.1 Calibração pela Vazão Total do Sistema

Para a convergência da vazão do sistema, considerou-se que os resultados são satisfatório (ver Figura 5.26), pois a vazão medida registrou média de 5,77 L/s, enquanto a vazão simulada resultou no valor de 7,07 L/s, que corresponde a uma diferença de 1,29 L/s. Antes da calibração, o modelo assinalou uma vazão média de 11,32 L/s, que corresponde a 96,2% superior ao valor medido. A diferença após a calibração e atribuída, em tese, às perdas na distribuição nos pontos onde a demanda apresentou uma leve alta.

Figura 5.26 – Simulação da vazão total antes e depois da calibração (l/s)



Um dos principais benefícios da calibração é a análise dos parâmetros calibrados. Como visualizado na Figura 5.27, após o processo de calibração, o programa fez uma boa estimativa dos consumos nodais, principalmente no nó referente à usina (ponto verde da Figura 5.27). O nó Usina possui uma demanda superior às dos demais e apresentou consumo médio de 1,03 L/s, próximo ao que foi registrado no hidrômetro industrial durante o período analisado. Pode-se observar também que foi encontrado um nó com consumo elevado, o que pode significar vazamento, consumo não autorizado ou informado no modelo. Visualizando a operação do sistema, esta demanda não identificada deve ser resultado das descargas realizadas nos registros localizados no final da rede, onde, frequentemente, estes são abertos com o intuito de retirar material depositado na rede (Figura 5.28).

Figura 5.27 – Estimava de consumo após a calibração, utilizando o parâmetro vazão

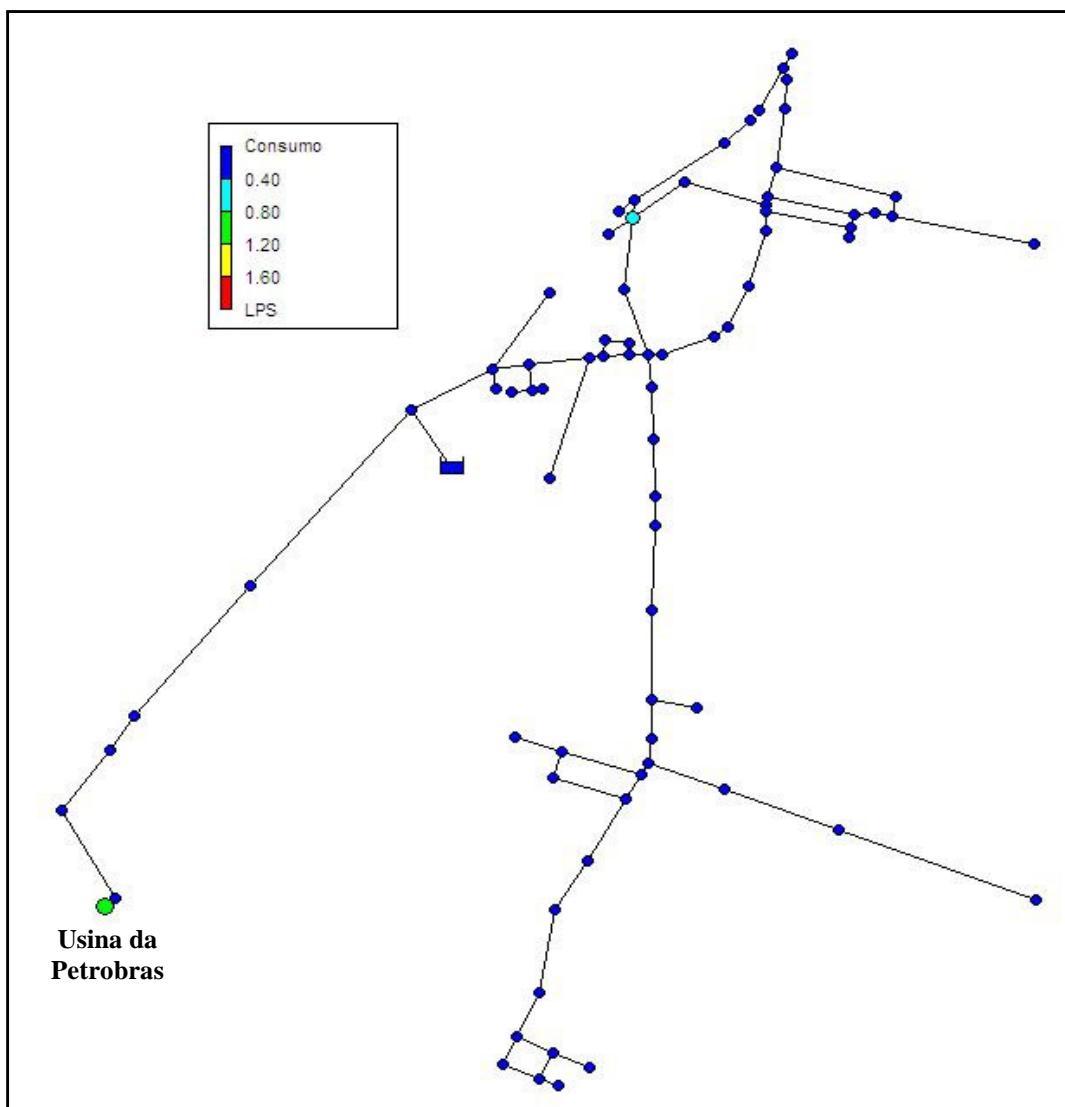


Figura 5.28 – Manobra de descarga na rede de distribuição de água



5.4.2 Análise das demandas e coeficiente C

Nesse procedimento foi utilizado o parâmetro do modelo de calibração a vazão e a rugosidade do tubo, visando à busca de regiões na rede de distribuição que apresentem perdas elevadas.

Observa-se na Figura 5.29 que o consumo estimado através dos parâmetros vazão e rugosidade do tubo foram maiores, apontando para a ocorrência de perdas reais de água na rede de distribuição. A Figura 5.30 representa a rugosidade das tubulações depois do processo de calibração. O calibrador localizou dois registros de descargas, indicando que frequentemente são realizadas limpezas na rede, através desses acessórios. Ficou evidente que essa parte rede é uma área diferenciada e requer investigação para se encontrar ligações clandestinas e vazamentos aparentes.

Figura 5.29 – Estimava dos consumos após a calibração, utilizando os parâmetros vazão e rugosidade das tubulações

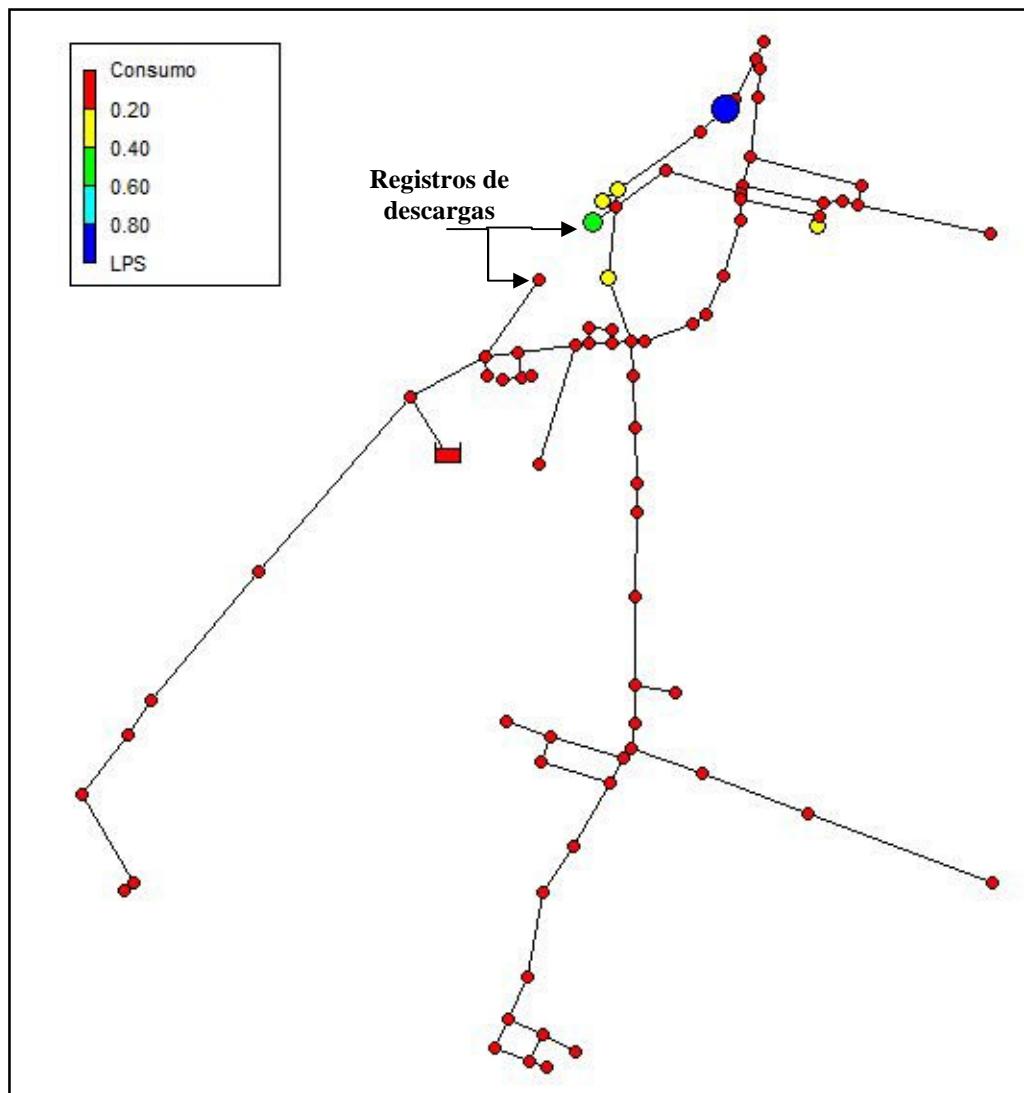
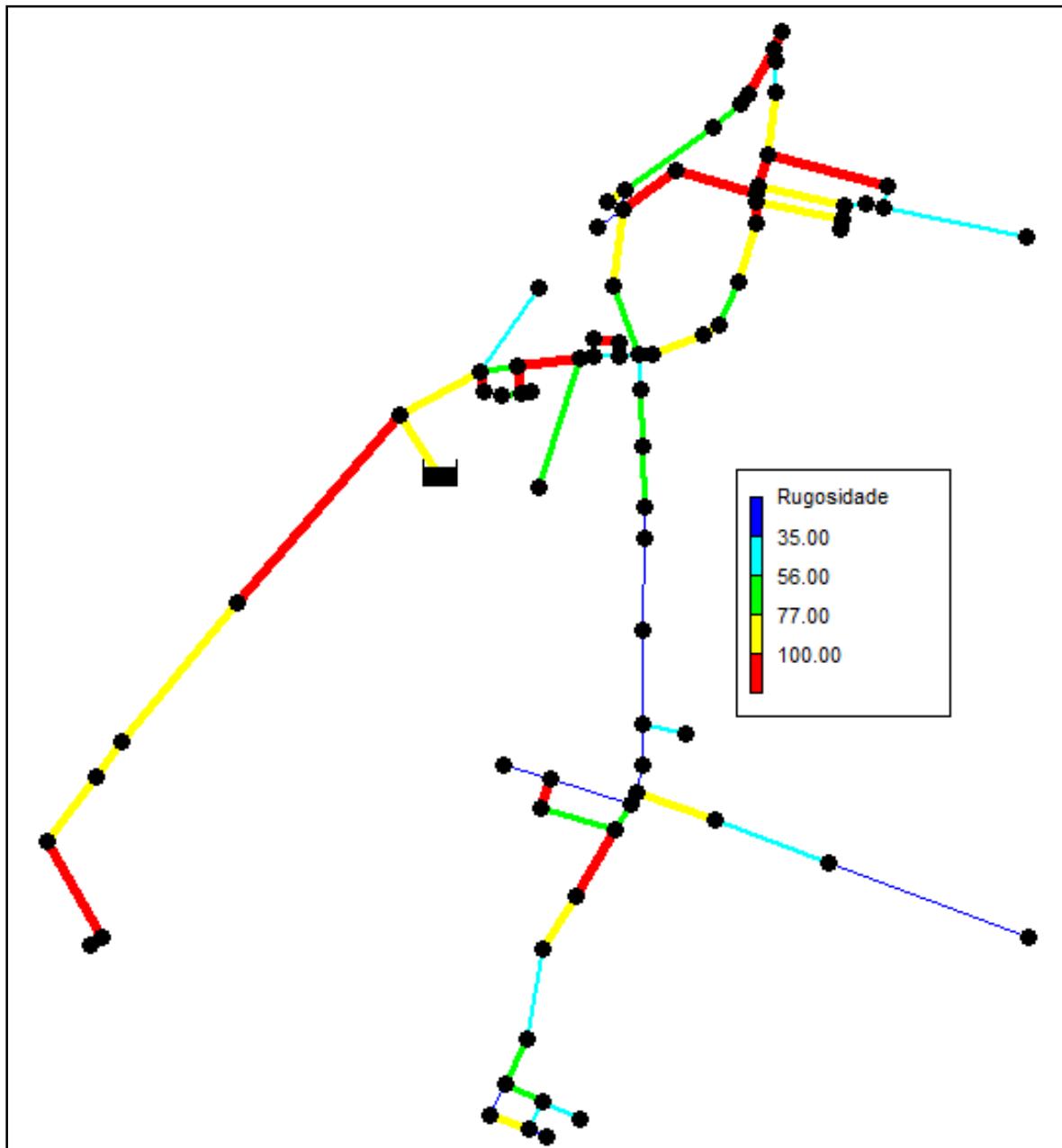


Figura 5.30 – Rugosidade das tubulações após a calibração



5.4.3 Comparativo das Pressões Estáticas

A Figura 5.31 mostra um comparativo das pressões nos pontos críticos identificados anteriormente às 12 horas (meio dia). É possível observar uma queda brusca na pressão após a calibração, o que reafirma a relevância dos pontos citados anteriormente em relação aos demais. As simulações demonstram a dependência da pressão à demanda, como foi identificada na Figura 5.29.

Figura 5.31 – Detalhe das pressões antes e depois da calibração

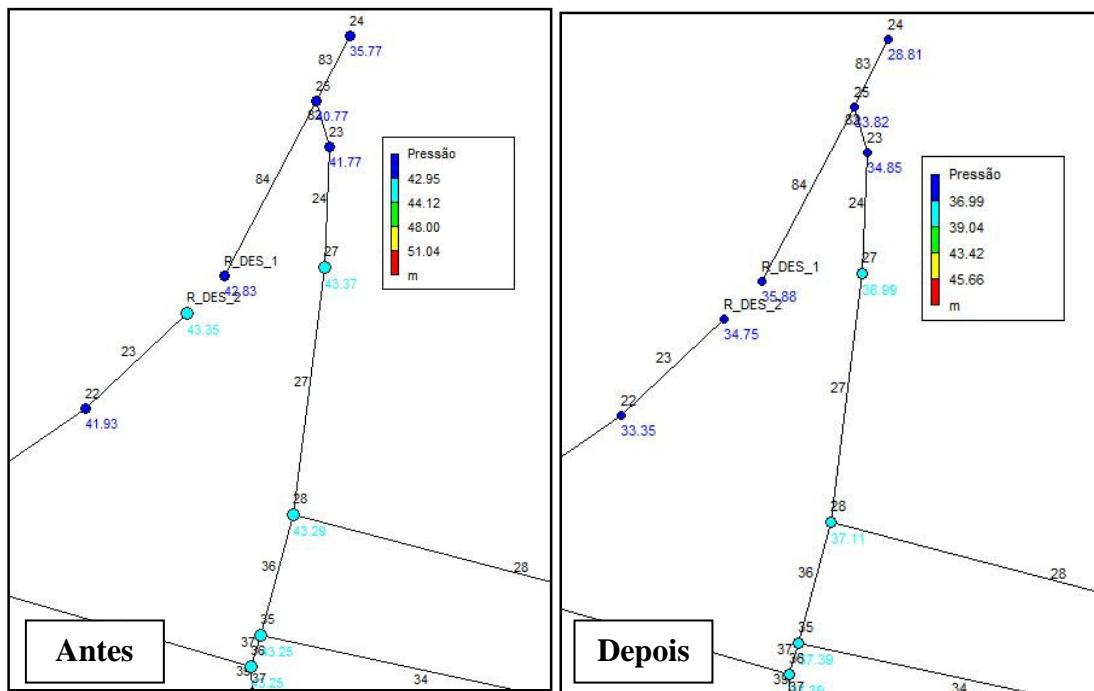
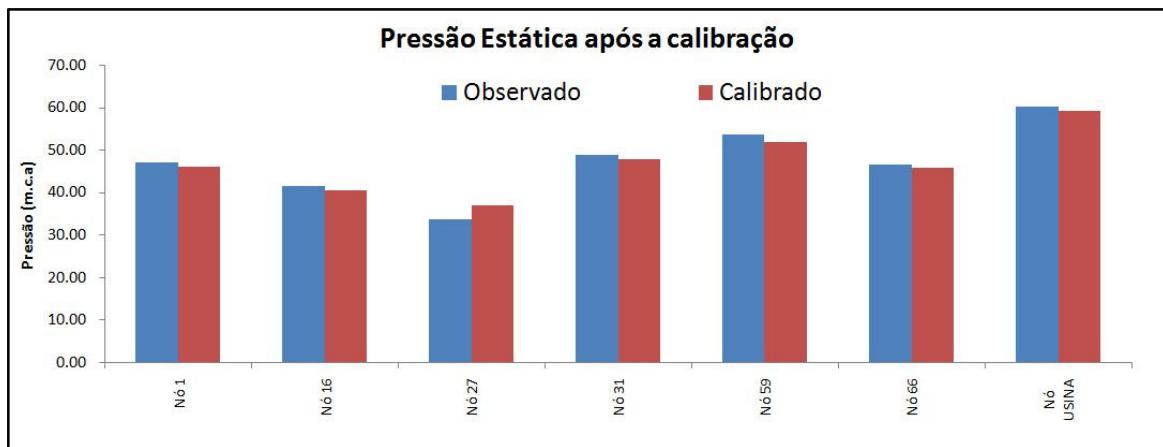


Figura 5.32 – Comparação das pressões estáticas após a calibração



Como podemos observar a Figura 5.33 e Tabela 5.3 que os 6 pontos monitorados ficaram com pressões médias após a calibração utilizando a variável vazão ficou na faixa recomendada pela Water Research Centre. O nó 27 apresentou um diferencial de 3,20 mca simulada (estática) após calibração, fato que pode estar relacionado com as frequentes descargas na rede para limpeza ou as perdas aparentes. A Figura 5.33 representa em planta a região da rede que foi identificado pelo modelo calibrado.

As possíveis causas das divergências:

- Descargas na rede de distribuição não informada no Sistema Controle Operacional – SCO;

- Problemas com a medição de dados;
- Ligações clandestinas ou by-pass, submedição dos hidrômetros nas residências na região do ponto monitorado. Nesta área de acordo cadastro técnico da rede, existem algumas ligações inativas.

Tabela 5.4 – Pressões observadas e calibradas

ID Nó	Pressão medida ao meio-dia (mca)	Pressão estática apó s a calibração (mca)	Diferença absoluta (mca)
1	47,03	46.00	1.03
16	41,52	40.42	1.10
27	33,79	36.99	(+3.20)
31	48,86	47.86	1.00
59	53,67	51.92	1.75
66	46,62	45.92	0.70
Usina	60,11	59.25	0.86

Figura 5.34 – Representação em planta da área critica identificada pelo modelo



6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho de pesquisa realizou a modelagem de um sistema de distribuição de água de Quixadá com intuito de identificar pontos (regiões) que podem conter perdas reais de água significativas. Para calibrar e identificar essas regiões foi utilizado o LenhsCalibra, que utiliza como ferramenta de busca os algoritmos genéticos.

As simulações adotaram dois padrões de demandas: a demanda baseada no histórico de consumo residencial do ano de 2012 e a demanda baseada na projeção populacional para ano de 2012, conforme dados do IBGE. Os dados de consumo residencial apresentaram melhores resultados em relação à demanda projetada.

A rede de distribuição de água em questão apresentou pressões excessivas para alguns pontos monitorados, contrariando a NBR 12218, fato que gera um aumento do consumo residencial induzido e das perdas reais. A técnica de modelagem e calibração apresentou muitas dificuldades no momento de coleta das informações em campo, devido falta de equipamentos de medições para coletar dados de pressão e vazão simultaneamente, essa situação prejudica a precisão dos resultados calibrados.

De modo geral, o estudo possibilitou elencar as seguintes conclusões:

- Os dados básicos georreferenciados facilitam a modelagem, pois as imagens de satélite fornecem o caminhamento das vias públicas, tipos de consumidores (residência, prédio etc.) e as cotas topográficas.
- O índice de perdas de faturamento do sistema de abastecimento de água é baixo e não reflete a realidade, pois a política de taxação interfere no consumo faturado, onde a maioria dos clientes é de baixa renda e os consumos reais mensais são inferiores ao valor mínimo cobrado (10 m^3).
- A rede em estudo apresentou pressões excessivas em todos os pontos monitorados. Recomenda-se a instalação de uma válvula redutora de pressão na saída do reservatório.
- O processo de calibração alterando o parâmetro vazão com intuito de identificar no modelo pontos com alta de demanda identificou dois pontos: o ponto USINA que realmente consome grande quantidade de água no processo industrial e outro ponto próximo uma descarga de rede que serve para limpeza;

- O processo de calibração alterando os parâmetros de vazão e rugosidade do tubo ampliou o número de pontos monitorados que se enquadram nos critérios de calibração.
- A diferença de vazão encontrada na modelagem pode significar perdas no sistema através de vazamentos, submedição e furtos. Esse processo antecipa a identificação de pontos críticos facilitando o trabalho da equipe de campo na atividade de investigação de consumidores irregulares, pois os esforços técnicos serão concentrados nas regiões que o modelo apresentou alta demanda.

Como trabalhos futuros para aprimorar os estudos de modelagem do sistema, recomenda-se:

- Aumentar o número de pontos de monitoramento de vazão e pressão, simultaneamente.
- Inclusão do monitoramento de pressão nos pontos críticos da rede hidráulica.
- Inclusão do monitoramento da vazão no trecho que alimenta a Usina da Petrobras.

7 REFERÊNCIAS

- ALEGRE, H.; BAPTISTA, J. M.; CABRERA JR., E.; CUBILLO, F.; DUARTE, P.; HIRNER, W.; MERKEL, W.; PARENA, R. **Performance indicators for water supply services**. London: International Water Association – IWA, 2000.
- AL-OMARI, A. **A Methodology for the breakdown of NRW into real and administrative losses**. Water Resources Management. v. 27, n. 7, 2013, p. 1913-1930.
- ASHBY, R. G. **Investigation of usage of velocity and pressure data within a water distribution lab model for calibrating hydraulic models**. 2013. Dissertação (Mestrado) - Department of Civil Engineering. University of Kentucky. Kentucky, 2013.
- BEZERRA, S. T. M.; CHEUNG, P. B. **Perdas de água: tecnologias de controle**. João Pessoa: Editora da UFPB, 2013. 220 p.
- CESÁRIO, L. **Modeling, analysis and design of water distribution systems**. American Water Works Association. Denver, 1995.
- CHARALAMBOUS, C.; SETFORD, M. **Maximising the benefits of desalination**. Desalination. v. 138, n. 1-3, 2001, p. 41-46.
- CHARALAMBOUS, S.; ISAIA, M. **Leakage reduction by innovative pressure regulation and control**. In: Proceedings of the 5th MEDIWAT Meeting and Steering Committee Meeting. Chania, Crete (Greece).
- COELHO, S. T.; LOUREIRO, D.; ALEGRE, H. **Modelação e análise de sistemas de abastecimento de água**. Instituto Regulador de Águas e Resíduos (IRAR) e Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 2006.
- CORRIJO, I. B.; FORMIGA, K. T. M.; SIGUEIRA, E. Q. **Uso de modelos/software de análise de rede: Nível 2**. ReCESA, 2008, 112 p.
- CROSS, H. **Analysis of flow in networks of conduits or conductors**. University of Illinois, 1936.

DI NARDO, A.; DI NATALE, M.; SANTONASTASO, G. F.; TZATCHKOV, V. G.; ALCOCER-YAMANAKA, V. H. **Water network sectorization based on a genetic algorithm and minimum dissipated power paths.** Water Science & Technology: Water Supply. v. 13, n. 4, 2013, p. 951-957.

DINIZ, A. R. S.; DALFRÉ FILHO, J. G. **Physical loss evaluation in water distribution systems in the metropolitan region of São Paulo, Brazil.** Water Resources Management VII. v. 171, 2013, p. 356-366.

ESTAPÉ, G. S. **Demand modelling and calibration for hydraulic network models.** Tese (Doutorado). UniversitatPolitecnica de Catalunya. Catalunya, Espanha, 2013.

FARIA, S. H.; CALIJURI, M. L.; OLIVEIRA, J. C. **Uso de softwares gratuitos (SPRING e EPANET) na simulação de pressão e vazão de uma rede de abastecimento de água.** In: Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Natal: Inpe, 2009. p. 3729-3735.

FARLEY, M. **Leakage management and control - A best practice training manual.** World Health Organization Geneva. Switzerland, 2001.

FARLEY, M.; WYETH, G.; MD. GHAZALI, Z. B.; ISTANDAR, A.; SINGH, A. **The manager'snon-revenue water handbook - A guide to understanding water losses.** United States Agency for International Development (USAID). 2008.

FERNANDES, N.; MARQUES, G. **Integration of GIS and hydraulic modeling to evaluate the cost of ecological stream flow recovery in Irapé Dam, Brazil.** World Environmental and Water Resources Congress. 2011, p. 4162-4171.

GANORKAR, R. A.; RODE, P. I.; DESHMUKH, S. A.; DHOBLE, R. M. **Water Audit - A tool for assessment of water losses.** International Journal of Computational Engineering Research. v. 3, n. 3. p. 252-256.

GIUSTOLISI, O.; BERARDI, L.; LAUCELLI, D. **Modeling local water storages delivering customer demands in WDN models.** Journal of Hydraulic Engineering. v. 140, n. 1, 2014, p. 89-104.

GOLDBERG, D. E. **Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning**. Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Mass. 1989.

GOMES, A. S. (Org.). **Guias práticos: técnicas de operação em sistemas de abastecimento de água**. Brasília: SNSA, 2007.

GOMES, H. P. **Sistemas de abastecimento de água - Dimensionamento econômico e operação de redes e elevatórios**. 3^a ed. João Pessoa: Editora UFPB, 2009, 277 p.

GOMES, H. P.; CARVALHO, P. S. O.; SALVINO, M. M.; TORRES, J. B.; DELGADO, M. A. B. **Metodologia avançada para a reabilitação de redes de abastecimento – Estudo de caso – Complexo lagunar da cidade de Maceió/AL**. In: Anais do 27º CBESA - Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Goiânia, 2013.

GONÇALVES, E. **Metodologias para controle de perdas em sistemas de distribuição de água – Estudo de casos da CAESB**. 1998. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília. Brasília, 1998.

GONÇALVES, E.; ITONAGA, L.C. **Controle de perdas em sistemas de água**. Caderno do Profissional em Capacitação da Oficina do Núcleo Regional Centro-Oeste de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília. Brasília, 2007.

GULARTE, C. B. **Um estudo sobre a submedição em hidrômetros para aplicação no controle de perdas aparentes no sistema de abastecimento de água de Blumenau**. 2005. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005, 138 p.

HAIDER, H.; SADIQ, R.; TESFAMARIAM, S. **Performance indicators for small-andmedium-sizedwatersupply systems: A review**. School of Engineering, The University of British Columbia Okanagan. Canada, 2013.

HAMAM, Y. M.; BRAMELLER, A. **Hybrid method for the solution of piping networks**. Proceedings IEE. v. 118, n. 11, 1971, p. 1607-1612.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems**. The University of Michigan Press. Ann Arbor, 1975.

HUTTON, C.; KAPELAN, Z.; VAMVAKERIDOU-LYROUDIA, L.; SAVIĆ, D. **The Application of Formal and Informal Bayesian Methods for Water Distribution Hydraulic Model Calibration**. Journal of Water Resources Planning and Management. 2013.

JANSEN, L.; PADE, J. **Global unique solvability for a quasi-stationary water network model**. 2013. Disponível em <<http://www2.mathematik.hu-berlin.de>>.

JIANG, B.; ZHANG, R.; GAO, J.; ZHAO, H.; ZHANG, B. **A case study on hydraulic model setup and calibration of water distribution system in a city of north China**. Proceedings of the International Conference on Pipelines and Trenchless Technology - ICPTT 2012. 2012, p. 502-511.

KANAKOUDIS, V.; MUHAMMETOGLU, H. **Urban water pipe networks management towards non-revenue water reduction: Two case studies from Greece and Turkey**. CLEAN – Soil, Air, Water. 2013.

KANAKOUDIS, V.; TSITSIFLI. S. **Using the bimonthly water balance of a non-fully monitored water distribution network with seasonal water demand peaks to define its actual NRW level: The case of Kos town, Greece**. Urban Water Journal. 2013.

KOPPEL, T.; VASSILJEV, A. **Calibration of water distribution network for BWCN**. Water Distribution Systems Analysis 2010. 2011, p. 1599-1609.

KRAJNÁK, M. **Possibilities of using the genetic algorithms to solve optimization tasks in construction projects**. International Symposium Computational Civil Engineering – CCE 2012. Iasi, Romania, 2012.

LAMBERT, A. O.; HIRNER, W. **Losses from water supply systems: standard terminology and recommended performance measures**. London: International Water Association – IWA, 2000.

MARTINS, C. P. F. **Balanço Hídrico e indicadores de desempenho no subsistema de abastecimento de água de São João de Lobrigos – Santa Marta de Penaguião.** 2009. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Vila Real, Portugal, 2009. 109 p.

MASIA, O.; ERASMUS, L. **A study into the implementation of water conservation/water demand management in Gauteng municipalities.** Proceedings of the PICMET '13 Technology Management in the IT-Driven Services (PICMET). San Jose, CA, USA, 2013, p. 2660-2673.

McILROY, M. S. **Direct reading eletricanalizer for pipeline networks.** Journal of the American Water Works Association. 1950, p. 347-365.

MELIA, D.M.; REY, P. L. I.; SOLANO, F. J. M.; MIGUEL, V. S. F. **Design of water distribution networks using a pseudo-genetic algorithm and sensitivity of genetic operators.** WaterResources Management. v. 27, n. 12, 2013, p. 4149-4162.

MORAES, H. T.; GOMES, A. S.; JEROZOLIMSKI, T. **Perdas aparentes em sistemas de abastecimento de água: Estruturação dos meios para seu combate.** In: Anais do 24º CBESA - Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Belo Horizonte, 2007.

MOTTA, R. G. **Importância da Setorização adequada para combate às perdas reais de água de abastecimento público.** 2010. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010, 176 p.

NICOLINI, M. **Pareto geneticalgorithms for multi-objective design ofwaterdistribution systems.** Applied Mechanics and Materials. v. 212-213, 2012, p. 664-670.

NICOLINI, M.; PATRIARCA, A. **Model calibration and system simulation from real time monitoring of water.** In: Proceedings of the 3º International Conference on Computer Research And Development. v. 1, Shanghai, China, 2011, p. 51-55.

NICOLINI, M.; GIACOMELLO, C.; DEB, K. **Calibration and optimal leakage management for a real water distribution network.** Journal of Water Resources Planning and Management. v. 137, n. 1, 2011, p. 134–142.

OLAIA, A. I. S. **Gestão de sistemas de abastecimento de água através de modelação hidráulica**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, Portugal, 2012.

ORMSBEE, L.E.; LINGIREDDY, S. **Calibrating hydraulic network models**. Journal American Water Works Association. v. 89, n. 2, 1997, p. 42-50.

OSIADACZ, A. J. **Simulation and analysis of gas networks, gulf publishing company**. Book Division. Houston, TX, Estados Unidos, 1987.

OSTFELD, A. et al. **The battle of the water calibration networks (BWCN)**. Journal of Water Resources Planning and Management. v. 137, n. 4. 2011, p. 1-34.

OSTFELD, A., OLICKER, N., AND SALOMONS, E. **Multi-objective optimization for least cost design and resiliency of water distribution systems**. Journal of Water Resources Planning and Management. 2013.

PADILHA, P. A. A. **Algoritmos genéticos aplicados a um comitê de LS-SVM em problemas de classificação**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2013.

PIZZO, H. S. **Calibração de modelos de distribuição de água através do acoplamento do TMA com o otimizador de Nelder-Mead**. 2004. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2004, 144 p.

QUEVEDO, J.; PÉREZ, R.; PASCUAL, J.; PUIG, V.; CEMBRANO, G.; PERALTA, A. **Methodology to detect and isolate water losses in water hydraulic networks: Application to Barcelona water network**. In: Proceedings of the International Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technica - 8th SAFEPROCESS 2012. México City: IFAC, 2013, p. 922-927.

REGO, A. A. C. **Integração de ferramentas SIG para a optimização sistema adutor com recurso ao Epanet**. 2007. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Porto, Portugal, 2007. 135 p.

ROCHA, V. A. G. M.; COSTA, M. G. C.; CASTRO, M. A. H. **Calibração de coeficientes de rugosidade de redes de distribuição de água usando o método iterativo do gradiente hidráulico alternativo (MIGHA)**. In: Anais do 25º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Recife, 2009.

SALGADO, R.; TODINI, E.; O'CONNELL, P. E. **Extending the gradient method to include pressure regulating valves in pipe networks**. In: Proceedings of the International Symposium on Computer Modeling of Water Distribution Systems, University of Kentucky. Kentucky, 1988.

SALVINO, M. M. **Modelagem computacional visando a reabilitação de redes hidráulicas**. 2012. Tese (Doutorado) - Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2012. 166 p.

SALVINO, M. M.; GOMES, H. P.; CARVALHO, P. S. O.; COSTA FILHO, A. C.. **LenhsCalibra: Modelo de calibração multivariada de redes de abastecimento de água**. In: 27º CBESA - Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Goiânia, 2013.

SANTOS, A. C. N. **Estudo de calibração de uma rede de distribuição de água de Itajubá-MG utilizando os algoritmos genéticos**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2010. 72 p.

SHEN, H.; McBEAN, E. **Hydraulic calibration for a small water distribution network**. WaterDistribution Systems Analysis 2010. 2011, p. 1545-1557.

SILVA, A. C. A. **Calibração automática de rugosidades de tubulações em sistemas de distribuição de água com aplicação de algoritmos genéticos**. 2006. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2006.

SILVA, J. H. F. **Exploração das potencialidades do programa Epanet na simulação hidráulica de sistemas de abastecimento de água**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2008. 76 p.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2010**. Brasília, 2013.

STOKES, J. R.; HORVATH, A.; STURM, R. **Water loss control using pressure management: Life-cycle energy and air emission effects.** Environmental Science & Technology. v. 47, n. 19, 2013, p. 10771-10780.

SURYAPRAKASAM, M. V., REID, G. W., GEYER, J. C. **Use of alternating current network calculator in distribution systems design.** Journal of the American Water Works Association, 1950, p. 1154-1164.

TAKAHASHI, S.; SALDARRIAGA, J. G.; VEGA, M. C.; HERNÁNDEZ, F. **Water distribution system model calibration under uncertainty environments.** Water Science & Technology: WaterSupply – WSTWS. v. 10, n. 1, 2010, p 31-38.

TARDELLI FILHO, J. **Controle e redução de perdas.** In: Abastecimento de Água. TSUTIYA, M.T. (org.). 2^a ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

TODINI, E.; PILATI, S. **A gradient method for the analysis of pipe networks.** Proceeding of the International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution, Leicester Polytechnic. 1987.

WALSKI. T. M. **Case study: Pipe network model calibration issues.** Journal of Water Resources Planning and Management. v. 112, n.2, 1986, p. 238-248.

WATER RESEARCH CENTRE (WRC). **Network analysis – A code for practice.** Published by WRC. Swindon, UK, 1989.

WEGELIN, W. A.; JACOBS, H. E. **The development of a municipal water conservation and demand management strategy and business plan as required by the Water Services Act, South Africa.** Water SA. v. 39, n. 3, 2013, p. 415-422.

WU, Z.; WALSKI, T. **Effective approach for solving battle of water calibration network problem.** Journal of Water Resources Planning and Management. v. 138, n. 5, 2012, p. 533-542.

YAZBEK FILHO, V. D. **Minimização de perdas físicas em redes de distribuição de água com a utilização de algoritmos genéticos.** 2003. Dissertação (Mestrado) -

Departamento de Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Campo Grande, 2003. 76 p.

ZAQUE, R. A. M.; SOARES, A. K.; LIMA, G. A. R. **Influência do número de cenários na calibração de modelos de redes de distribuição de água.** In: XV Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Belo Horizonte, 2012.

ZHANG, W. W.; YU, G. P.; BAI, M. S. **Calibration of hydraulic model in real-life water distribution system.** Applied Mechanics and Materials. v. 155-156, 2012, p. 285-290.

APÊNDICE A – DEMANDA NOS NÓS

Tabela A1 – Demanda nos nós – Padrão de Consumo 1

Nó	Trechos abrangentes								Demanda (L/s)
	nº	Ext. (m)	nº	Ext. (m)	nº	Ext. (m)	nº	Ext. (m)	
1	1	90,00							0,0684
2	1	90,00	2	100,00	3	20,00	4	36,60	0,1873
3	2	100,00							0,0759
4	3	20,00							0,0152
5	4	36,60	5	26,80	8	61,40			0,0948
6	5	26,80	6	20,00	7	10,00			0,0431
7	6	20,00							0,0152
8	7	10,00							0,0076
9	8	61,40	9	133,00	10	13,74			0,1581
10	9	133,00							0,1010
11	10	13,74	11	16,30	14	25,15			0,0419
12	11	16,30	12	24,70					0,0311
13	12	24,70	13	12,70					0,0284
14	13	12,70	14	25,15	15	18,90			0,0431
15	15	18,90	16	71,50	45	14,20	46	35,00	0,1060
16	16	71,50	17	76,77					0,1126
17	17	76,77	18	30,00	19	64,00	20	18,59	0,1438
18	18	30,00							0,0228
19	19	64,00	38	83,00					0,1116
20	20	18,59	21	20,00	22	106,85			0,1105
21	21	20,00							0,0152
22	22	106,85	23	48,50					0,1180
23	23	48,50	24	68,50					0,0889
24	24	68,50	25	40,00					0,0824
25	25	40,00	26	30,00					0,0532
26	26	30,00							0,0228
27	27	63,00							0,0478
28	27	63,00	28	122,50	36	31,50			0,1648
29	28	122,50	29	20,00					0,1082

Tabela A1 – Demanda nos nós – Padrão de Consumo 1 (continuação)

Nó	Trechos abrangentes								Demanda (L/s)
	nº	Ext. (m)	nº	Ext. (m)	nº	Ext. (m)	nº	Ext. (m)	
30	29	20,00	30	143,50	31	16,50			0,1367
31	30	143,50							0,1090
32	31	16,50	32	21,10					0,0286
33	32	21,10	33	13,50	34	86,90			0,0923
34	33	13,50	35	86,00	74	10,55			0,0836
35	34	86,90	36	31,50	37	8,00			0,0960
36	37	8,00	38	83,00	39	7,37			0,0747
37	35	86,00	39	7,37	40	21,23			0,0870
38	40	21,23	41	60,92					0,0624
39	41	60,92	42	46,85					0,0818
40	42	46,85	43	17,09					0,0486
41	43	17,09	44	53,93					0,0539
42	44	53,93	45	14,20					0,0517
43	46	35,00	47	55,00					0,0684
44	47	55,00	48	60,00					0,0873
45	48	60,00	49	30,00					0,0684
46	49	30,00	50	90,00					0,0911
47	50	90,00	51	92,60					0,1387
48	51	92,60	52	44,20	53	42,00			0,1358
49	52	44,20							0,0336
50	53	42,00	54	26,50					0,0520
51	54	26,50	55	80,00	58	12,67			0,0905
52	55	80,00	56	120,00					0,1519
53	56	120,00	57	210,00					0,2506
54	57	210,00							0,1595
55	58	12,67	59	82,50	61	30,24			0,0952
56	59	82,50	60	48,50	62	29,00			0,1215
57	60	48,50							0,0368
58	61	30,24	63	76,00	64	76,00			0,1384
59	62	76,00	63	76,00					0,0797
60	64	76,00	65	60,00					0,1033

Tabela A1 – Demanda nos nós – Padrão de Consumo 1(continuação)

Nó	Trechos abrangentes								Demanda (L/s)
	nº	Ext. (m)	nº	Ext. (m)	nº	Ext. (m)	nº	Ext. (m)	
61	65	60,00	66	90,00					0,1139
62	66	90,00	67	50,00					0,1063
63	67	50,00	68	40,00	70	33,19			0,0936
64	68	40,00	69	40,00	71	31,00			0,0843
65	69	40,00							0,0304
66	70	33,19	72	40,00					0,0556
67	71	31,00	72	40,00	73	19,00			0,0684
68	73	19,00							0,0144
69	74	10,55							0,0080

APÊNDICE B – DADOS COLETADOS

Tabela B1 – Comportamento da pressão no Nô 1

Data	Hora	Observado (Campo)	Simulado (Real)	Simulado (Projeto)
11/17/2012	0:00	46,5	40,41	40,30
11/17/2012	1:00	46,3	40,65	40,30
11/17/2012	2:00	46,2	40,64	40,30
11/17/2012	3:00	45,4	40,64	40,64
11/17/2012	4:00	46,2	40,63	40,64
11/17/2012	5:00	46,2	40,27	40,64
11/17/2012	6:00	45,6	40,00	40,63
11/17/2012	7:00	45,6	40,58	40,63
11/17/2012	8:00	46,7	40,56	40,63
11/17/2012	9:00	47,0	40,25	40,63
11/17/2012	10:00	46,7	40,10	40,63
11/17/2012	11:00	47,6	40,08	40,63
11/16/2012	12:00	47,0	40,61	40,62
11/16/2012	13:00	46,6	40,31	40,62
11/16/2012	14:00	46,1	40,58	40,62
11/16/2012	15:00	45,4	40,35	40,10
11/16/2012	16:00	45,6	40,28	40,10
11/16/2012	17:00	46,2	40,27	40,10
11/16/2012	18:00	46,3	40,29	39,72
11/16/2012	19:00	46,4	40,33	39,72
11/16/2012	20:00	45,9	40,6	39,72
11/16/2012	21:00	45,5	40,63	40,55
11/16/2012	22:00	46,2	40,62	40,55
11/17/2012	23:00	46,6	40,62	40,55

Tabela B2 – Comportamento da pressão no Nô 16

Data	Hora	Observado (Campo)	Simulado (Real)	Simulado (Projeto)
21/08/2012	0:00	43,08	48,73	48,3
21/08/2012	1:00	43,19	49,27	48,3
21/08/2012	2:00	43,08	49,26	48,3
21/08/2012	3:00	42,67	49,26	49,25
21/08/2012	4:00	43,19	49,24	49,25
21/08/2012	5:00	43,50	48,43	49,25
21/08/2012	6:00	42,67	47,84	49,23
21/08/2012	7:00	42,87	49,12	49,23
21/08/2012	8:00	42,14	49,07	49,23
21/08/2012	9:00	42,25	48,39	49,23
21/08/2012	10:00	42,25	48,04	49,23
21/08/2012	11:00	42,67	48,00	49,23
21/08/2012	12:00	41,52	48,18	49,19
21/08/2012	13:00	42,46	48,52	49,19
21/08/2012	14:00	41,52	48,12	49,19
21/08/2012	15:00	41,83	48,60	47,76
21/08/2012	16:00	41,83	48,45	47,76
21/08/2012	17:00	42,56	48,43	47,76
21/08/2012	18:00	42,04	48,48	46,71
21/08/2012	19:00	41,94	48,57	46,71
21/08/2012	20:00	42,46	49,17	46,71
21/08/2012	21:00	42,77	49,21	48,98
21/08/2012	22:00	43,71	49,21	48,98
21/08/2012	23:00	43,29	49,21	48,98

Tabela B3 – Comportamento da pressão no Nô 27

Data	Hora	Observado (Campo)	Simulado (Real)	Simulado (Projeto)
26/08/2012	0:00	36,56	43,37	42,74
26/08/2012	1:00	36,77	44,54	42,74
26/08/2012	2:00	36,67	44,51	42,74
26/08/2012	3:00	36,26	44,51	44,50
26/08/2012	4:00	36,98	44,46	44,50
26/08/2012	5:00	36,98	42,72	44,50
26/08/2012	6:00	35,84	41,44	44,46
26/08/2012	7:00	35,64	44,21	44,46
26/08/2012	8:00	33,58	44,11	44,46
26/08/2012	9:00	34,20	42,64	44,46
26/08/2012	10:00	33,07	41,89	44,46
26/08/2012	11:00	35,33	41,79	44,46
26/08/2012	12:00	33,79	44,34	44,39
26/08/2012	13:00	35,95	44,91	44,39
26/08/2012	14:00	34,71	44,21	44,39
26/08/2012	15:00	35,02	43,1	41,74
6/08/2012	16:00	34,71	42,76	41,74
26/08/2012	17:00	34,30	42,72	41,74
26/08/2012	18:00	35,64	42,84	39,81
26/08/2012	19:00	35,64	43,03	39,81
26/08/2012	20:00	36,26	44,32	39,81
26/08/2012	21:00	35,54	44,48	44,01
26/08/2012	22:00	35,95	44,40	44,01
26/08/2012	23:00	36,26	44,03	44,01

Tabela B4 – Comportamento da pressão no Nô 31

Data	Hora	Observado (Campo)	Simulado (Real)	Simulado (Projeto)
11/26/2012	0:00	47,90	48,58	47,97
11/26/2012	1:00	47,66	49,74	47,97
11/26/2012	2:00	47,30	49,71	47,97
11/26/2012	3:00	47,71	49,71	49,70
11/26/2012	4:00	48,75	49,67	49,70
11/26/2012	5:00	47,90	47,92	49,70
11/26/2012	6:00	48,83	46,65	49,66
11/26/2012	7:00	47,69	49,41	49,66
11/26/2012	8:00	44,54	49,31	49,66
11/26/2012	9:00	48,12	47,84	49,66
11/26/2012	10:00	47,03	47,09	49,66
11/26/2012	11:00	46,78	46,99	49,66
11/26/2012	12:00	48,86	49,54	49,60
11/26/2012	13:00	48,34	48,12	49,60
11/26/2012	14:00	48,75	49,41	49,60
11/25/2012	15:00	48,75	48,30	46,99
11/25/2012	16:00	47,77	47,96	46,99
11/25/2012	17:00	46,48	47,92	46,99
11/25/2012	18:00	47,82	48,04	45,08
11/25/2012	19:00	47,19	48,23	45,08
11/25/2012	20:00	46,89	49,52	45,08
11/25/2012	21:00	48,09	49,68	45,08
11/25/2012	22:00	47,96	49,60	49,22
11/25/2012	23:00	48,20	49,60	49,22

Tabela B5 – Comportamento da pressão no Nô 59

Data	Hora	Observado (Campo)	Simulado (Real)	Simulado (Projeto)
05/11/2012	0:00	54,57	56,47	53,59
05/11/2012	1:00	54,46	57,73	53,59
05/11/2012	2:00	54,35	57,70	53,59
05/11/2012	3:00	54,24	57,70	57,58
05/11/2012	4:00	53,88	57,65	57,58
05/11/2012	5:00	53,42	55,76	57,58
05/11/2012	6:00	51,07	54,38	57,49
05/11/2012	7:00	52,60	57,38	57,49
05/11/2012	8:00	51,73	57,27	57,49
05/11/2012	9:00	50,50	55,67	57,49
05/11/2012	10:00	51,26	54,86	57,49
05/11/2012	11:00	53,39	54,76	57,49
05/11/2012	12:00	53,67	57,52	57,34
05/11/2012	13:00	53,69	55,97	57,34
05/11/2012	14:00	54,49	57,38	57,34
05/11/2012	15:00	53,69	56,17	51,33
04/11/2012	16:00	52,08	55,80	51,33
04/11/2012	17:00	48,80	55,76	51,33
04/11/2012	18:00	53,01	55,89	46,94
04/11/2012	19:00	54,43	56,09	46,94
04/11/2012	20:00	54,59	57,50	46,94
04/11/2012	21:00	55,06	57,67	56,47
04/11/2012	22:00	54,70	57,58	56,47
04/11/2012	23:00	52,93	57,58	56,47

Tabela B6 – Comportamento da pressão no Nô 66

Data	Hora	Observado (Campo)	Simulado (Real)	Simulado (Projeto)
09/11/2012	0:00	46,30	50,53	46,67
09/11/2012	1:00	47,47	52,40	46,67
09/11/2012	2:00	47,36	52,35	46,67
09/11/2012	3:00	47,04	52,35	52,2
09/11/2012	4:00	47,15	52,28	52,2
09/11/2012	5:00	46,40	49,47	52,2
09/11/2012	6:00	46,94	47,42	52,06
09/11/2012	7:00	45,23	51,88	52,06
09/11/2012	8:00	45,87	51,88	52,06
09/11/2012	9:00	46,30	49,34	52,06
09/11/2012	10:00	45,55	48,13	52,06
09/11/2012	11:00	46,83	47,98	52,06
09/11/2012	12:00	46,62	52,08	51,86
09/11/2012	13:00	45,23	49,78	51,86
09/11/2012	14:00	47,26	51,88	51,86
09/11/2012	15:00	46,51	50,08	43,54
09/11/2012	16:00	46,19	49,54	43,54
09/11/2012	17:00	47,15	49,47	43,54
09/11/2012	18:00	46,51	49,66	37,47
09/11/2012	19:00	47,04	49,97	37,47
09/11/2012	20:00	48,32	52,05	37,47
09/11/2012	21:00	45,66	52,30	50,66
09/11/2012	22:00	45,87	52,18	50,66
09/11/2012	23:00	47,15	52,18	50,66

Tabela B7 – Comportamento da pressão no Nó Usina

Data	Hora	Observado (Campo)	Simulado (Real)	Simulado (Projeto)
11/24/2012	0:00	54,10	51,58	51,55
11/24/2012	1:00	54,68	51,98	51,55
11/24/2012	2:00	54,51	51,97	51,55
11/24/2012	3:00	54,51	51,97	51,98
11/24/2012	4:00	55,28	51,95	51,98
11/24/2012	5:00	54,98	51,36	51,98
11/24/2012	6:00	53,58	50,92	51,97
11/24/2012	7:00	54,35	51,87	51,97
11/24/2012	8:00	55,74	51,83	51,97
11/24/2012	9:00	55,58	51,33	51,97
11/24/2012	10:00	55,61	51,07	51,97
11/23/2012	11:00	57,54	51,04	51,97
11/23/2012	12:00	60,11	51,94	51,95
11/23/2012	13:00	59,67	51,42	51,95
11/23/2012	14:00	58,31	51,87	51,95
11/23/2012	15:00	56,21	51,49	51,30
11/23/2012	16:00	55,74	51,37	51,30
11/23/2012	17:00	55,66	51,37	51,30
11/23/2012	18:00	55,71	51,4	50,83
11/23/2012	19:00	54,21	51,46	50,83
11/23/2012	20:00	53,75	51,90	50,83
11/23/2012	21:00	55,52	51,96	51,86
11/23/2012	22:00	55,82	51,93	51,86
11/23/2012	23:00	55,52	51,93	51,86

Tabela B8 – Comparativo da vazão total do sistema (Trecho RES)

Tempo (horas)	Medido (campo)	Simulado (histórico)	Simulado (projeto)
0	6,9	6,79	8,23
1	1,4	1,38	8,23
2	1,7	1,67	8,23
3	1,7	1,67	1,67
4	2,1	2,06	1,67
5	8,7	8,56	1,67
6	11,5	11,31	2,03
7	3,7	3,64	2,03
8	4,2	4,13	2,03
9	8,9	8,76	2,03
10	10,6	10,63	2,03
11	10,8	10,63	2,03
12	3,0	2,95	2,50
13	8,2	8,07	2,50
14	3,7	3,64	2,50
15	7,7	7,57	10,37
16	8,6	8,46	10,37
17	8,7	8,56	10,37
18	8,4	8,26	13,71
19	7,9	7,77	13,71
20	3,1	3,05	13,71
21	2,0	1,97	4,41
22	2,6	2,56	4,41
23	2,6	2,56	4,41

APÊNDICE C – VOLUMES MACRO E MICROMEDIDOS – ANO 2013

Mês	Micromedido (m³)	Macromedido (m³)
Janeiro	10993	11340
Fevereiro	10707	10308
Março	10130	11031
Abril	9769	11701
Maio	9785	9959
Junho	10740	12196
Julho	10439	12960
Agosto	11965	12790
Setembro	11029	12630
Outubro	11587	12201
Novembro	13170	12747
Dezembro	10533	11930
TOTAL	130847	141791