Daniel Lucas Makino

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA USANDO BOMBAS DE ROTAÇÃO VARIÁVEL

Dissertação de Mestrado apresentada à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia.

Área de Concentração: Tecnologia e Inovação.

Orientador: José Geraldo Pena de Andrade

Limeira, 2012

14/12

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA POR SILVANA MOREIRA DA SILVA SOARES – CRB-8/3965

BIBLIOTECA UNIFICADA FT/CTL

UNICAMP

Makino, Daniel Lucas, 1985-
M289e Eficiência energética em sistemas de abastecimento de água usando bombas de rotação variável / Daniel Lucas Makino. – Limeira, SP : [s.n.], 2012.

Orientador: José Geraldo Pena de Andrade.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia.

1. Eficiência energética. 2. Energia elétrica. 3. Máquinas hidráulicas. 4. Abastecimento de água. I. Andrade, José Geraldo Pena de. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Tecnologia. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em inglês: Energy efficiency in systems of water supply using bombs of changeable rotation

Palavras-chave em inglês (Keywords):

1- Energy efficiency

2- Electric energy

3- Frequency invertors

4- Hydraulical machines

5- Water supply

Área de concentração: Tecnologia e Inovação

Titulação: Mestre em Tecnologia

Banca examinadora: José Geraldo Pena de Andrade, Edevar Luvizotto Júnior, Luis Fernando Resende dos Santos Anjo

Data da Defesa: 24-02-2012

Programa de Pós-Graduação em Tecnologia

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TECNOLOGIA

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA USANDO BOMBAS DE ROTAÇÃO VARIÁVEL

Autor: Daniel Lucas Makino

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof. Dr. Presidente José Geraldo Pena de Andrade
FT/UNICAMP

Prof. Dr. Edevar Luvizotto Junior
FEC/UNICAMP

Prof. Dr. Luiz Fernando Resende dos Santos Anjo
UFTM

Dedico esse trabalho à minha amada esposa, *Jackeline*, que em todos os momentos tem sido a base e a grande alavanca do meu caminhar, e também ao bebê Gabriel ou Giovana, que ansiosamente esperamos chegar para alegrar ainda mais o nosso lar.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a *DEUS* por ter concedido a oportunidade e o privilégio de realizar mais um dos meus sonhos.

À minha querida esposa *Jackeline,* companheira batalhadora que sempre esteve ao meu lado participando das derrotas e conquistas alcançadas nos desafios da vida e durante todo o meu trajeto nessa Instituição de ensino.

Aos meus amados pais *Mamoru* (in memoriam) e *Isabel*, que muito se dedicaram e contribuíram para a minha formação pessoal e acadêmica, especialmente a esse grandioso e inesquecível homem, que sempre terei por meu herói e exemplo de vida.

Ao amigo e orientador Prof. Dr. *José Geraldo Pena de Andrade*, companheiro de algumas batalhas, por sempre ter acreditado nesse desafio, compartilhando com muita dedicação e cumplicidade seus sábios conhecimentos técnicos e suas experiências de vida pessoal e profissional de superação e êxito. Suas inúmeras qualidades me servirão de exemplo para a jornada que adiante esta por vir.

À *FOZ DO BRASIL S.A* - Unidade Limeira por acreditar, disponibilizar dados, equipamentos, instalações e toda a estrutura necessária para o desenvolvimento das análises. Certamente sem esse apoio incondicional prestado, dificilmente o objetivo dessa pesquisa seria conquistado.

Ao Engº *Marco César Sinico* e ao Tecngº *Rodrigo José Zangirolami*, Coordenador e Supervisor do Centro Técnico de Redes da FOZ de Limeira, respectivamente, pelo apoio, companheirismo e compartilhamento de suas experiências profissionais.

Ao meu companheiro desse curso de pós-graduação Engº *Gilson Luis Merli*, Gerente de Operações da *FOZ* de Limeira, pelas orientações e experiências divididas que muito contribuíram para o desenvolvimento desse trabalho.

Ao Tecngº *Cléber Elieser Salvi*, Gerente de Operações da *FOZ* de Porto Ferreira, por apoiar e acreditar no desenvolvimento dessa pesquisa.

Aos Engº *Alexandro Luís Schimidt* e *Douglas Eliseu Mendonça*, Coordenador e Supervisor do Centro de Tecnologias Operacionais, respectivamente, ao *Alexandre Leite de Oliveira*, Coordenador de Operações e Tratamento de Água e Esgoto e a todos os profissionais da *FOZ* de Limeira que participaram e contribuíram para a realização dessa pesquisa, em especial, ao meu amigo *Marco Aurélio Traldi Assoni*, que vivenciou alguns momentos da minha trajetória nesse curso de pós-graduação.

Ao Prof. Dr. *Edevar Luvizotto Júnior*, pelas orientações e compartilhamento de experiências, que muito foram válidas para o desenvolvimento e conclusões desse trabalho.

“Mais fácil me foi encontrar as leis com que se movem os corpos celestes, que estão a milhões de quilômetros, do que definir as leis de movimento da água, que escoa frente aos meus olhos.”

Galileu Galilei

SUMÁRIO

SUMÁRIO viii
LISTA DE TABELAS x
LISTA DE FIGURAS xii
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS, SÍMBOLOS E UNIDADES xv
RESUMO xviii
ABSTRACT xix
1. INTRODUÇÃO 1
2. OBJETIVOS 4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 6
3.1 Perdas de água e energia elétrica em sistemas de abastecimento de água 6
3.2 Energia elétrica 8
3.2.1 Geração de energia elétrica no Brasil 9
3.2.2 Consumo de energia elétrica das companhias prestadoras de serviços de saneamento do Brasil 12
3.2.3 Crise energética brasileira de 2001 15
3.2.4 Estrutura tarifária de energia no Brasil 19
3.3 Simulação computacional hidráulica 22
3.4 EPANET 25
3.5 Métodos de controle de vazão e pressão em sistemas de recalques 26
3.5.1 Controle de vazão por estrangulamento de válvulas 27
3.5.2 Controle de vazão por by-pass na saída da bomba 28
3.5.3 Variação de velocidade de rotação da bomba com uso de inversor de freqüência 29
3.6 Inversor de freqüência 30
3.6.1 Efeito do inversor de freqüência no bombeamento 33
3.6.2 Redução de custos com aplicação de inversores de freqüência em bombas de rotação variável 36
3.6.3 Vantagens e desvantagens do uso do inversor de freqüência 37
4. MATERIAIS E MÉTODOS 40
4.1 Sistema de abastecimento de água do município de Limeira 40

4.2 Sistema objeto do estudo 51
4.2.1 Estação elevatória de água tratada / booster Duque de Caxias 51
4.3 Modelagem matemática do sistema 62
4.3.1 Metodologia empregada no estudo 62
4.3.2 Diâmetros internos e rugosidades adotadas 68
4.3.3 Curvas características dos grupos elevatórios 69
4.3.4 Padrões temporais adotados na modelagem 77
4.3.5 Distribuição das demandas nos nós 79
4.3.6 Calibração do modelo matemático 85
4.3.7 Análise da eficiência energética no sistema de abastecimento de água através da aplicação do inversor de freqüência 94
4.3.7.1 Curva de rendimento da bomba nos cenários 95
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 98
5.1 Cenário 1 98
5.2 Cenário 2 105
5.3 Cenário 3 112
5.4 Sínteses dos resultados 118
6. CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS 125
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Investimentos dos prestadores de serviços de água e esgoto participantes do SNIS.. 8
Tabela 2. Potencial de geração das principais fontes primárias de energia do Brasil. 11
Tabela 3. Estrutura do consumo de energia elétrica no Brasil em 2004. 14
Tabela 4. Subgrupos tarifários A. 20
Tabela 5. Subgrupos tarifários B. 20
Tabela 6. Consumo e gastos com energia elétrica em 2010 da estação elevatória / booster Duque de Caxias. 52
Tabela 7. Características das bombas. 56
Tabela 8. Características do inversor de freqüência. 56
Tabela 9. Relatório dos volumes disponibilizados ao sistema (macro medido), volumes medidos (micro medido) e do índice de eficiência das redes..... 65
Tabela 10. Dados do reservatório para modelagem no simulador hidráulico – EPANET. 67
Tabela 11. Diâmetro e rugosidades iniciais adotadas. 68
Tabela 12. Monitoramento das pressões na saída do bombeamento - parte..... 70
Tabela 13. Alturas manométricas médias horárias da saída da bomba. 71
Tabela 14. Monitoramento das vazões na saída do bombeamento..... 72
Tabela 15. Monitoramento das vazões na saída do bombeamento – continuação. 73
Tabela 16. Monitoramento das vazões na saída do bombeamento – continuação. 74
Tabela 17. Monitoramento das vazões na saída do bombeamento (continuação) e definição das vazões médias horárias. 75
Tabela 18. Padrão temporal de variação das demandas ao longo das 24 horas. 78
Tabela 19. Dados característicos de volumes medidos disponibilizados (macro), consumidos (micro), índice de perdas e extensão de rede para determinação da vazão em marcha..... 81
Tabela 20. Planilha de associação dos consumos nos nós da macro 11 – parte. 82
Tabela 21. Dados característicos de volumes disponibilizados e medidos por bairros em fase de ocupação para determinação da vazão em marcha. 83
Tabela 22. Planilha de associação dos consumos nos nós por bairros em fase de ocupação – Parque Residencial Roland – parte. 84

Tabela 23. Cálculo dos rendimentos, potências, energias e custos de operação da bomba com velocidade de rotação constante. 104
Tabela 24. Cálculo dos rendimentos, potências, energias e custos de operação da bomba com velocidade de rotação variável, conforme a operação disposta no cenário 2. 111
Tabela 25. Cálculo dos rendimentos, potências, energias e custos de operação da bomba com velocidade de rotação variável, conforme a operação disposta no cenário 3. 117
Tabela 26. Relação do consumo de energia elétrica nos três cenários. 122
Tabela 27. Relação do custo com energia elétrica nos três cenários. 123
Tabela 28. Relação da redução de consumo e custos com energia elétrica nos três cenários. 123

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Processo de desenvolvimento de um simulador.....24
Figura 2. Abertura e fechamento de válvula.....28
Figura 3. By-pass em instalação de bombeamento.....29
Figura 4. Variação da curva da bomba pela alteração da velocidade de rotação provocada pelo inversor de freqüência. 30
Figura 5. Esquema elétrico dos principais componentes de um inversor de freqüência. 31
Figura 6. Componentes principais de um inversor de freqüência. 32
Figura 7. Diagrama de colina de uma bomba centrífuga.....35
Figura 8. Relações características de bombas centrífugas.....36
Figura 9. Localização de Limeira na bacia do PCJ. 41
Figura 10. Sistema de captação de água no rio Jaguari e no ribeirão Pinhal.....43
Figura 11. Sistema de adução de água bruta. 44
Figura 12. Estação de tratamento de água. 44
Figura 13. Localização das estações elevatórias de água. 46
Figura 14. Fluxograma geral do abastecimento e distribuição de água de Limeira. 47
Figura 15. Cadastro digital das redes de distribuição de água primárias e secundárias. 48
Figura 16. Sistema de distribuição de água setorizado em zonas de pressão. 49
Figura 17. Sistema de distribuição de água setorizado em zonas de macro medição. 50
Figura 18. Fachada da estação elevatória de água / booster Duque de Caxias.....53
Figura 19. Reservatório de água da estação elevatória de água / booster Duque de Caxias. ...54
Figura 20. Curva de performance da máquina hidráulica instalada na estação elevatória de água / booster Duque de Caxias. 55
Figura 21. Casa de bombas da estação elevatória de água. 57
Figura 22. Conjunto moto-bomba da estação elevatória. 57
Figura 23. Transdutor de pressão e velocidade de rotação e medidor de vazão e totalizador de volume. 58
Figura 24. Transdutor programado para transmissão de dados de pressão. 58
Figura 25. Transdutor programado para transmissão de dados de rotação da bomba. 59
Figura 26. Medidor de vazão e totalizador de volume. 59

Figura 27. Painéis de comando remoto da EEA/Booster Duque de Caxias. 60
Figura 28. Painel de comando local do inversor de freqüência da EEA/Booster Duque de Caxias. 61
Figura 29. Cadastro digital do sistema destacado pela Zona de Pressão Média IV. 62
Figura 30. Cadastro digital do sistema destacado pelas Zonas de Macro medição 11 e 34. 63
Figura 31. Cadastro digital do sistema destacado pela associação das Zonas de Macro medição e de Pressão. 64
Figura 32. Representação gráfica do sistema de medição e operação remota da EEA / Booster Duque de Caxias do VIJEO CITECT. 66
Figura 33. Gráfico de visualização de dados históricos do sistema do VIJEO CITECT. 67
Figura 34. Curva de demanda média horária no intervalo de 24 horas. 76
Figura 35. Perfil de variação das velocidades de rotação da bomba no intervalo de 24 horas aplicada na simulação hidráulica. 77
Figura 36. Padrão temporal de variação das demandas ao longo das 24 horas ajustados para a calibração do modelo. 79
Figura 37. Conceito de definição da demanda no nó. 80
Figura 38. Vista panorâmica do modelo matemático. 85
Figura 39. Pontos de calibração do modelo matemático. 86
Figura 40. Gráfico de pressões temporais medidas e calibradas do nó 1. 87
Figura 41. Gráfico de pressões temporais medidas e calibradas do nó 251. 88
Figura 42. Gráfico de pressões temporais medidas e calibradas do nó 383. 89
Figura 43. Gráfico de pressões temporais medidas e calibradas do nó 404 (recalque). 90
Figura 44. Relatório de tratamento estatístico dos dados de calibração de pressão dos pontos analisados. 91
Figura 45. Comparação dos valores médios de pressão medidos e calibrados dos pontos analisados. 91
Figura 46. Gráfico de vazões temporais medidas e calibradas do trecho 458 (recalque)..... 92
Figura 47. Relatório de tratamento estatístico dos dados de calibração de vazão do ponto analisado. 93
Figura 48. Comparação dos valores médios de vazão medidas e calibradas do ponto analisado. 93

Figura 49. Curva de rendimento da bomba em rotação constante com linha de tendência para interpolação dos rendimentos nas diferentes faixas de vazão. 96
Figura 50. Curva de velocidade de rotação da bomba operada sem o inversor de freqüência ao longo das 24 horas. 98
Figura 51. Altura manométrica da bomba ao longo das 24 horas. 99
Figura 52. Vazão de recalque da bomba ao longo das 24 horas. 100
Figura 53. Variação das pressões calibradas ao longo das 24 horas no ponto de abastecimento mais crítico do sistema. 101
Figura 54. Pressões instantâneas no ponto mais crítico (nó 1) e na região mais favorável. 102
Figura 55. Curva de velocidade de rotação calibrada da bomba operada pelo inversor de freqüência ao longo das 24 horas. 105
Figura 56. Altura manométrica da bomba ao longo das 24 horas. 106
Figura 57. Vazão de recalque da bomba ao longo das 24 horas. 107
Figura 58. Variação das pressões ao longo das 24 horas no ponto de abastecimento mais crítico do sistema. 108
Figura 59. Pressões instantâneas no ponto mais crítico (nó 1) e na região mais favorável. 109
Figura 60. Curva de velocidade de rotação da bomba operada pelo inversor de freqüência ao longo das 24 horas. 112
Figura 61. Altura manométrica da bomba ao longo das 24 horas. 113
Figura 62. Vazão de recalque da bomba ao longo das 24 horas. 114
Figura 63. Variação das pressões ao longo das 24 horas no ponto de abastecimento mais crítico do sistema. 115
Figura 64. Pressões instantâneas no ponto mais crítico (nó 1) e na região mais favorável. 116
Figura 65. Curvas de cargas da bomba nos três cenários. 118
Figura 66. Curvas de potências da bomba nos três cenários. 119
Figura 67. Curvas de rendimentos da bomba nos três cenários. 120
Figura 68. Curvas de custos com energia elétrica da bomba nos três cenários. 121
Figura 69. Curvas de velocidade de rotação da bomba nos três cenários. 122

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS, SÍMBOLOS E UNIDADES

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

ASSEMAE: Associação Nacional dos Serviços Municipais de Saneamento

BEN: Balanço Energético Nacional

BIG: Banco de Informações de Geração

BNDES: Banco Nacional Desenvolvimento Social

CCO: Centro de Controle Operacional

CESET: Centro Superior de Educação Tecnológica

CGCE: Câmara de Gestão da Crise de Energia Elétrica

COMUSA: Companhia Municipal de Saneamento

DoE: Departament of Energy

EEAT: Estação Elevatória de Água Tratada

EEAB: Estações Elevatórias de Água Bruta

ELETROBRAS: Centrais Elétricas Brasileiras S/A

EPA: U.S. Environmental Protection Agency

EPANET: Environmental Protection Agency (Aplicativo computacional)

ETA: Estação de Tratamento de Água

FINESSE: Water Software Systens

FURNAS: Furnas Centrais Elétrica

H2ONET – H2OMap – Montgomery Watson Inc (Aplicativo computacional)

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IEO: International Energy Outlook

IPCA: Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo

PCJ: Piracicaba, Capivari e Jundiaí

PIB: Produto Interno Bruto

Piccolo: Safege (Aplicativo computacional)

Pipe2000: KYPipe (Aplicativo computacional)

PMSS: Programa de Modernização do Setor Saneamento

PROCEL: Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

ReCESA: Rede Nacional de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental

RiMa: Relatório de Impacto Ambiental

SABESP: Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

SAN: Sistema Comercial

SANEAS: Revista da Associação dos Engenheiros da Sabesp

SICAE: Sistema de Informações Cartográficas de Água e Esgoto

SIG: Sistema de Informações Geográficas

SIN: Sistema Interligado Nacional

SNIS: Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

SNSA: Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades

SynerGEE: Stoner Workstation Service

UTM: Universal Mercator Tranversor

ZM: Zonas de Macro medição

ZP: Zonas de Pressão

WaterCAD: Bentley's Haestad Methods (Aplicativo computacional de simulação hidráulica)

R$: Unidade da moeda brasileira

CV: Cavalo vapor

GWh: Gigawatt hora

H e Hr: Altura manométrica total relativa à rotação da bomba

Km: Quilômetro

kV: Kilovolt

kW: Kilowatt

kWh: Kilowatt/hora

l/s: Litros por segundo

mca: Metro de coluna de água

m^3: Metro cúbico

m^3/h: Metro cúbico por hora

mm: Milímetro

MW: Megawatt

MWh: Megawatt hora

N e Nr: Velocidade de rotação da bomba

$NPSH_{RR}$ e NPSHR: NPSH relativo à rotação da bomba

P e PR: Potência consumida da bomba relativa à rotação da bomba

Q e Qr: Vazão relativa à rotação da bomba (m^3/s)

Rpm: rotações por minuto

T e T1: Torque relativo à rotação da bomba

TWh: Terawatt hora

RESUMO

No Brasil, assim como na grande maioria dos países emergentes, o saneamento básico, na atividade de abastecimento de água, tem sofrido avanço tecnológico e estrutural aplicado de forma precária e pouco expressivo ao longo da história, devido à carência de recursos para operação e manutenção adequadas. Por essa e outras razões tem-se culminado o tardamento da melhoria contínua da eficiência ao longo de todo o processo, tendo, por conseqüência, perdas significativas do volume de água (relação dos volumes produzidos com os consumidos ou faturados) e elevado consumo de energia elétrica.

A energia elétrica é o segundo insumo mais utilizado no processo produtivo do setor de saneamento, representando aproximadamente 2,5% da matriz energética do país e aproximadamente 50% dos custos operacionais de uma companhia.

Analisando a magnitude e a importância que a eletricidade representa ao setor de saneamento, o que o saneamento representa à matriz energética e o que o custo do consumo da eletricidade representa nas despesas das companhias, diagnostica-se que a eficiência no uso desse tão importante recurso beneficia todas as partes associadas, bem como propícia o alcance de um desenvolvimento cada vez mais sustentável. Visando o alcance dessa finalidade, o emprego de inversores de freqüência em sistema de bombeamento atualmente vem se tornando um aspecto fundamental para a otimização do consumo de energia elétrica e da operacionalidade do sistema.

Portanto, o objetivo principal desse trabalho consiste em estudar e analisar a eficiência energética de máquinas hidráulicas de velocidade de rotação variável. Para isso será especificamente retratada uma investigação de um setor do sistema de abastecimento de água do município de Limeira-SP.

Palavras-Chave: Eficiência energética; Energia elétrica; Inversor de freqüência; Máquinas hidráulicas; Abastecimento de água.

ABSTRACT

In Brazil, as well as in the great majority of the emergent countries, the basic sanitation, in the activity of water supply, it has suffered technological and structural advance applied of precarious form and little expressive throughout history, due to lack of resources for adequate operation and maintenance. For these and other reasons have occurred the delay of the continuous improvement of the efficiency throughout all the process, having, for consequence, significant losses of water (relation of the produced volumes with the consumed or invoiced volumes) and high consumption of electric energy.

The electric energy is the second product more used in the productive process of the sanitation sector, representing approximately 2,5% of the energy matrix of the country and approximately 50% of the operational costs of a company.

Analyzing the importance that the electricity represents to the sanitation sector, and what the sanitation represents to the energy matrix, and what the cost of the consumption of the electricity represents in the expenditures of the company, it is diagnosised that the efficiency in the use of this so important resource benefits to all the parts associates, as well as it makes possible the reach of a development each time more sustainable. Intending this purpose, the application of frequency invertors in pump systems currently it comes becoming a essential aspect for the efficiency of the consumption of electric energy.

Therefore, the main objective of this work consists of studying and analyzing the energy efficiency of hydraulical machines of speed of changeable rotation. For this specifically will be portraied an inquiry of a sector of the system water supply of Limeira-SP.

Key Words: Energy efficiency; Electric energy; Frequency invertors; Hydraulical machines; Water supply.

1. INTRODUÇÃO

Hoje mais de 1,3 bilhões de pessoas carecem de água doce no mundo, e o consumo humano de água, que representa uma faceta de aproximadamente 3% do consumo mundial, duplica a cada 25 anos. Com base nesse cenário, a água doce adquire uma escassez progressiva e um valor cada vez maior, tornando-se um bem econômico propriamente dito (MACHADO, 2003).

Mediante a necessidade de garantia do recurso ao abastecimento humano, medidas substanciais na gestão dos recursos hídricos, que tradicionalmente era realizada de forma compartimentada e não integrada foram formuladas na decorrência dos anos, na busca de instituir leis regulamentadoras do uso da água na bacia hidrográfica, enfocando seu gerenciamento, priorizando estratégias de preservação e possibilitando aos usuários de uma mesma água definir diretrizes para a sua preservação e o melhor aproveitamento, um agregado de valores que visa à sustentabilidade dos recursos hídricos e energéticos. (MAKINO, 2007)

Destaca-se no montante das ações, a cobrança pelo uso da água, programas de revitalização de mananciais; construções e ampliações de estações de tratamento de água e esgoto; aquisição de equipamentos tecnológicos para otimização de processos envolvidos em sistemas de abastecimento; construção de barragens de regularização (açudes); transposição de água entre bacias hidrográficas e controle e redução de perdas em sistemas público/privado de abastecimento, que vem sendo desenvolvidas por instituição usuárias desse recurso, mediante ativos próprios e incentivos de organismos públicos e privados. (MAKINO, 2007)

Dentre os múltiplos setores usuários do bem econômico água, o saneamento básico, na atividade de abastecimento de água, que tem por objetivo proporcionar o suprimento desse líquido às pessoas, na qualidade indispensável à preservação de sua saúde e na quantidade necessária aos seus diversos usos, incluindo dentre esse destino os setores industriais e outros. (SOUSA, 2005)

A operação dos sistemas públicos de abastecimento de água sempre foi merecedora de um cuidado exclusivo, por ser um serviço de grande complexidade e essencialidade ao atendimento das demandas acima expostas. (RODRIGUES, 2007)

O crescimento industrial e populacional dos centros econômicos, que na esfera nacional a população total representa 39,75% da população total do país, gradativamente tem requerido aumento da oferta do recurso para o atendimento das novas demandas, que associado à carência de um planejamento técnico e estrategicamente integrado das companhias de saneamento podem ser apontados como os principais elementos responsáveis pela complexidade operacional dos sistemas. Essa conexão necessariamente precisa ser amortizada por meio de incrementos e ampliações dos seus sistemas, a fim de atender as condições e demandas impostas pelas distâncias e locais topograficamente adversos. (ZESSLER; SHAMIR, 1989, apud RODRIGUES, 2007; PALINI JÚNIOR, 2008)

Para isso, além de outros reforços, novas estações elevatórias de água ou booster são e/ou precisam ser instalados no sistema operacional visando o pleno atendimento dos pontos de consumo, com adequação da vazão e altura manométrica. (GURGEL, 2006; RODRIGUES, 2007)

No Brasil, assim como na grande maioria dos países emergentes, esse segmento do saneamento tem sofrido avanço tecnológico e estrutural sendo aplicado de forma precária e pouco expressivo ao longo da história, devido à carência de recursos para operação e manutenção adequadas, que tem culminado no tardamento da melhoria contínua da eficiência ao longo de todo o processo, tendo, por conseguinte, perdas significativas do volume de água (relação dos volumes produzidos com os consumidos ou faturados) e elevado consumo de energia elétrica. (TUNDISI, 2003)

A energia elétrica é o segundo insumo mais utilizado no processo produtivo do setor de saneamento, representando aproximadamente 2,5% da matriz energética do país, valor superior quando comparado ao de 1998 que foi estimado em 2,3%. (MARTINS, et al., 2006; RODRIGUES, 2007; SANEAR, 2008)

Portanto, o uso racional e a eficiência energética na operação dos sistemas de abastecimento de água são fundamentais para a redução do consumo e conseqüentemente dos custos das companhias com esse recurso, assim como, dos impactos ambientais negativos

ocasionados pela transformação da energia, de fonte renovável ou não renovável, em eletricidade. (SOUSA, 2005)

2. OBJETIVOS

No tocante à eficiência energética em sistemas de abastecimento de água, vislumbrando o panorama desfavorável e ineficaz que convencionalmente grande parte de tais se enquadram, atualmente o inversor de freqüência tem se tornado um dos principais dispositivos disponíveis para, de forma ordenada e eficiente, otimizar o uso de energia elétrica em máquinas hidráulicas.

Sendo assim, o objetivo desse trabalho consiste em estudar e analisar a eficiência energética de máquinas hidráulicas de velocidade de rotação variável por inversores de freqüências.

Em específico é retratada uma investigação de um setor do sistema de abastecimento de água do município de Limeira – SP, com interesse em avaliar o conceito de aplicação do inversor de freqüência adotado pela concessionária, determinar os benefícios econômicos e operacionais alcançados pelo uso desse dispositivo, e por fim, estabelecer uma nova regra de aplicação do inversor, buscando aperfeiçoar ainda mais a operacionalidade do sistema e reduzir o consumo de energia elétrica.

A análise da eficiência energética resultada pelo uso do inversor de freqüência no sistema de abastecimento apresentado é realizada em três distintos cenários, a saber.

- Cenário 1: Operação do conjunto moto-bomba sem a aplicação do inversor de freqüência;
- Cenário 2: Operação do conjunto moto-bomba com a aplicação do inversor de freqüência, seguindo o método operacional estabelecido pela Foz de Limeira;
- Cenário 3: Operação do conjunto moto-bomba com a aplicação do inversor de freqüência, sendo este ajustado por uma regra operacional criteriosamente estabelecida por esse trabalho de pesquisa, que busca atender analogamente as condições operacionais aplicáveis pela companhia e reduzir o consumo de energia elétrica na estação elevatória.

Nesse último cenário, o critério definido consiste em estabelecer no ponto mais distante e desfavorável do sistema, durante todos os períodos do dia, uma pressão dinâmica de 15 mca, definida pela companhia como a pressão mínima dinâmica de operação.

Com essa regra operacional proposta, o abastecimento de água em todo o sistema, principalmente no ponto mais crítico estará mais equalizado e possivelmente será submetido à cargas hidráulicas inferiores, que diretamente influirão na redução de rompimentos de redes, perdas de água físicas e principalmente na eficiência energética do conjunto moto-bomba.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Dentre os múltiplos setores usuários do bem econômico água, o saneamento básico, na atividade de abastecimento de água, que tem por objetivo proporcionar o suprimento desse líquido às pessoas, na qualidade indispensável à preservação de sua saúde e na quantidade necessária aos seus diversos usos, incluindo dentre esse destino os setores industriais e outros. (SOUSA, 2005)

A disposição desse recurso hídrico ao suprimento dos diversos segmentos consumidores apenas é possibilitada, mediante ao uso da eletricidade. No contexto do saneamento básico, é válido ressaltar que a água e a energia elétrica são recursos, a rigor, inerentemente associados. Essa interação existe devido à função que a energia elétrica exerce no transporte da água captada no manancial à estação de tratamento, no transporte aos reservatórios e a distribuição ao consumidor. (CUNHA, 2009)

Muito além das fronteiras que tange o saneamento, a eletricidade possui, assim como a água, um atributo indispensável e estratégico para o desenvolvimento sócio econômico das nações e para o conforto e bem estar da população, por ser uma das formas mais versáteis e convenientes de energia. (SOUZA, 2008; SOUSA, 2005)

3.1 Perdas de água e energia elétrica em sistemas de abastecimento de água

Atualmente o assunto que se refere à perda de água em sistemas de abastecimento é um tema muito presente, que gradativamente vem sendo difundido e tratado com mais rigor e eficácia pelas companhias.

Em um panorama mundial, no que diz respeito às perdas de águas não faturadas nos sistemas públicos de abastecimento, faz-se notória a carência e insuficiência de programas que atribuem aspectos favoráveis à solução do problema em questão em um curto espaço de tempo, uma vez que investimentos vultosos para aquisição de equipamentos, tecnologias e mão-de-obra

especializada se fazem precisos para abranger a complexidade e magnitude de tais sistemas, e também pelo fato de haver necessidade de investir prioritariamente em programas que proporcionem a universalização do saneamento básico à população.

De acordo com o Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto de 2009 do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS, o índice médio nacional de perdas na distribuição, que corresponde à diferença entre o volume de água disponibilizado para a distribuição e o volume de água consumido, foi de 41,6%. (SNIS, 2009)

O estudo "Dimensionamento da Necessidade de Investimentos para Universalização dos Serviços de Água e Esgotos no Brasil", realizado pelo PMSS e divulgado em 2003, apontou que na época eram necessários 178 bilhões de reais para universalizar os serviços de água e esgotos e fazer a reposição da infra-estrutura existente de forma a assegurar atendimento continuo e de qualidade. Em dezembro de 2007 esse valor atualizado com base no IPCA passava a 268,8 bilhões de reais.

Tendo por base os dados da série histórica do SNIS, entre 2001 a 2007, e cruzando com os resultados do respectivo Estudo, obtém as seguintes informações:

- Total de investimento (atualizado pelo IPCA): 28,6 bilhões;
- Média anual dos investimentos no período: 4,1 bilhões;
- Saldo a ser investido para alcançar a universalização: 240,2 bilhões.

A quantidade de vezes que deve ocorrer o investimento de mesma ordem para alcançar a universalização é de 66 vezes ou 66 anos. (SNIS, 2007)

Na Tabela 1 são apontados, segundo a série histórica, os valores dos investimentos dos participantes dos SNIS.

Tabela 1. Investimentos dos prestadores de serviços de água e esgoto participantes do SNIS.

Ano	Investimentos realizados (R$ bilhões) – FN033	
	Valores históricos	Valores atualizados pelo IPCA
2001	2,6	4,1
2002	2,8	3,9
2003	3,0	3,9
2004	3,1	3,7
2005	3,5	3,9
2006	4,5	4,8
2007	4,2	4,3
Total	23,8	28,6
Média anual	3,4	4,1

Fonte: SNIS 2007

Dessa forma, evidencia-se a dura realidade dos serviços de saneamento básico no Brasil. O investimento atual, que é da ordem de 0,22% do PIB/ano, precisa ser triplicado para que a universalização do saneamento básico no Brasil seja alcançada em 20 anos. (SANEAS, 2008; INSTITUTO TRATA BRASIL, 2011; IBGE, 2010)

Por outro lado, muito embora sejam escassas as abordagens, nos sistemas de abastecimento de água também há perdas de energia, que por sua vez são extremamente difíceis de mensurar. Estas se devem principalmente às próprias perdas de água, à baixa eficiência dos equipamentos eletro-mecânicos, à ausência de medição e falta de monitoramento dos principais parâmetros que regulam o sistema e a procedimentos operacionais inadequados. (CUNHA, 2009)

3.2 Energia elétrica

A energia, nas suas mais diversas formas é imprescindível a todos os seres viventes. Desde os primórdios da vida na Terra, os seres humanos aprenderam ao longo dos séculos a utilizar

diversas formas de energia obtidas de recursos naturais renováveis e não renováveis, que provocaram, na maioria das vezes, impactos ambientais negativos.

Na antiguidade o homem usava a energia térmica proveniente da queima de madeira para aquecimento, preparo de alimentos, iluminação, lazer, entre outras aplicações.

No século XVIII, com o advento da energia elétrica deu-se início a uma nova era da presença humana na Terra, marcada por uma grande revolução industrial e expansão populacional, cujos reflexos positivos e negativos repercutem até os dias de hoje.

Com a criação de novas tecnologias outros recursos de energia como solar, eólica, nuclear, hidrogênio e biomassa passaram a incorporar as fontes mais difundidas e exploradas em maior escala, como é o caso do carvão mineral, petróleo, gás natural e hidroeletricidade. (ReCESA, 2008; RODRIGUES, 2007)

A eletricidade transformou-se na forma mais conveniente de energia, pois seu consumo está diretamente associado aos motores elétricos, tornando-se um recurso vital para o desenvolvimento sócio- econômico mundial, sobretudo do setor industrial, pois só no Brasil ele é responsável por 48% de toda a eletricidade consumida no país. (RODRIGUES, 2007; SOUSA, 2005)

3.2.1 Geração de energia elétrica no Brasil

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2008), dentre as principais fontes de geração de energia elétrica no Brasil, compostas por gás natural, petróleo, biomassa, nuclear, hidráulica, carvão mineral e eólica, a energia hidráulica se firma ao longo dos anos como a fonte primária mais importante de energia, não só devido ao enorme potencial hidráulico disponível, mas também pela sua atratividade econômica. (SOUZA, 2008; SOUSA, 2005)

A capacidade de produção de energia elétrica das usinas hidrelétricas está diretamente atrelada às condições climáticas e aos ciclos hidrológicos, e dessa forma, dependentemente dos períodos do ano há excedente ou escassez da produção.

O território nacional, pela sua imensa extensão, é marcado por peculiaridades climáticas. Assim, dependendo da região e da estação, a capacidade de produção das usinas hidrelétricas pode ser favorecida ou prejudicada.

Para o suprimento desse fator limitante e da disparidade do aproveitamento do potencial hidrelétrico brasileiro por bacia hidrográfica, foi-se instituído o Sistema Interligado Nacional – SIN, uma formação composta por empresas da região Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte, que através da interligação entre seus subsistemas viabiliza a troca de energia entre regiões, permitindo assim, a manutenção da distribuição energética de todas as regiões do país. (SOUZA, 2008)

O alcance desse sistema foi possibilitado mediante a construção de grandes troncos de transmissão para ligar as usinas e as mesmas aos grandes centros distribuidores, que por sua vez situam-se distantes dos centros produtores. (SOUZA, 2008)

Em 2007, de acordo com os resultados preliminares do Balanço Energético Nacional (BEN), elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética, a energia de fonte hidráulica correspondeu por 14,7% da matriz energética brasileira e por 85,6% da oferta interna de energia elétrica, que totalizou 482,6 TWh (aumento de 4,9% em relação a 2006), consolidando-se como a maior produtora de eletricidade do país. (ANEEL, 2007)

O potencial hidrelétrico brasileiro é de 260.000 MW, dos quais são extraídos cerca de 66.300 MW ou 25,5%. Essa fonte de geração energética representa uma produção estimada em aproximadamente 90% de toda a eletricidade gerada no Brasil. A Tabela 2 apresenta os potenciais de geração das principais fontes primárias de energia do Brasil. (SOUZA, 2008; SOUSA, 2005)

Tabela 2. Potencial de geração das principais fontes primárias de energia do Brasil.

Tipo		Capacidade instalada		%	Total		%
		Nº de Usinas	(kW)		Nº de Usinas	(kW)	
Hidro		704	77.471.007	70,2	704	77.471.007	70,2
Gás	Natural	85	10.588.402	9,6	114	11.769.430	10,67
	Processo	29	1.181.028	1,07			
Petróleo	Óleo Diesel	595	3.283.796	2,98	617	4.657.290	4,22
	Óleo Residual	22	1.373.494	1,24			
Biomassa	Bagaço de Cana	252	3.392.063	3,07	300	4.547.265	4,12
	Licor Negro	13	859.217	0,78			
	Madeira	28	233.187	0,21			
	Biogás	3	41.590	0,04			
	Casca de Arroz	4	21.208	0,02			
Nuclear		2	2.007.000	1,82	2	2.007.000	1,82
Carvão Mineral	Carvão Mineral	8	1.455.104	1,32	8	1.455.104	1,32
Eólica		17	272.650	0,25	17	272.650	0,25
Importação	Paraguai		5.650.000	5,46		8.170.000	7,4
	Argentina		2.250.000	2,17			
	Venezuela		200.000	0,19			
	Uruguai		70.000	0,07			
	Total	1.762	110.349.746	100	1.762	110.349.746	100

Fonte: SOUZA, 2008

Atualmente, cerca de 20% de toda a energia elétrica consumida no mundo é proveniente da energia hidráulica. (SOUZA, 2008)

Estima-se que nos próximos 20 anos a demanda mundial de eletricidade poderá atingir a marca de 2.300 TWh/ano, sendo que 28% desse montante poderão ser atendidos por hidroeletricidade.

O Relatório Internacional de Energia (International Energy Outlook - IEO), publicado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (Departament of Energy - DoE), aponta que no período de 2004 a 2030 a participação da energia hidráulica deverá aumentar a uma margem média de 1,9 % ao ano. (SOUZA, 2008)

3.2.2 Consumo de energia elétrica das companhias prestadoras de serviços de saneamento do Brasil

O consumo de energia elétrica na produção e distribuição de água para abastecimento é intensamente utilizado em toda cadeia do saneamento, desde a captação, transporte e tratamento até a distribuição e, por isso, é alvo de diversas ações de controle e reduções de custo.

Dentro de uma companhia de distribuição de água, são tidos como maiores consumidores de energia a captação, realizada em rios, represas, poços ou outros mananciais, e o transporte através de elevatórias, boosters e sistemas de transferência.

O entendimento do combate ao desperdício de energia elétrica deve ser a utilização do menor consumo energético possível, tanto na produção de bens como na prestação de serviços, sem que isto prejudique sua qualidade, conforto e eficiência. (PERETO, 2003)

De acordo com o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica para o Saneamento, dois e meio por cento do consumo total de energia elétrica do Brasil, o equivalente a aproximadamente 10,4 bilhões de kWh/ano (projeção a partir do SNIS 2007), são consumidos

por prestadores de serviços de água e esgotamento sanitário em todo o país. (CUNHA, 2009; ReCESA, 2008; SANEAR, 2011)

Em 2004 o consumo de energia elétrica no Brasil foi de 359 bilhões kWh, sendo que o setor de saneamento consumiu 8,25 bilhões de kWh, representando 2,3% do consumo do país e o segundo item de custo no saneamento.

Em 2010 o consumo de energia elétrica do sistema de água (captação, tratamento, reservação e distribuição) da Foz do Brasil – Unidade de Limeira foi de 26,13 GWh, o equivalente a um custo R$ 6.089.885,80, a 11,74% da despesa anual global dessa Unidade de Negócio e a 3,57% do consumo global de energia elétrica do município de Limeira. (FOZ DE LIMEIRA, 2010; ELEKTRO, 2010)

Em 2004 a SABESP consumiu 2.042 GWh, que correspondeu a 2,1% do consumo total de energia elétrica do Estado de São Paulo. Na Unidade de Negócio do Vale do Paraíba da Sabesp, que engloba a operação de 24 municípios registrou-se também no mesmo ano que a despesa com esse recurso foi de 19,67% da despesa total dessa Unidade de Negócio e a operação de bombas corresponde a 95% dessa despesa com um consumo médio mensal de 3.325 MWh. (GURGEL, 2006)

A Tabela 3 apresenta a estrutura de consumo de energia elétrica no Brasil. (MARTINS, et al., 2006; ReCESA, 2008)

Tabela 3. Estrutura do consumo de energia elétrica no Brasil em 2004.

Consumo de energia	Atividades
Industrial (43%)	- Força motriz – 51% - **Saneamento – 5,3%** - Aquecimento – 18% - Processos eletroquímicos – 16,7% - Refrigeração – 7% - Iluminação – 2%
Residencial (25%)	- Aquecimento de água – 26% - Refrigeração – 32% - Iluminação – 24% - Outros – 18%
Comercial e outros (32%)	- Iluminação – 44% - Condicionamento do ambiente – 20% - Refrigeração – 18% - Outros – 18%

Clingenpeel (1983, apud VICENTE, 2005) afirma que a grande maioria dessas empresas gasta aproximadamente 50% dos custos operacionais com energia elétrica, dos quais mais de 95% podem ser associados aos custos de bombeamento, principalmente pelos conjuntos moto-bomba das estações elevatórias dos sistemas de abastecimento de água.

Embora não sejam divulgados dados consolidados, estima-se que a despesa anual das companhias prestadoras de serviços de saneamento do Brasil com perdas energéticas é de R$ 375 milhões. Um dos principais motivos do desperdício energético, por exemplo, é o superdimensionamento das estruturas em relação à demanda real do processo. (ReCESA, 2008; RODRIGUES, 2007)

O setor de saneamento, por ser a parcela da indústria com maiores índices de perda e desperdício nos processos de produção e distribuição de seu produto, vem sendo objeto de programas de redução da perda e do desperdício de energia elétrica desenvolvidos pelo

Ministério de Minas e Energia por meio da Eletrobrás, que tem procurado motivar as concessionárias do setor saneamento para o planejamento dos sistemas considerando o uso racional.

Os sistemas de abastecimento de água são caracterizados por constantes alterações de seus parâmetros operacionais, seja pelo envelhecimento do sistema ou pelo crescimento da demanda. Esses componentes isolados ou associados levam a restrições hidráulicas, gerando elevadas perdas de cargas e deficiências no abastecimento que são compensadas com a utilização da energia elétrica, através da aplicação de estações de bombeamento.

Outra condição resultante do envelhecimento e crescimento do sistema de abastecimento é a inadequação dos equipamentos, ou seja, instalações que ao longo do tempo não são atualizadas de acordo as novas necessidades do sistema e tecnologias disponíveis, ocasionando equipamentos com baixo rendimento e elevado consumo de energia elétrica (SANEAS, 2008).

Analisando a magnitude e a importância que a eletricidade representa ao setor de saneamento, o que o saneamento representa à matriz energética e o que o custo do consumo da eletricidade representa nas despesas das companhias, e congregando os impactos ambientais negativos ocasionados pelos aspectos envolvidos no processo de transformação das energias primárias presentes nas diversas fontes de origem renovável e não renovável em eletricidade, diagnostica-se que a eficiência no uso deste tão importante recurso beneficia todas as partes associadas, bem como propícia o alcance de um desenvolvimento cada vez mais sustentável.

Visando o alcance dessa finalidade, o emprego de inversores de freqüência em sistema de bombeamento atualmente vem se tornando um aspecto fundamental para a otimização do consumo de energia elétrica e da operacionalidade do sistema.

3.2.3 Crise energética brasileira de 2001

Foi em 1942 que ocorreu o primeiro racionamento de energia elétrica no Brasil, devido à falta de produção e investimentos do setor diante do consumo. Em 1952, devido à necessidade de

expandir o setor, criou-se o BNDE (atual BNDES) para desempenhar na administração do fundo de reaparelhamento econômico, mais tarde foram criadas diversas empresas públicas como a Furnas (1957), Ministério de Minas e Energia (1960) e a Eletrobrás (1962). (SOUZA, 2008)

De acordo com Matos Filho (2001, apud SOUZA, 2008), o domínio de participação do Estado que já se descrevia desde o final da década de 1950 foi concretizado através da aquisição das empresas da Amforp, em 1964 e do grupo Light, em 1979, caracterizando a completa nacionalização ou estatização do setor. No período de 1945 a 1962 o setor registrou um aumento da capacidade de produção de energia elétrica de 8,9% ao ano, média essa muito superior à observada no período de 1930 a 1945, que foi de aproximadamente 3,7% ao ano, destacando-se a energia hidroelétrica como a principal fonte de geração de energia elétrica.

A injeção de capital estatal, aliada à interligação dos subsistemas, otimizou de maneira substancial o aproveitamento dos recursos hídricos, dando novo impulso à indústria do setor elétrico.

Durante as décadas de 50 e 60, o controle estatal do setor elétrico impulsionou o desenvolvimento do mesmo. Nessa época foram executados grandes projetos, como a construção das usinas como Três Marias, Ilha Solteira e Itaipu. (SOUZA, 2008)

Na década de 70, com o advento da crise mundial originada pelo choque do petróleo, o sistema econômico nacional foi impactado pelo processo inflacionário e de endividamento interno e externo, razão pela qual reduziu significativamente a capacidade do Estado em mobilizar recursos para investimentos. (SOUZA, 2008)

Nesse período o setor elétrico brasileiro mais uma vez se adentrava em crise, uma vez que o Estado induziu as empresas estatais, particularmente as do setor energético, a um processo de endividamento progressivo que culminou a inadimplência e a ineficiência do setor.

Na década seguinte a crise continuou se agravando, até que em 1988, através da instituição da Constituição Federal e das influências de políticas externas de financiamento de créditos dos organismos multilaterais que sofreu alterações extremas no início dos anos 90, iniciava-se por

meio da desestatização e abertura para o capital privado, novos caminhos para a reestruturação do setor elétrico.

Na década de 90 foram implantadas leis como a nº 8.987/95, que regia o novo regime de concessão de permissão da prestação de serviços públicos e a nº 9.427/96, que instituiu a ANEEL em 1996, órgão cujas responsabilidades são legislar e fiscalizar o setor energético nacional. Em 2008, por meio da Resolução nº 242 de 24/07/98, a ANEEL estabelecia que as concessionárias do serviço público de distribuição de energia elétrica deveriam aplicar no mínimo 1% da receita operacional anual do ano anterior em programas de conservação de energia elétrica. (SOUZA, 2008; RODRIGUES, 2007)

Nesse período as empresas controladas pela Eletrobrás foram incluídas ao Programa Nacional de Desestatização que orientava a privatização do Governo Federal.

Este novo modelo constituído tinha como finalidade a abertura de mercado para a entrada de novos investidores em substituição ao Estado e sua limitação financeira de investimentos necessários à expansão do setor elétrico nacional. (SOUZA, 2008)

Entretanto, mesmo com essa reformulação os investimentos aplicados ao setor não foram suficientemente necessários para saldar o déficit e suprir a demanda com garantia. Em 1985 foi-se criado o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), que visa promover a racionalização da produção e do consumo de energia elétrica, para que se eliminem os desperdícios e se reduzam os custos e os investimentos setoriais.

Instituída em 1996, a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, através da Resolução nº 242 de 24/07/1998, estabeleceu que as concessionárias do serviço público de distribuição de energia elétrica deveriam aplicar no mínimo 1% da receita operacional apurada no ano anterior em programas de combate ao desperdício de energia elétrica.

Em 1997 o PROCEL estabeleceu uma meta de redução do desperdício de energia elétrica para as empresas de saneamento da ordem de 15%. (RODRIGUES, 2007)

Mesmo implantadas essas medidas que tinha por objetivo aumentar a oferta de investimentos de recursos no setor, estabelecer metas de redução de consumo e delegar a

obrigatoriedade de investimentos em programas de conservação de energia elétrica, o déficit entre a produção e a demanda ainda não havia sido superado.

As principais causas que contribuíram a esse desfecho foram:

- O liberalismo de mercado que não apresentou os investimentos estimados e necessários, uma vez que as empresas recém privatizadas possuíam altas dívidas;
- O agravamento e a iminência dos impactos ambientais negativos ocasionados na natureza pelas ações antrópicas têm culminado ao longo dos últimos anos com mais ímpeto e assiduidade, a formação de políticas públicas e leis que visam mitigar e minimizar os impactos, razão pela qual também tem contribuído para dificultar a construção de novas usinas hidrelétricas.

No ano de 2.000 já era possível prever a possibilidade de um iminente racionamento de energia elétrica caso as chuvas na região nordeste não ocorressem, os níveis de reservação das usinas hidrelétricas não viessem a recuperar e os investimentos no setor não fossem aplicados de forma imediata. (SOUZA, 2008; RODRIGUES, 2007)

Naquele momento o Ministério das Minas e Energia tratava de uma redução de consumo junto aos grandes consumidores, numa espécie de gerenciamento de demandas. Mesmo com essa ação a crise do setor energético foi inevitável e seu ponto crítico culminou em 2.001 com o início do racionamento de energia atingindo quatro das cinco regiões que compõem a federação. (SOUZA, 2008; RODRIGUES, 2007)

Por meio da culminante crise energética que assolava o país, o governo federal criou em 2001 a Câmara de Gestão da Crise de Energia Elétrica (CGCE) com o objetivo flexibilizar as regras do Estado, propor e implementar medidas de natureza emergencial para equalizar a demanda e a oferta de energia elétrica, de forma a evitar interrupções do abastecimento de energia elétrica. (SOUZA, 2008)

Nesse período, o processo de outorga de direitos para instalação de novos empreendimentos energéticos foi desburocratizado, sendo que em muitas vezes não se aplicava licitação, isentava-se taxa de compensação financeira a Estados e seus municípios onde as usinas se instalavam e

pagamento por uso das redes de distribuição para usinas que entrassem em operação em determinado prazo de tempo. (SOUSA, 2005)

No início de 2008, o país novamente volta a passar por uma situação critica no fornecimento de energia elétrica, uma vez que os reservatórios das centrais hidrelétricas atingem níveis críticos de armazenamento e o fornecimento de gás natural às usinas termelétricas também é afetado, evidenciando mais uma vez a fragilidade do Setor Elétrico Brasileiro.

Souza (2008) alertou que em 2009 o Setor Elétrico Brasileiro deveria passar por períodos críticos, caso as afluências naturais aos grandes reservatórios do Sistema Interligado Nacional (SIN) não fossem favoráveis.

De qualquer forma evidencia-se que o Setor Elétrico Brasileiro precisa urgentemente ser ampliado e reformulado, passando a não ficar mais a mercê das estruturas atuais e dos fatores climáticos que afetam a incidência de chuvas e conseqüentemente o armazenamento de água nos reservatórios das principais centrais hidrelétricas do país, haja vista o potencial de exploração da própria energia hidrelétrica e de outras fontes de energia renováveis e pouco impactantes como a biomassa, a eólica e solar.

3.2.4 Estrutura tarifária de energia no Brasil

O desenvolvimento de ações de eficientização energética para redução de custos se baseia em conhecer a estrutura tarifária para interpretar e analisar uma conta de energia. (COURA, 2007)

A estrutura tarifária possui dois grupos e três modalidades de tarifas que são definidas segundo dois segmentos de horários (PONTA E FORA DE PONTA) e dois segmentos sazonais (PERÍODO SECO E PERÍODO ÚMIDO). O grupo denominado A abriga os consumidores que compram energia em tensão igual ou superior a 2,3 kV (2.300 Volt), por isso ele também é conhecido como grupo de alta tensão. Nesse grupo há cinco subgrupos de classificação que estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Subgrupos tarifários A.

Subgrupo	Tensão de fornecimento
A1	Acima 230 kV
A2	88 kV a 138 kV
A3	69 kV
A3a	30 kV a 44 kV
A4	2,3 kV a 25 kV
AS	Abaixo de 2,3 kV

Fonte: COURA, 2007

Já o grupo B classifica os consumidores que recebem energia em tensão inferior a 2,3 kV, ou seja, conhecido como grupo de baixa tensão. Esta última modalidade é mais simples, pois o consumidor é tarifado apenas pelo consumo, cujas classificações estão descritas na Tabela 5. (COURA, 2007; VICENTE, 2005)

Tabela 5. Subgrupos tarifários B.

Subgrupo	Tipo de consumidor
B1	Residencial e Residencial de baixa renda
B2	Rural; Cooperatica elétrica Rural e Serviço público de irrigação
B3	Demais classes
B4	Iluminação pública

Fonte: COURA, 2007

O setor de saneamento básico, água e esgoto se enquadram no subgrupo A4 (Tabela 4), onde as tarifas são reguladas pela concessionária distribuidora de energia específica da região sendo, o conteúdo informacional das contas de energia, regulado pela ANEEL. Já em relação ao

grupo B, as instalações das operadoras dos sistemas de saneamento se enquadram no subgrupo B3 (Tabela 5). (COURA, 2007)

As modalidades tarifárias podem ser classificadas em:

- Convencional – Tarifas fixas de consumo e demanda para todos os períodos do ano;
- Horo-Sazonal Verde – Tarifas de consumo que são diferentes em determinadas horas do dia (PONTA E FORA DE PONTA) e também em determinados períodos do ano (PERÍODO SECO E ÚMIDO). Porém essa modalidade apresenta uma única tarifa de demanda para todos os horários e períodos do ano;
- Horo-Sazonal Azul – Tarifas de consumo diferenciadas de acordo com as horas do dia e os períodos do ano e tarifas de demandas diferentes apenas em determinadas horas do dia.

Os segmentos Horo (HORÁRIO DE PONTA E FORA DE PONTA) e Sazonal (PERÍODO SECO E ÚMIDO) definem o valor da tarifa para o grupo A e seus respectivos subgrupos. (VICENTE, 2005)

Horário de ponta é o período de três horas em que as tarifas são mais caras em relação às demais horas do dia, geralmente esse período é das 17h30m até 20h30m e apenas de segunda a sexta-feira. O objetivo principal do horário de ponta é economizar energia em equipamentos elétricos no período de horas em que o consumo é maior ("horário de pico"). (COURA, 2007)

Horário fora de ponta é o período que abrange às 24 horas com exceção das três horas de ponta.

O período seco caracteriza-se de maio a novembro e possui as tarifas mais caras em relação aos outros meses com o intuito de racionalizar o uso de energia elétrica. O período úmido compreende nos cinco meses restantes, de dezembro a abril do ano seguinte. (VICENTE, 2005)

Na modalidade tarifária Convencional é feito um contrato de demanda (kW), onde é estipulado um valor único de energia em kW para os horários de ponta e fora de ponta e a Resolução ANEEL nº 456 determina ainda uma tolerância de 10% sobre a demanda contratada. Porém quando o valor é superior ao da demanda contratada e da tolerância tem-se uma demanda

denominada de ultrapassagem, sendo que o valor excedente é tratado como multa por demanda de ultrapassagem. (COURA, 2007)

Uma das alternativas para se ter eficientização energética e conseqüentemente economia na conta de energia é evitar o pagamento da multa por baixo fator de potência corrigindo o fator de potência para 0,92. (COURA, 2007)

Conforme legislação, o fator de potência ou energia reativa é verificado nos períodos indutivo (entre 6 horas e zero hora) e capacitativo (entre zero hora e 6 horas). Por ser uma energia não faturada pela concessionária, o fornecimento dela é restrito ao valor 0,92. Em qualquer período (indutivo ou capacitativo) se o fator de potência estiver abaixo de 0,92 significa que está ocorrendo consumo excessivo, onde o excedente é cobrado na multa por baixo fator de potência. (COURA, 2007; VICENTE, 2005)

3.3 Simulação computacional hidráulica

O uso de softwares de simulação hidráulica veio consideravelmente modificar os sistemas de cálculo e análise de problemas hidráulicos, demonstrando-se um recurso importante à gestão de sistemas de abastecimento e detecção de vazamentos.

Projetos referentes a expansões e ampliações de sistemas de abastecimento são executados por meio de métodos e expressões convencionais que demandam períodos consideravelmente extensos para obtenção de resultados, tardando as tomadas de decisões.

Por isso a disposição de uma ferramenta que simula as condições de um sistema de abastecimento de água pode, além de coordenar a detecção de vazamentos, orientar as ampliações e ações que se farão necessárias para o suprimento das demandas atuais e futuras, através da compilação de dados referentes à vazão, pressão, velocidade de escoamento e outras variáveis cujo controle e conhecimento são essenciais para a gestão do sistema.

Desenvolvida no início dos anos 60, essa ferramenta é muito utilizada pela sua flexibilidade de representar qualquer fenômeno, podendo ser analisado detalhadamente ou com ênfase na operação desejada, de forma isolada ou em conjunto com outras técnicas. Essa simulação é baseada em reproduzir o comportamento real de um sistema, através de um conjunto de ferramentas e equações matemáticas.

A este equacionamento matemático é associado um método numérico de solução e então transformados em uma seqüência ordenada de comandos. Não é necessário que o modelo reproduza todos os componentes físicos do sistema, mas talvez somente aqueles significativos, dependendo da confiabilidade exigida e do uso a que se destina o modelo. Na prática, a modelação de uma rede se reduz ao estudo de um esquema simplificado da mesma, cujas tubulações se associam os parâmetros adequados para reproduzir, o mais fielmente possível, seu comportamento efetivo. (GUMIER; LUVIZOTTO JR, 2007)

O processo de modelagem computacional compreende uma série de passos seqüenciais, recursivos e inter-relacionados. O resultado é uma ferramenta de fácil compreensão do sistema simulado, que muitas vezes pode ser complexo e de difícil entendimento. (AZEVEDO; PORTO; FILHO, 2000)

De acordo com Azevedo; Porto e Filho (2000), a simulação matemática compreende as seguintes etapas:

- Entendimento do fenômeno para desenvolvimento de um modelo computacional que responda as questões do problema a ser resolvido;
- Delimitação dos objetivos, restrições e critérios de forma consistente, afinal, compreendem o passo mais importante do processo de modelagem;
- Especificações das variáveis, parâmetros e propriedades para a formulação do modelo, e então a seleção de equações matemáticas e os algoritmos necessários para expressar as relações entre os processos (sendo essas teóricas, empíricas ou operacionais);
- Análise da estrutura, da lógica e da formulação, para certificação que o modelo atende a realidade e os seus propósitos;
- Fornecimento de dados e valores para calibração, checando a concordância do simulador com o sistema real;

- Avaliação do simulador, para constatar se é necessária a modificação de alguma etapa (com exceção dos objetivos, restrições e critérios);
- Realização de testes, como o teste de sensibilidade, para identificar a proximidade com os valores do sistema real e,
- Simulação do sistema, para conferir se atende os propósitos por que foi elaborado.

As etapas acima estão resumidas na Figura 1.

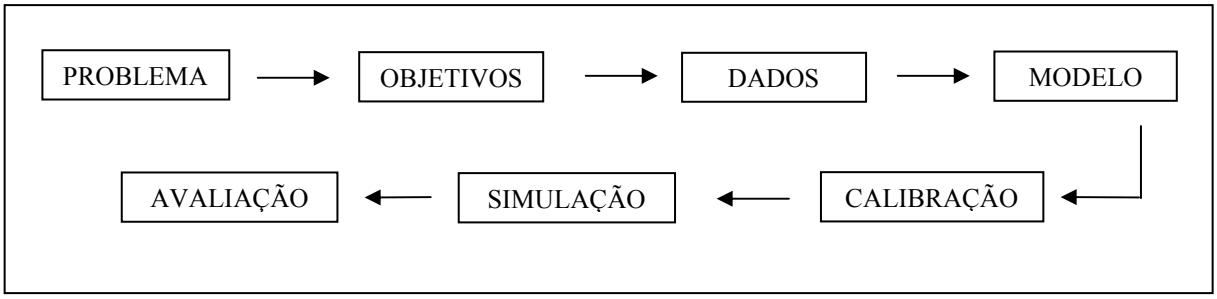

Figura 1. Processo de desenvolvimento de um simulador.

O avanço da tecnologia faz com que esses simuladores atendam cada vez mais as necessidades de seus usuários, resolvendo os mais complexos cálculos matemáticos de maneira rápida e precisa. (PALO, 2010)

Salienta-se que o sucesso da simulação em modelagens certamente ocorreu devido aos expressivos avanços da tecnologia da informação. (VICENTE, 2005)

O uso de simuladores hidráulicos minimiza custos, que são altos na simulação real dos sistemas, facilitam o aprendizado por simplificar a obtenção e compreensão dos resultados, estimulam a concepção de novas idéias e linhas de ação, são eficientes para treinamentos, permitem a previsão de impactos no sistema entre outros pontos positivos. (VICENTE, 2005)

A grande desvantagem da técnica de simulação é que não oferece aos usuários a oportunidade de restringir o espaço decisório e, por conseqüência, a solução de problemas é alcançada através do exaustivo processo de tentativa e erro (Azevedo et al, 2000).

Atualmente existem no mercado diversos modelos e softwares de modelagem matemática para desenvolvimento de análises hidráulicas em redes, sendo alguns:

- H2ONET – H2OMap – Montgomery Watson Inc.;
- SynerGEE – Stoner Workstation Service;
- EPANET – Environmental Protection Agency;
- WaterCAD - Bentley's Haestad Methods;
- Pipe2000 – KYPipe;
- FINESSE – Water Software Systens;
- PICCOLO – Safege, entre outros.

O modelo simulador hidráulico utilizado no presente trabalho é o EPANET, que é indiscutivelmente considerado o programa de modelagem hidráulica e de qualidade de água mais utilizado no mundo todo. (CUNHA, 2009; EPANET, 2011)

3.4 EPANET

O EPANET é um programa de computador, criado pela U.S. Environmental Protection Agency - EPA, que é a agência estatal dos Estados Unidos da América encarregada pelo Congresso de proteger os recursos naturais (terra, ar e recursos hídricos).

Esse programa é um modelo automatizado que permite simular o comportamento hidráulico estático e dinâmico e de qualidade da água de sistemas de distribuição de água pressurizados sujeitos a diversas condições operacionais, durante um determinado período de funcionamento.

O EPANET foi formulado para ser uma ferramenta estratégica de gestão operacional de sistema de distribuição de água.

Para a resolução do conjunto de equações não lineares que caracterizam os escoamentos sob pressão em um dado instante, especificamente as equações da continuidade, conservação de energia, resistência ao escoamento e a relação entre a vazão e a perda de carga, o modelo EPANET utiliza o Método Híbrido Nó-Malha, também designado por “Método do Gradiente”.

As principais características desse simulador são:

- Dimensão ilimitada do número de componentes da rede ser a analisada;
- Cálculo da perda de carga utilizando as fórmulas alternativas de *Hazen-Williams*, *Universal* ou *Chezy-Manning*;
- Modelação de bombas de rotação constante ou variável;
- Cálculo da energia de bombeamento e do seu custo;
- Modelação de diversos tipos de válvulas, entre elas, válvulas de seccionamento, retenção, reguladoras de pressão e de vazão;
- Aplicação de curvas de consumo nos nós.

Para simulação do comportamento hidráulico de um sistema de distribuição de água utilizando um software de simulação hidráulica é necessário introduzir ao modelo as características topológicas do sistema, bem como as suas condições de contorno. (CUNHA, 2009; EPANET, 2011)

A precisão do modelo hidráulico está diretamente associada à calibração do mesmo, portanto faz-se necessária uma análise para a validação da calibração antes do modelo ser aplicado para tomada de decisão. (VICENTE, 2005)

No item 3.3 estão apresentadas de forma resumida as aplicações para a construção topológica do modelo analisado nessa pesquisa.

3.5 Métodos de controle de vazão e pressão em sistemas de recalques

Sistemas de distribuição de água abastecidos diretamente por estações elevatórias ou boosteres, de forma geral, em função da curva de demanda do sistema são submetidos às condições operacionais tecnicamente e economicamente desfavoráveis. Isso se deve, pelo fato das demandas de consumo variarem constantemente ao longo de um período de consumo.

Nesse sentido, o controle da vazão em função da demanda pode ser considerado um recurso essencialmente necessário, uma vez que possibilita manter a pressão constante ou em um valor operacional previamente estabelecido. (GURGEL, 2006)

Em sistemas de bombeamento convencionais, o controle de vazão pode ser realizado por meio dos seguintes métodos.

3.5.1 Controle de vazão por estrangulamento de válvulas

Esse método é um dos mais utilizados. O conceito é o deslocamento do ponto de operação, através do aumento da perda de carga ocasionado pelo estrangulamento da válvula (redução do diâmetro da tubulação).

Observa-se na Figura 2 uma instalação de bombeamento utilizando a abertura e fechamento de uma válvula para variar a vazão em razão da alteração da altura manométrica ocasionada pela perda de carga localizada na válvula.

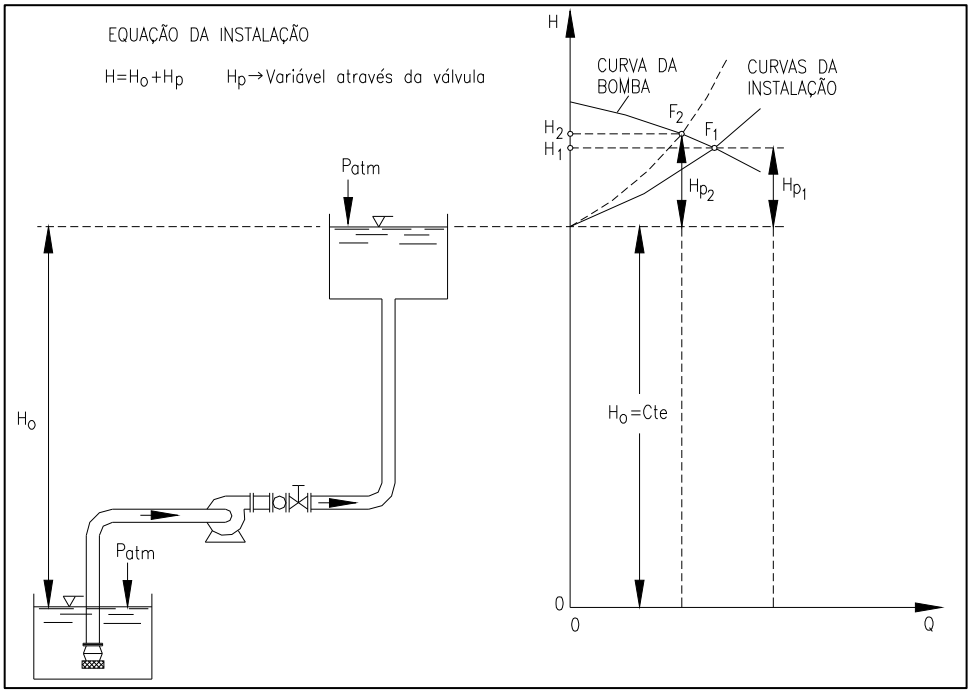

Figura 2. Abertura e fechamento de válvula.

Fonte: (VIANA, 2010)

3.5.2 Controle de vazão por by-pass na saída da bomba

O controle de vazão por esse método é feito através da abertura da válvula instalada no tubo de "by-pass" da bomba. Nesse caso, a vazão de recalque diminui à medida que se aciona a abertura da válvula, uma vez que a bomba passa a recalcar uma vazão de retorno pelo by-pass.

A Figura 3 apresentada abaixo demonstra uma instalação de bombeamento com by-pass.

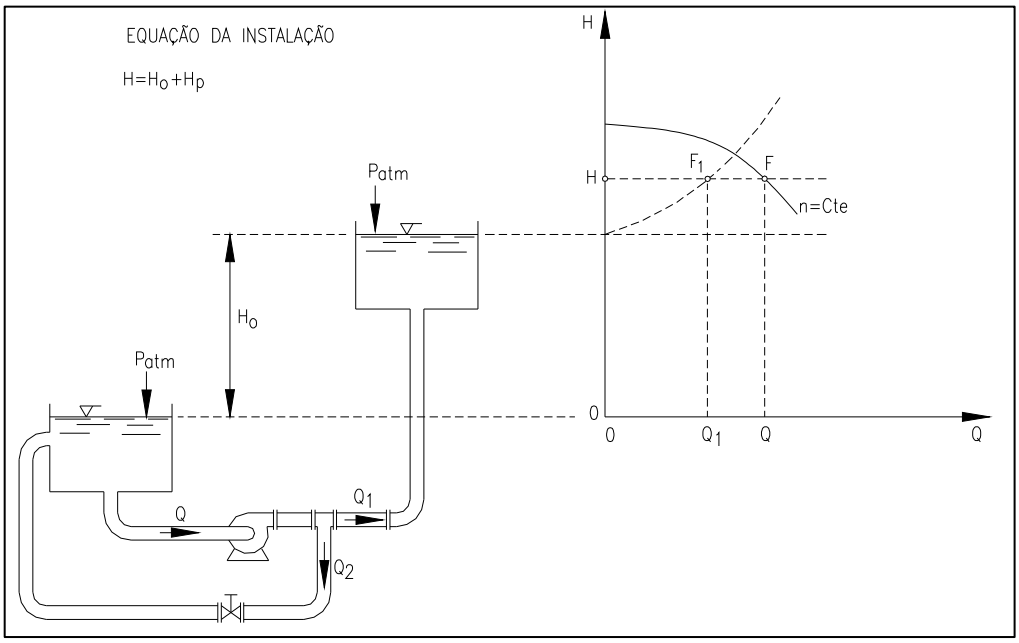

Figura 3. By-pass em instalação de bombeamento.

Fonte: (VIANA, 2010)

3.5.3 Variação de velocidade de rotação da bomba com uso de inversor de freqüência

O controle por esse recurso é realizado por meio da variação da velocidade de rotação da bomba, que ao ser sofrer alterações provoca o deslocamento da curva da bomba sobre a curva do sistema, conforme indica a Figura 4.

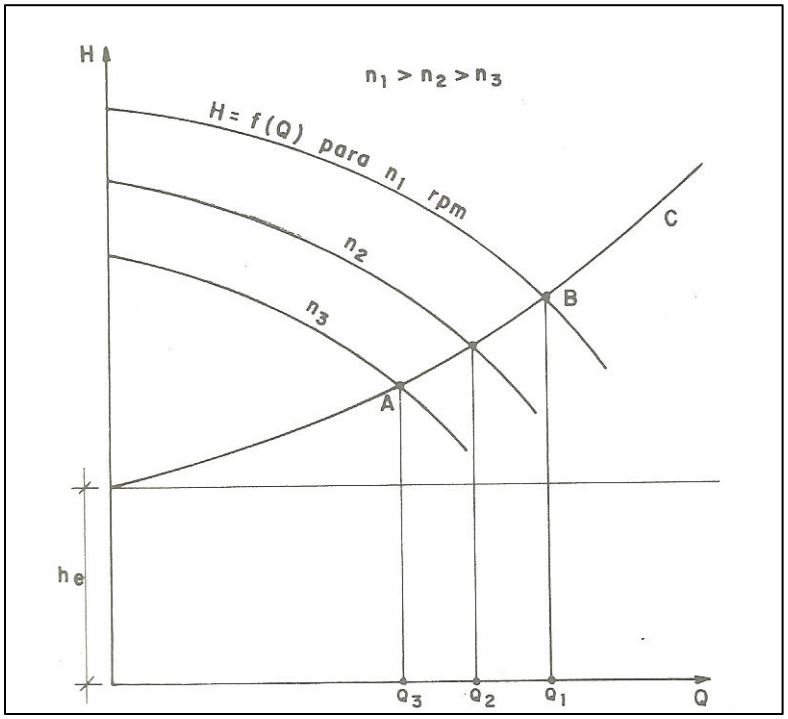

Figura 4. Variação da curva da bomba pela alteração da velocidade de rotação provocada pelo inversor de freqüência.

Fonte: (MACYNTIRE, 1987)

3.6 Inversor de freqüência

De acordo com Tsutiya (2004, apud Gurgel, 2006) o inversor de freqüência é um equipamento elétrico acoplado, entre outros, aos conjuntos moto-bomba, capaz de produzir uma variação dos valores da freqüência elétrica que alimenta o motor, produzindo uma variação da sua rotação ou velocidade.

No início dos anos 70 os tradicionais equipamentos que produziam variação de velocidades de rotação em máquinas hidráulicas eram os variadores mecânicos, hidráulicos e eletromagnéticos. (GURGEL, 2006)

Os variadores mecânicos utilizavam o motor de indução, polias, correias e outros dispositivos para promover a redução da velocidade. Já os variadores hidráulicos operavam através de acoplamentos hidráulicos e os eletromagnéticos usavam um sistema de discos acoplados a bobinas que podiam ter o seu campo magnético, e conseqüentemente, a variação da velocidade na saída do variador. (GURGEL, 2006; WEG)

A descrição do esquema de funcionamento e de seus principais componentes está apresentada no esquema elétrico representado pela Figura 5.

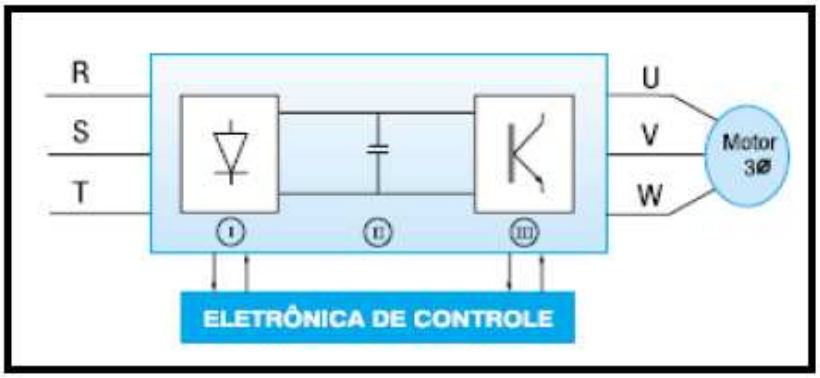

Figura 5. Esquema elétrico dos principais componentes de um inversor de freqüência.
Fonte: (GURGEL, 2006)

Sendo:

I – Circuito Retificador;

II – Circuito Intermediário;

III – Circuito Inversor (Chave eletrônica).

A concepção de funcionamento desse equipamento é formulada por meio das tensões alternadas de entrada, caracterizadas por R, S e T, que ao passarem pelo circuito retificador (I) é convertida em tensão contínua, que por sua vez é filtrada no circuito intermediário (II). Tal tensão contínua alimenta o circuito inversor, que através de transistores fornece um conjunto de correntes alternadas de freqüência (U, V e W) e de tensão variáveis, conforme indica a Figura 6. (GURGEL, 2006)

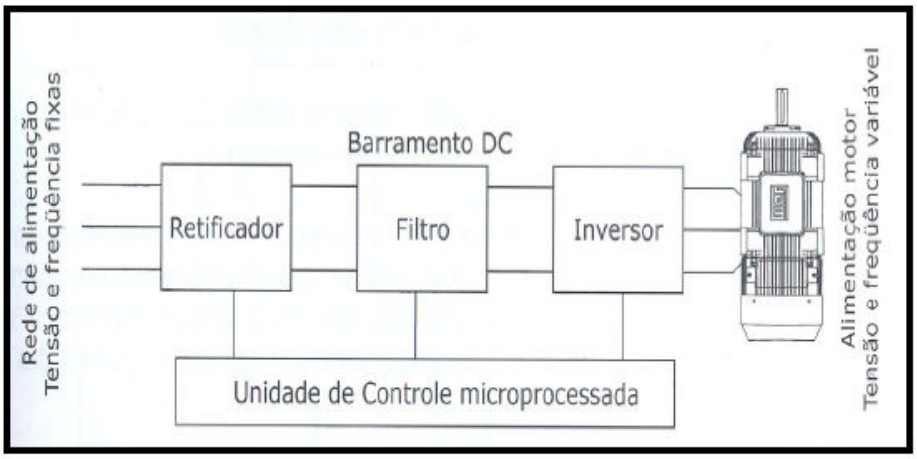

Figura 6. Componentes principais de um inversor de freqüência.
Fonte: (GURGEL, 2006)

Há dois tipos de inversores de freqüência, o de princípio de controle escalar e o de vetorial. O inversor quando é operado com controle escalar, o motor elétrico produz ruído, cuja intensidade varia de acordo com a velocidade de rotação, situação essa que não ocorre quando o controle vetorial. A WEG relata que esse fenômeno é produzido porque no controle vetorial a onda gerada se aproxima de uma onda senoidal perfeita, caso que não ocorre no escalar. (RODRIGUES, 2007; WEG)

O uso de motores elétricos de indução alimentados por inversores de freqüência vem se tornando um recurso cada vez mais atrativo e aplicável, devido às vantagens no controle operacional e na economia de consumo de eletricidade, e também pela redução do seu custo. (GURGEL, 2006)

Tsutiya (2004, apud Gurgel, 2006) alerta que há critérios para a escolha do motor elétrico que trabalhará com um inversor de freqüência. O inversor sempre deverá ter a sua corrente nominal maior ou igual à corrente nominal do motor elétrico, pois o inversor poderá ter várias correntes nominais diferentes em função do tipo de carga e da freqüência do chaveamento.

O dimensionamento dos inversores pode ser feito a partir dos dados da corrente nominal do motor elétrico e da tensão, que podem ser combinados com o auxilio do catálogo do fabricante.

3.6.1 Efeito do inversor de freqüência no bombeamento

A velocidade de rotação das máquinas hidráulicas, quando submetida a alterações, provoca mudanças no funcionamento da bomba e no ponto de operação do sistema.

Os efeitos na curva característica de uma bomba centrífuga de um mesmo rotor, operada em diferentes velocidades de rotação, são calculados pelas leis de semelhança física das máquinas hidráulicas rotativas. (VIANA, 2010; RODRIGUES, 2007; GURGEL, 2006; MACINTYRE, 1987)

$$\frac{Q_R}{N_R} = \frac{Q}{N} \qquad \textit{Relação vazão x rotação} \qquad (1)$$

$$\frac{H_R}{N_R^2} = \frac{H}{N^2} \qquad \textit{Relação carga x rotação} \qquad (2)$$

$$\frac{P_R}{N_R^3} = \frac{P}{N^3} \qquad \textit{Relação potência x rotação} \qquad (3)$$

$$\frac{T_R}{N_R^2} = \frac{T}{N^2} \qquad \textit{Relação torque x rotação} \qquad (4)$$

$$\frac{NPSH_{RR}}{N_R^2} = \frac{NPSH_R}{N^2} \qquad \textit{Relação NPSH Requerido x rotação} \qquad (5)$$

Sendo,

N_R e N = Velocidade de rotação da bomba;

Q_R e Q = Vazão relativa à rotação da bomba;

H_R e H = Altura manométrica total relativa à rotação da bomba;

P_R e P = Potência consumida da bomba relativa à rotação da bomba;

T1 e T = Torque relativo à rotação da bomba;

$NPSH_{RR}$ e NPSHR = NPSH relativo à rotação da bomba;

O efeito da variação da rotação sobre os parâmetros característicos operacionais da bomba pode ser deduzido com base nas leis de semelhança acima descritas:

$$H = a + bQ_R + cQ_R{}^2 \qquad \textit{Curva carga x vazão para a rotação nominal } N_R \qquad (6)$$

A curva de carga x vazão para um rotação N pode der descrita, tendo por base as equações 1, 2 e 6:

Da equação 2: $H = \frac{H_R}{N_R^2} \times N^2 \rightarrow H = \left(\frac{N}{N_R}\right)^2 \times H_R$

Assim: $H = \left(\frac{N}{N_R}\right)^2 \times \left(a + bQ_R + cQ_R^2\right) = \left(\frac{N}{N_R}\right)^2 a + \left(\frac{N}{N_R}\right)^2 bQ_R + \left(\frac{N}{N_R}\right)^2 cQ_R^2$

Da equação 1: $Q = \left(\frac{N}{N_R}\right) Q_R$

Assim: $H = \left(\frac{N}{N_R}\right)^2 a + \underbrace{\left(\frac{N}{N_R}\right) Q_R}_{Q} \left(\frac{N}{N_R}\right) b + \underbrace{\left(\frac{N}{N_R}\right)^2 Q_R^2 c}_{Q^2} \rightarrow$

$$H = \left(\frac{N}{N_R}\right)^2 a + b \left(\frac{N}{N_R}\right) Q + cQ^2 \qquad \textit{Curva carga x vazão para a rotação } N \qquad (7)$$

Já a curva de potência para uma rotação N pode der descrita, tendo por base a equação 3:

$$Pot = \left(\frac{N}{N_R}\right)^3 \times Pot_R$$

Sendo: $Pot_R = \frac{\gamma \; Q_R \; H_R}{\eta_R}$

Assim: $Pot = \left(\frac{N}{N_R}\right)^3 \times \frac{\gamma\ Q_R\ H_R}{\eta_R}$ *Curva de potência para a rotação N* *(8)*

A Figura 7 mostra o campo básico de funcionamento de uma bomba centrífuga, conhecido como diagrama de colina, que apresenta a relação entre vazão (Q), altura manométrica (H), curvas de rendimento total (ηt) para diferentes velocidades de rotação (n_1 a n_4) constantes. (VIANA (2010)

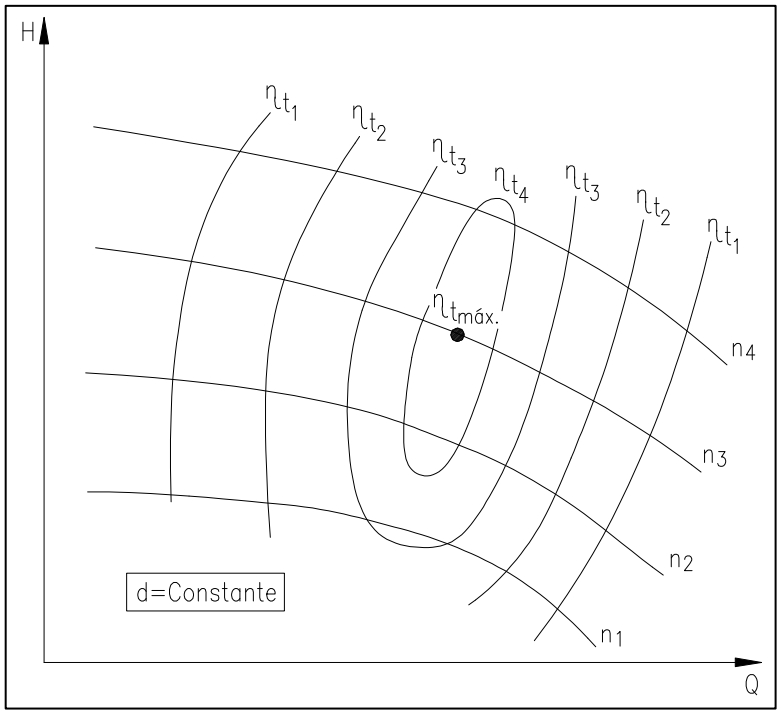

Figura 7. Diagrama de colina de uma bomba centrífuga.

Fonte: (VIANA, 2010)

A Figura 8 apresenta a interseção das curvas características da bomba com as curvas característica do sistema, para as rotações N1, N2 e N3.

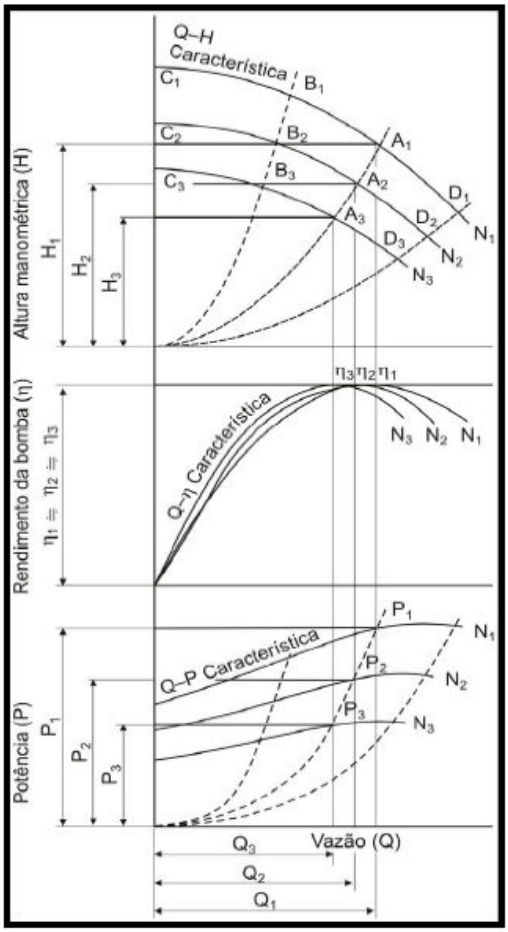

Figura 8. Relações características de bombas centrífugas.

Fonte: (GURGEL, 2006)

3.6.2 Redução de custos com aplicação de inversores de freqüência em bombas de rotação variável

Em uma ampla pesquisa bibliográfica sobre o uso de inversor de freqüência em sistemas de abastecimento de água, pode-se averiguar que o preponderante objetivo de aplicação do mesmo nas companhias de saneamento é a economia de consumo de energia elétrica e, em seqüência, a otimização operacional do sistema.

A COMUSA - Companhia Municipal de Saneamento de Novo Hamburgo, por meio de um programa de conservação de energia elétrica, iniciou em 2004 a aplicação de inversores de freqüência nas máquinas hidráulicas submersas que abastecem um setor do sistema de distribuição de água da cidade de Novo Hamburgo – RS, e registraram uma redução mensal de consumo de energia elétrica de 62,3%, um resultado expressivamente satisfatório, que certamente contribuiu ao alcance das metas estabelecidas pelo programa e tem servido de modelo para ser aplicado às demais estações pressurizadoras da cidade. (ALTMANN; LANG; RIGON)

No sistema de abastecimento de água do município litorâneo de Ubatuba – SP, operado pela companhia estatal SABESP, foi registrada uma economia média de energia de 30% na operação da estação pressurizadora denominada Booster Toninhas. (GURGEL, 2006)

A operação do motor elétrico a uma velocidade de 80% da nominal resulta em uma economia de consumo de energia elétrica da ordem de 50%. Já a fabricante de motores elétricos e inversores de freqüência WEG cita que a aplicação de inversores em bombas centrífugas com a redução controlada da potência dos motores resulta uma economia de energia elétrica entre 20 a 50%. Através da lei de semelhança uma redução de 10% nas velocidades de rotação das máquinas hidráulicas representa uma economia de energia elétrica de 27%. (GURGEL, 2006)

3.6.3 Vantagens e desvantagens do uso do inversor de freqüência

O uso de inversores de freqüência em sistemas de abastecimento de água proporciona as seguintes vantagens:

- Redução de consumo e gastos com energia elétrica devido ao uso eficiente do recurso;
- Adequação das pressões a uma faixa operacional próximas aos níveis mínimos requeridos;
- Variação de vazão sem geração de perda de carga;
- Redução de rompimentos de redes provocados por excesso de pressão e, por conseguinte, redução de perdas físicas;

- Controle operacional das bombas ajustável, que pode ser feito remotamente pelo Centro de Telecontrole;
- Minimização do transiente hidráulico provocado durante o acionamento e a desativação (parada) de bombas, pois o conjunto moto-bomba pode ser acelerado e desacelerado gradativamente, de acordo com a parametrização pré estabelecida. Com isso reduzem o "stress" no motor, bomba e acoplamento;
- Aplicável em motores assíncronos e síncronos;
- Aumento da vida útil de equipamento e acessórios, tais como mancais e vedações;
- Redução do nível de ruído, vibração e cavitação, e simplificação da instalação, através da eliminação de válvulas, que em dados momentos são ou podem ser parcialmente abertas para controle de fluxo;
- Melhoria no fator de potência do equipamento;
- Contribui diretamente ao uso racional dos recursos naturais e a sustentabilidade ambiental, uma vez que o uso eficiente reduz o consumo de tal recurso, proporcionando o tardamento de investimento necessário para o aumento de produção de eletricidade e conseqüente evita a formação de impactos ambientais (aquecimento global, desertificação, poluição da água, ar e solo, entre outros) que potencialmente são provocados no processo de transformação de energias em eletricidade. (RODRIGUES, 2007; BARRETO, et al.,2007)

E suas principais desvantagens, são:

- Alto custo de investimento;
- Necessidade de mão de obra tecnicamente especializada;
- Aumento da temperatura na superfície dos motores, podendo ultrapassar o limite máximo de temperatura permitida para o local;
- Mudança dos parâmetros da bomba (rendimento, NPSH, potencia e etc);
- Danificação dos materiais isolantes do motor devido o aumento da temperatura decorrente da queda na ventilação provocada pela diminuição das velocidades de rotação;

- Introduz harmônicos no sistema que afetam a qualidade de energia que ocasiona a perda de rendimento dos conjuntos MB e interferências eletromagnéticas indesejáveis em outros equipamentos;
- Necessidade de que a instalação deva ser feitas em ambientes menos agressivos, pois os componentes eletrônicos do inversor são menos tolerantes a locais corrosivos e de alta umidade. (RODRIGUES, 2007; BARRETO, et al.,2007)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Sistema de abastecimento de água do município de Limeira

O sistema de abastecimento de água a ser explorado como objeto de estudo desse trabalho é o do município de Limeira – SP.

Limeira está localizada na região central do Estado de São Paulo, a 154 km a noroeste da capital, fazendo divisa ao norte com os municípios de Cordeirópolis e Araras, ao leste com Arthur Nogueira e Cosmópolis, ao sul com Americana e Santa Barbara D'Oeste e ao oeste com Iracemápolis e Piracicaba.

Inserida em uma região marcada por forte concentração industrial, a estrutura industrial da cidade apresenta como principais ramos de atividades os setores de metalurgia, mecânica, alimentícia, papel e celulose e principalmente o de jóias e folheados, que intitula a cidade como a capital nacional de jóias e folheados.

De acordo com o levantamento censitário realizado pelo IBGE em 2010, Limeira congrega 276.022 habitantes, 74.510 imóveis residenciais, 10.197 imóveis comerciais e 781 indústrias. (IBGE, 2010)

O município pertence à Bacia Hidrográfica do Piracicaba, sendo seus três principais cursos d'água o Rio Jaguari, o Ribeirão do Tatu e o Ribeirão do Pinhal, conforme indica a Figura 9. (FOZ DE LIMEIRA, 2010)

Figura 9. Localização de Limeira na bacia do PCJ.

Fonte: (FOZ DE LIMEIRA, 2010)

Os serviços de captação, tratamento, reservação e distribuição de água, e coleta, tratamento e afastamento de esgotos sanitários de Limeira são executados, com exclusividade, pela concessionária Foz do Brasil – Limeira.

No início da operação a concessionária se deparou com um sistema de abastecimento de água comprometido, onde os pontos mais elevados e distantes não eram efetivamente abastecidos com regularidade, havia constante incidência de água vermelha, reservatórios com vazamentos e transbordamento, pressões em redes oscilantes, cadastro técnico de redes com pouca confiabilidade, execução de redes e ligações de baixa qualidade, perdas de água superior a 45% do volume produzido e equipes com pouca qualificação técnica.

A eficiência operacional do sistema foi alcançada através da disseminação de informações sobre a necessidade de otimização do sistema, tendo em vista o índice de perdas de água e de energia elétrica e o comprometimento do abastecimento da cidade. Ações conjuntas e sistêmicas entre as todas as áreas e seus colaboradores surgiram de uma mudança na cultura, que tem preconizado o conceito de otimizar o sistema como um objetivo global.

A união de esforços resultou em um conjunto de ações, dentre as quais, destacam-se:

- Elaboração de planilhas e indicadores de desempenho com acompanhamentos mensais;

- Elaboração de novos procedimentos;
- Inspeções noturnas em reservatórios e elevatórias para detecção de vazamentos visíveis;
- Renovação de redes com base no tipo de material, vida útil e estado de funcionamento;
- Troca sistemática de registros e hidrômetros;
- Padronização na execução de redes e acessórios;
- Setorização de zonas de pressão;
- Macromedição – setorização de zonas de macromedição e instalação de macromedidores;
- Instalação de válvulas redutoras de pressão;
- Implantação de ferramentas de gestão para o controle de perdas;
- Formação de uma equipe de controle de águas não faturadas, composta por profissionais multidisciplinares das áreas técnica, comercial e de sistemas, que se reúnem mensalmente para analisar resultados, priorizar ações e intervenções e realizar estudos de caso;
- Formação de equipes de detecção de vazamentos não visíveis e de fraudes;
- Tratamento de fissuras nas instalações;
- Treinamento interno das equipes de produção, distribuição e manutenção de redes;
- Diagnóstico e substituição do parque de hidrômetros;
- Automação e controle remoto das estações elevatórias de água e;
- Instalação de inversores de freqüência em conjuntos moto-bomba.

O sistema de abastecimento de água do município inicia-se com a captação superficial nos mananciais Rio Jaguari e Ribeirão Pinhal, vide a Figura 10.

Figura 10. Sistema de captação de água no rio Jaguari e no ribeirão Pinhal.

O volume captado é aduzido até a Estação de Tratamento de Água – ETA, por meio de duas Estações Elevatórias de Água Bruta - EEAB e 15 km de adutoras, como mostram as Figuras 11 e 12.

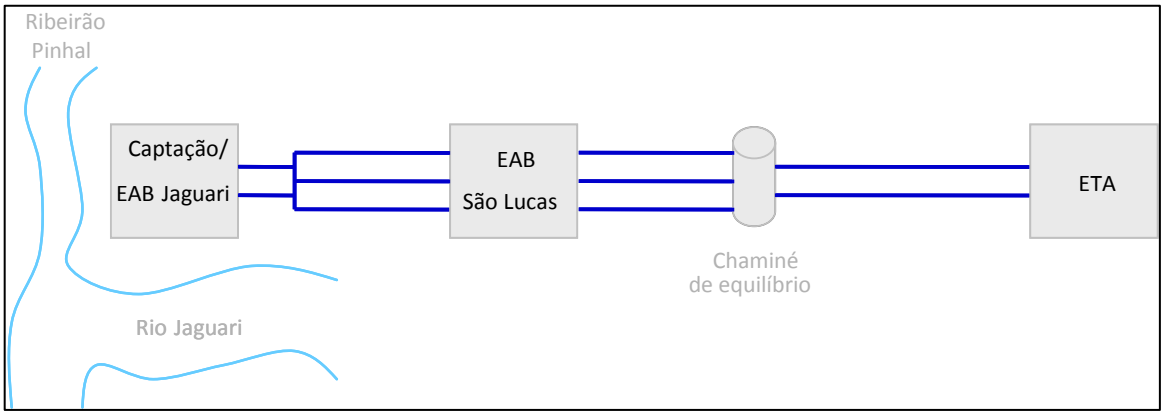

Figura 11. Sistema de adução de água bruta.

Fonte: (FOZ DE LIMEIRA, 2010)

Figura 12. Estação de tratamento de água.

Fonte: (FOZ DE LIMEIRA, 2010)

O sistema de abastecimento de água tratada da cidade é composto por sete estações elevatórias de água, um booster, vinte e um reservatórios apoiados e elevados, 1.056,951 km de

redes e 90.237 ligações ativas de água, tendo por principais dados característicos operacionais os apresentados a seguir (FOZ DE LIMEIRA, 2010):

- Índice de atendimento de água: 100%;
- Volume médio mensal de água disponibilizada em 2010: 1.836.229 m³;
- Demanda média per capita em 2010: 188,39 litros/habitantes x dia;
- Índice médio de perdas de água na distribuição (diferença entre o volume de água disponibilizado para a distribuição e o volume de água consumido) em 2010: 14,43%;
- Índice médio de perdas por ramal de água em 2010: 97,52 l/ramal x dia;
- Pressão mínima dinâmica e máxima estática: 15 mca e 75 mca, respectivamente;
- Consumo de energia elétrica do sistema de água (captação, tratamento, reservação e distribuição) em 2010: 26,13 GWh, o equivalente a um custo R$ 6.089.885,80, a 11,74% da despesa anual global e a 3,57% do consumo global de energia elétrica do município de Limeira;
- Consumo médio mensal de energia elétrica do sistema de água (captação, tratamento, reservação e distribuição) em 2010: 2.177.107 kWh ou 2,17 GWh.

Na Figura 13 está apontada a localização de todas as estações elevatórias de água tratada e não tratada do município.

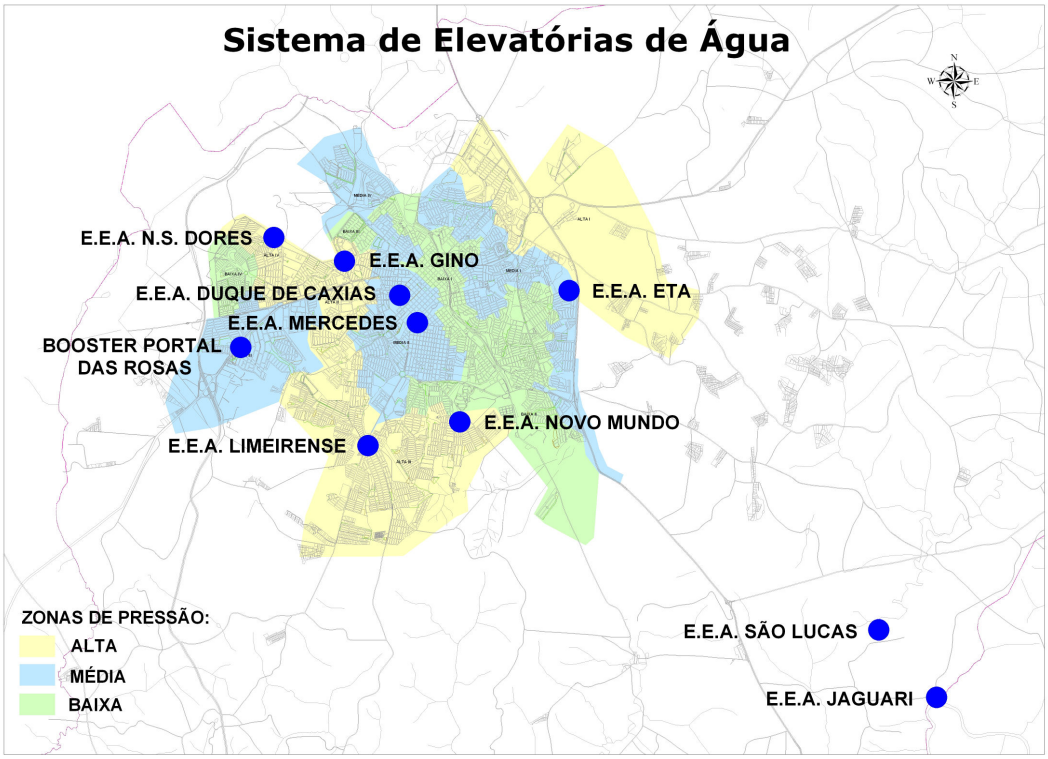

Figura 13. Localização das estações elevatórias de água.

Já na Figura 14 é apresentado o fluxograma geral do abastecimento e distribuição de água do município.

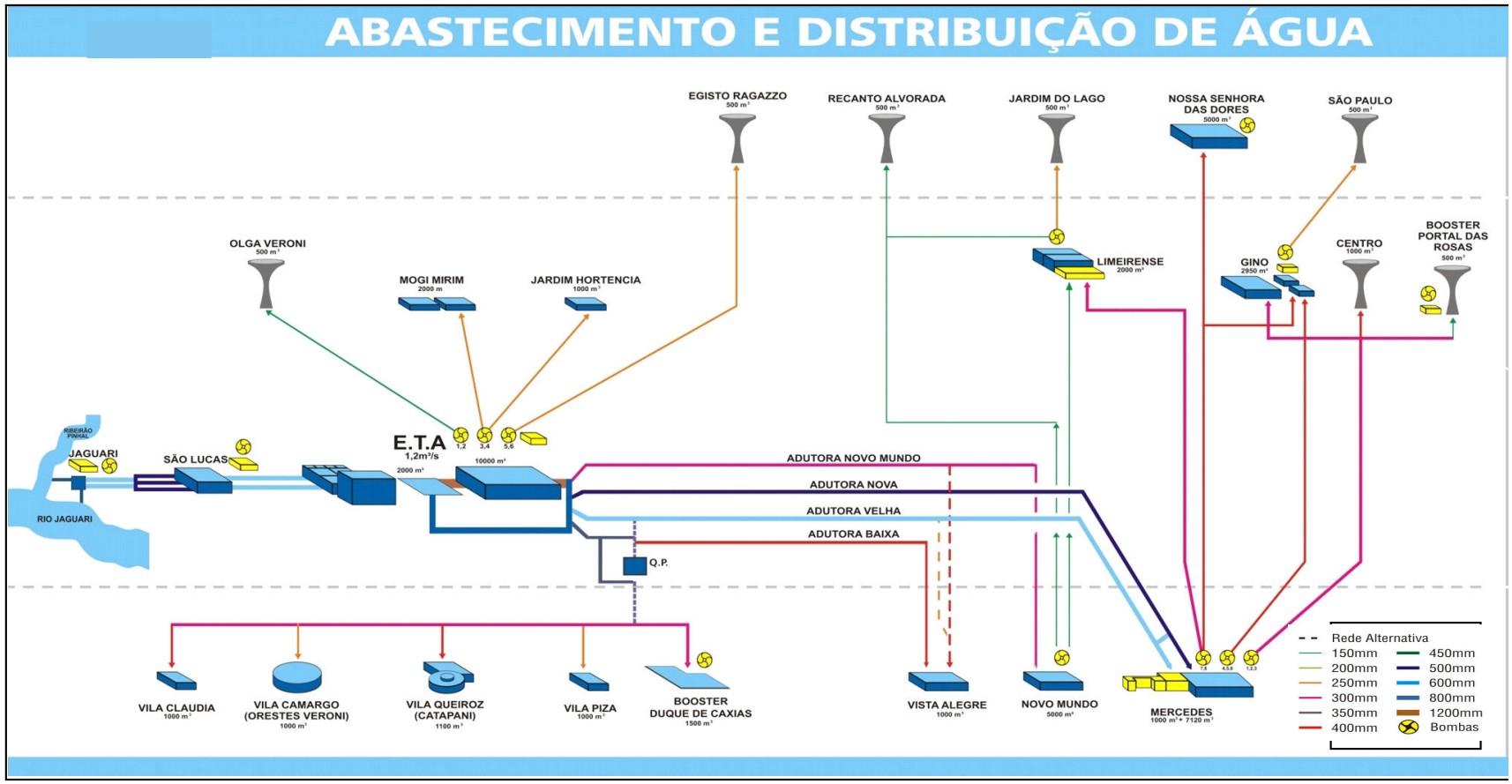

Figura 14. Fluxograma geral do abastecimento e distribuição de água de Limeira.

Fonte: (FOZ DE LIMEIRA, 2010)

A figura apresentada a seguir demonstra o cadastro digital das redes de água primária e secundária do sistema de abastecimento de água do município de Limeira-SP.

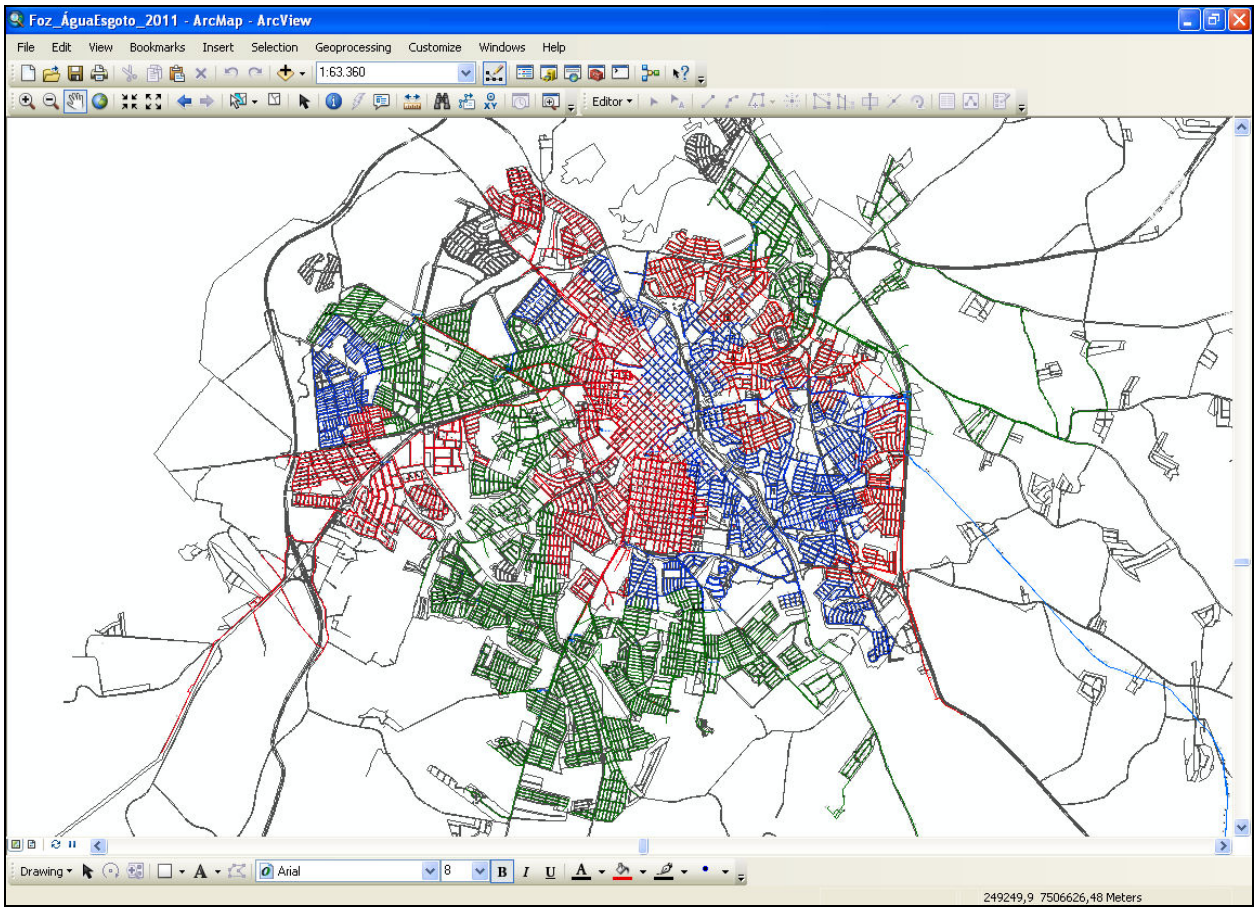

Figura 15. Cadastro digital das redes de distribuição de água primárias e secundárias.

Conforme citado anteriormente, a eficiência operacional desse sistema de abastecimento foi alcançada mediante um conjunto de ações integradas. Dentre tais, destaca-se a setorização do mesmo em Zonas de Pressão – ZP e Zonas de Macro medição – ZM. De acordo com as Figuras 16 e 17, o sistema é dividido em 12 Zonas de Pressão e 41 Zonas de Macro Medição.

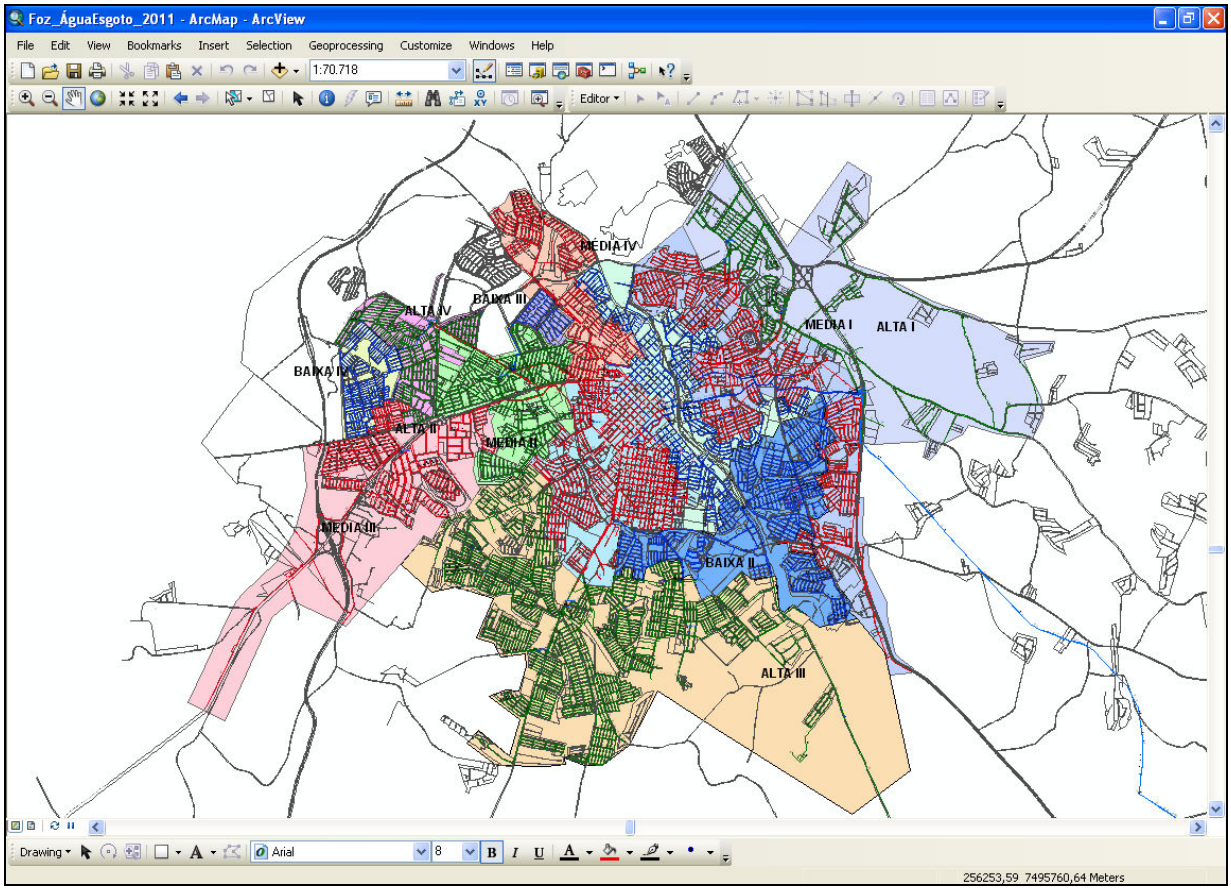

Figura 16. Sistema de distribuição de água setorizado em zonas de pressão.

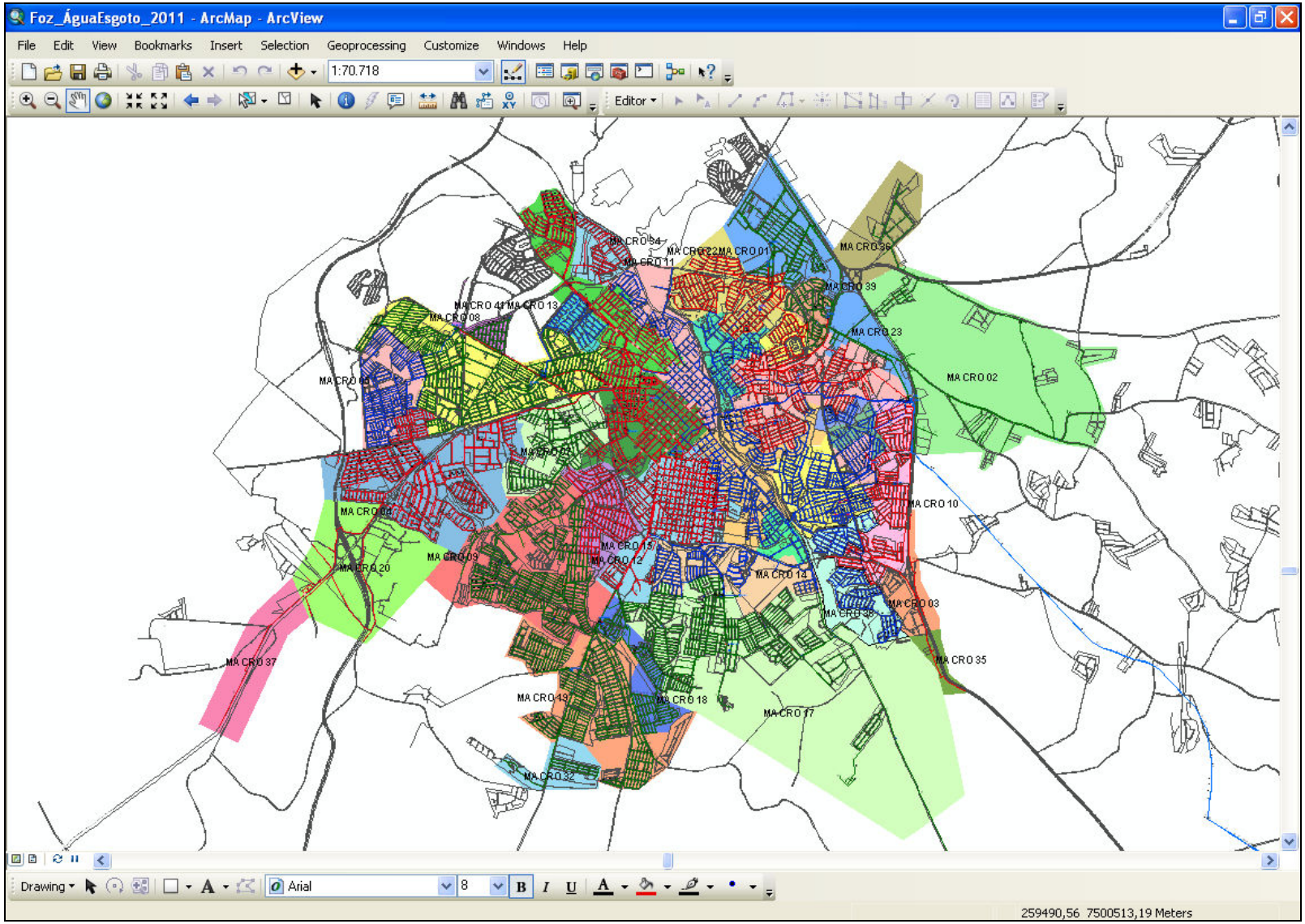

Figura 17. Sistema de distribuição de água setorizado em zonas de macro medição.

O alvo de investigação dessa pesquisa é a região abastecida pela Estação Elevatória de Água Tratada / Booster Duque de Caxias, que compreende as Zonas de Macro medição 11 e 34 e a Zona de Pressão Média IV.

4.2 Sistema objeto do estudo

4.2.1 Estação elevatória de água tratada / booster Duque de Caxias

A Estação Elevatória de Água Tratada / Booster Duque de Caxias, composta por um reservatório enterrado de capacidade 1.500 m³ e dois conjuntos moto bomba (1+1) de eixo horizontal operados isoladamente em sistema de revezamento é responsável pelo abastecimento de uma região que comprende uma Zona de Pressão, denominada Média IV e duas Zonas de Macromedição, sendo elas denominadas de 11 e 34, que em 2010 agregaram 62,97 quilômetros de redes de águas e 3.814 ligações ativas de água.

No mesmo período essa estação pressurizadora de água tratada disponibilizou 1.021.665 m³ de água, o equivalente a uma vazão média de 116,63 m³/h, vide a Tabela 9 e também consumiu 269.739 kWh de energia, que resultou um custo de R$ 81.883,56, conforme indica a Tabela 6.

Tabela 6. Consumo e gastos com energia elétrica em 2010 da estação elevatória / booster Duque de Caxias.

Consumo e custos com energia elétrica em 2010		
Mês	**Consumo kWh**	**Valor da Conta**
Janeiro	23.903	R$ 6.300,55
Fevereiro	21.320	R$ 5.969,30
Março	20.664	R$ 6.532,66
Abril	21.484	R$ 6.017,47
Maio	20.213	R$ 5.653,31
Junho	19.352	R$ 5.412,74
Julho	21.607	R$ 6.544,22
Agosto	21.402	R$ 5.928,96
Setembro	23.288	R$ 8.522,20
Outubro	25.953	R$ 9.163,00
Novembro	25.338	R$ 8.030,08
Dezembro	25.215	R$ 7.809,07
Total	269.739	R$ 81.883,56

Essa estação é enquadrada no regime de tarifação de energia elétrica Convencional – "Grupo A – A4, com demanda contratada de 96 kW.

Dependendo das condições operacionais, no que diz respeito à pressão de chegada e o nível de água no Reservatório Duque de Caxias, esta pode operar de modo Estação Elevatória ou Booster.

- Booster: Pressão de entrada maior que 0,5 mca;
- Elevatória: Pressão de entrada menor ou igual à 0,5 mca, voltando a operar novamente como Booster, somente quando a pressão de entrada atingir 15 mca.

As Figuras 18 e 19 ilustram a localização e as instalações da estação Duque de Caxias.

Figura 18. Fachada da estação elevatória de água / booster Duque de Caxias.

Figura 19. Reservatório de água da estação elevatória de água / booster Duque de Caxias.

O sistema de recalque dessa estação pressurizadora é composto por dois conjuntos motor-bomba, cujos dados característicos estão dispostos abaixo e na Figura 20.

- Número de bombas: (1+1R);
- Bomba KSB Meganorm 125-400;
- Q= 85,4 l/s – 307,4 m³/h;
- Hman= 68,60 mca;
- Diâmetro do rotor: 389 mm;
- Rendimento: 77%;
- Rotação: 1750 rpm;
- Potência do motor: 101 cv.

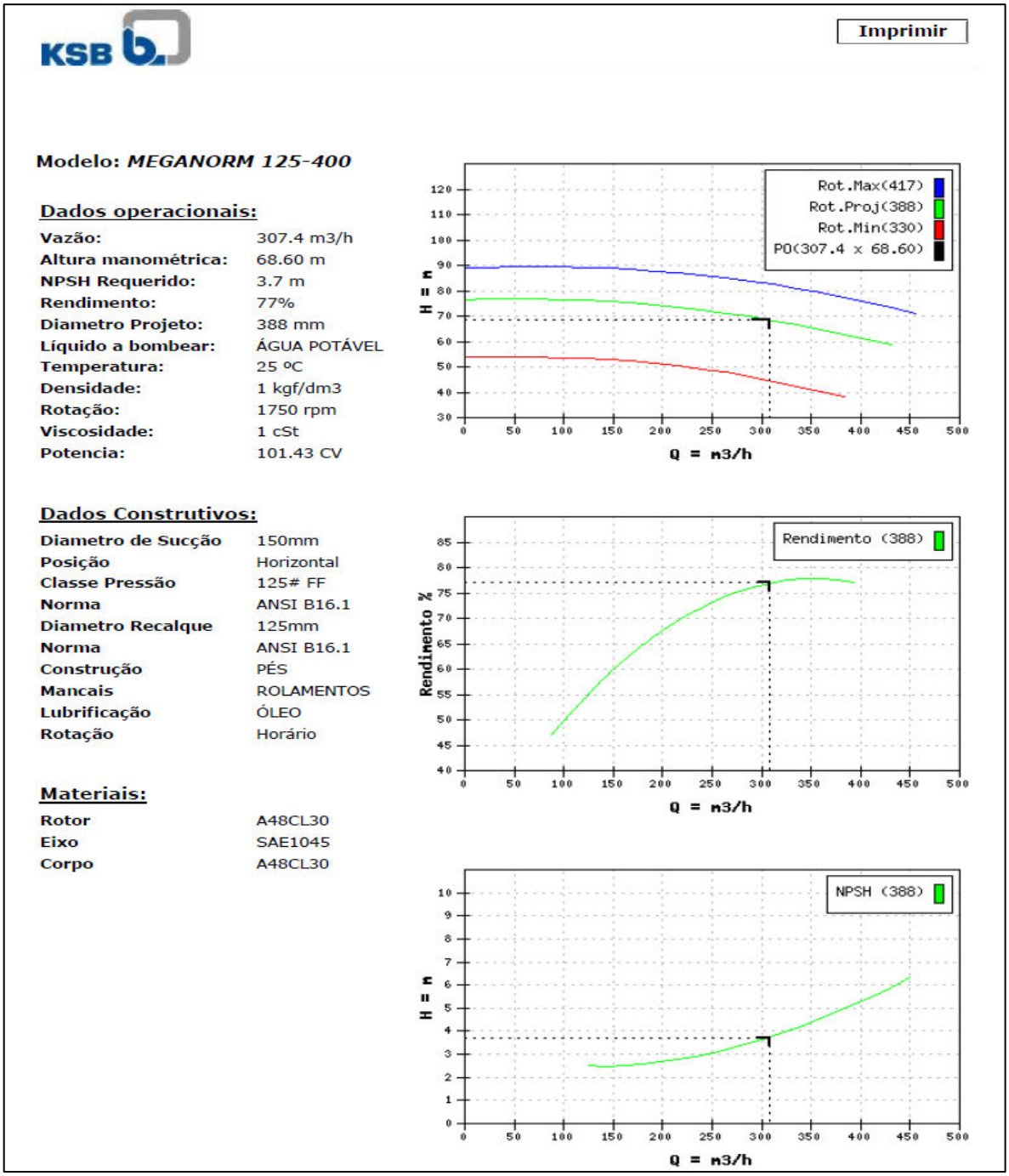

Figura 20. Curva de performance da máquina hidráulica instalada na estação elevatória de água / booster Duque de Caxias.

Fonte: KSB Bombas

Nas Tabelas 7 e 8 estão caracterizados os dados das bombas e dos inversores de freqüência instalados na estação.

Tabela 7. Características das bombas.

Bomba	Marca/ Modelo	Vazão/AMT (m^3/h – m)	Potência (cv)
1	KSB/Meganorm 125-400	310/69	101
2	KSB/Meganorm 125-400	310/69	101

Tabela 8. Características do inversor de freqüência.

Inversor	Marca/ Modelo	Tipo	Potência (cv)/A
VC - 001	Schneider/ ATV61HD90N4	Microprocessador Digital	101/151

O sistema operacional dessa unidade é realizado num ciclo contínuo de 24 horas ininterruptas em condição de revezamento dos conjuntos moto-bomba. A experiência na operação desse sistema fez com que a concessionária estabelecesse um critério operacional de pressão na saída do bombeamento, que varia de 38 mca a 67 mca, de acordo com os horários de consumo, de tal forma que seja disponibilizada uma pressão dinâmica no ponto mais distante e crítico do sistema, variando entre 11 mca a 25 mca ao longo do dia.

Todo esse sistema é operado remotamente através do CCO, que recebe informações em tempo real (“on line”) de pressões, vazões, níveis de reservação e velocidades de rotação da bomba.

As Figuras 21 e 22 apresentam estrutura da casa de bombas dessa unidade de bombeamento.

Figura 21. Casa de bombas da estação elevatória de água.

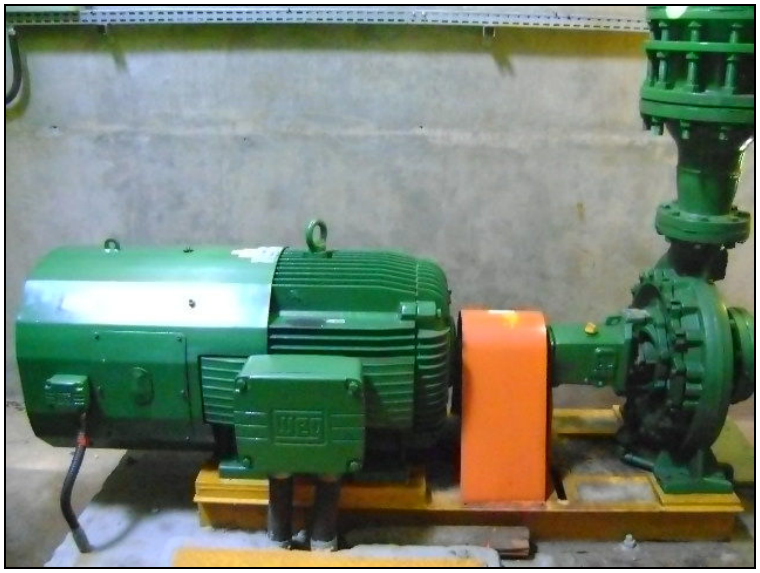

Figura 22. Conjunto moto-bomba da estação elevatória.

As Figuras 23 a 26 apresentam o transdutor de pressão e velocidade de rotação da bomba e o conversor de sinal do medidor de vazão.

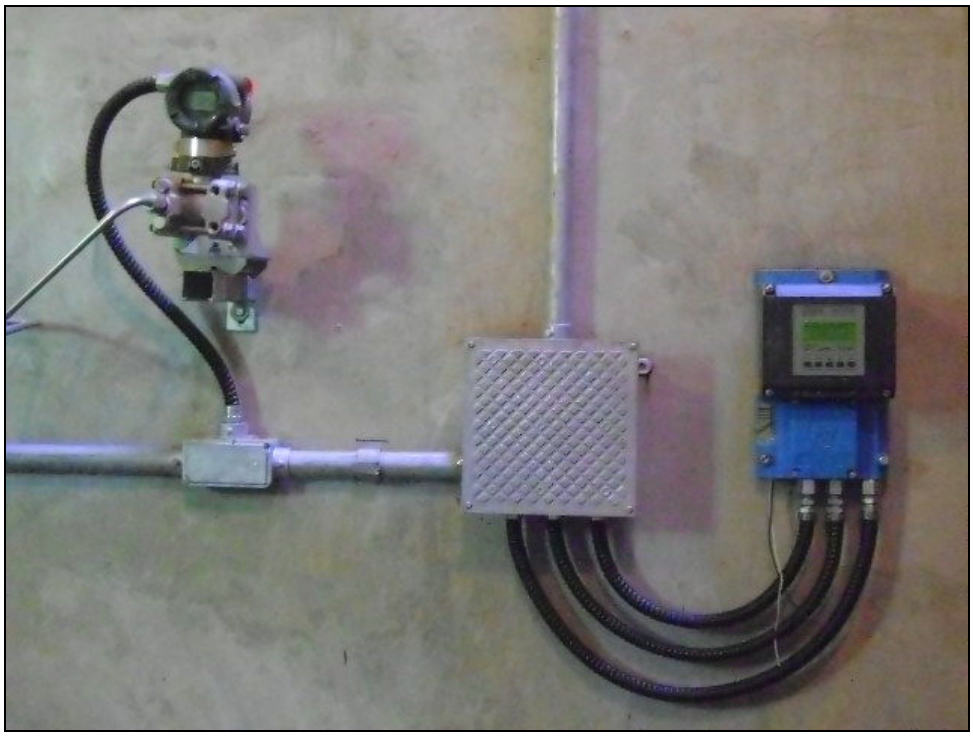

Figura 23. Transdutor de pressão e velocidade de rotação e medidor de vazão e totalizador de volume.

Figura 24. Transdutor programado para transmissão de dados de pressão.

Figura 25. Transdutor programado para transmissão de dados de rotação da bomba.

Figura 26. Medidor de vazão e totalizador de volume.

As Figuras 27 e 28 apresentam o painel de comando remoto geral da estação e o painel de comando local do inversor de freqüência.

Figura 27. Painéis de comando remoto da EEA/Booster Duque de Caxias.

Figura 28. Painel de comando local do inversor de freqüência da EEA/Booster Duque de Caxias.

A análise do desempenho energético da máquina hidráulica instalada nessa estação elevatória de água remotamente controlada e ajustada por parâmetros operacionais pré estabelecidos pela concessionária será realizada mediante o emprego da modelagem hidráulica do sistema no software EPANET V 2.0, que possibilitará avaliar com razoável precisão as diversas condições operacionais das redes hidráulicas quando submetidas a diferentes condições de contorno, além das de projeto.

4.3 Modelagem matemática do sistema

4.3.1 Metodologia empregada no estudo

Para a definição das características hidráulicas do sistema de abastecimento de água em questão, os dados topológicos reais necessários para a constituição do modelo matemático foram com presteza fornecidos pela Foz do Brasil de Limeira.

Informações referentes a diâmetros, tipo de material, extensões das redes primárias e secundárias e cotas de níveis foram extraídas do cadastro técnico das redes e acessórios de água disposto no Sistema de Informações Geográficas – SIG em formato de shapes – ARCVIEW, que estão em coordenadas georreferenciadas (UTM), conforme disposto nas Figuras de número 29, 30 e 31.

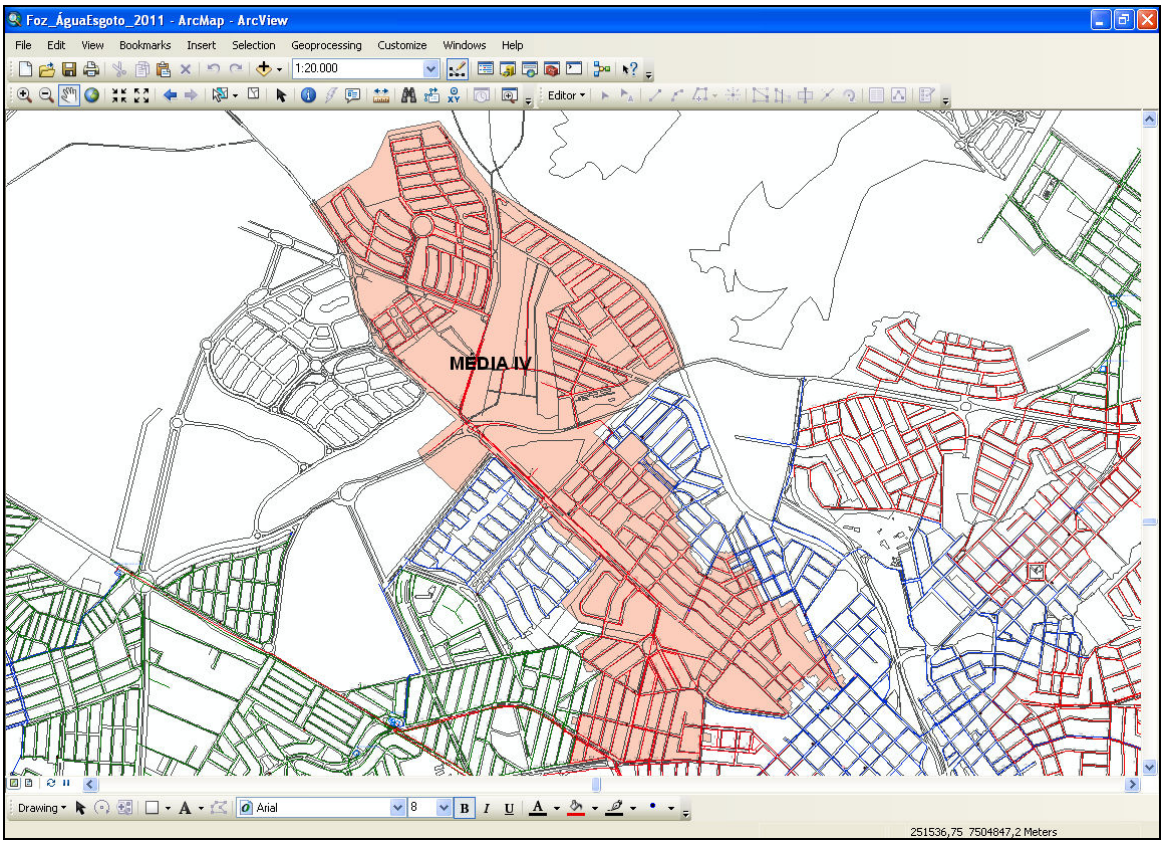

Figura 29. Cadastro digital do sistema destacado pela Zona de Pressão Média IV.

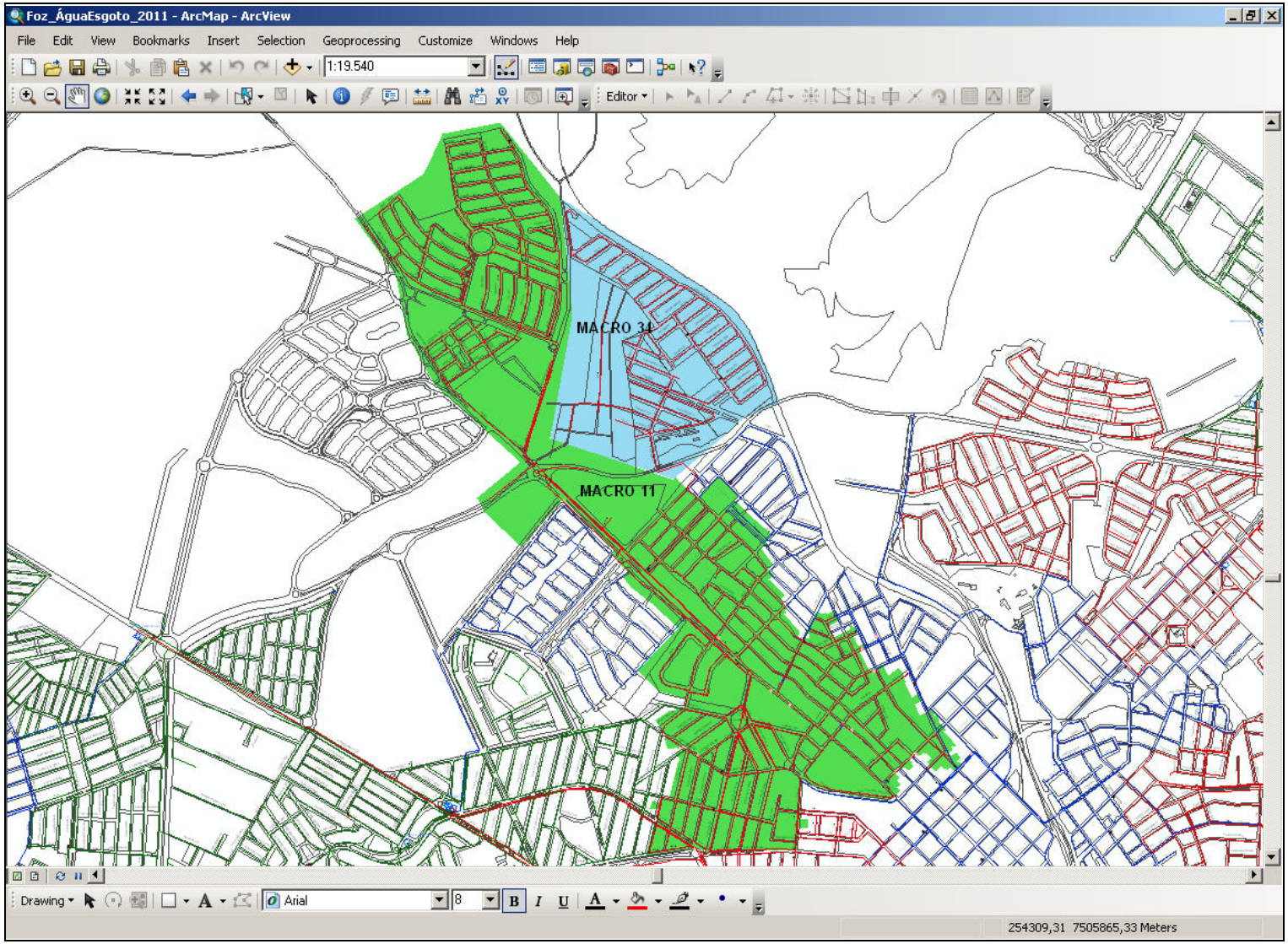

Figura 30. Cadastro digital do sistema destacado pelas Zonas de Macro medição 11 e 34.

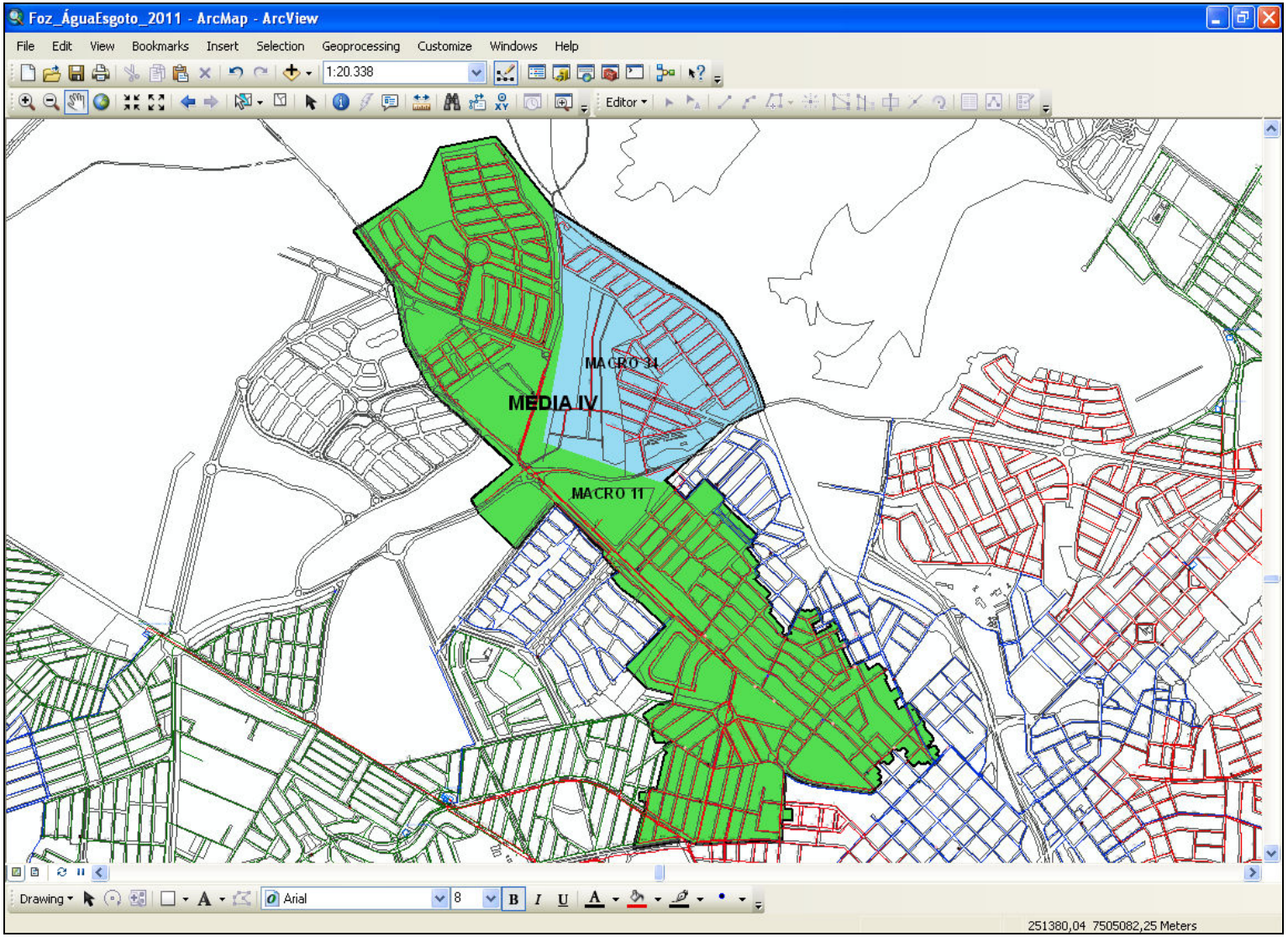

Figura 31. Cadastro digital do sistema destacado pela associação das Zonas de Macro medição e de Pressão.

Os dados que concernem aos volumes disponibilizados ao setor (macro medido), aos volumes medidos de água de todas as ligações ativas do mesmo (micro medido) e ao índice de eficiência das redes de água estão disponibilizados na Tabela 9.

Tabela 9. Relatório dos volumes disponibilizados ao sistema (macro medido), volumes medidos (micro medido) e do índice de eficiência das redes.

MACRO 11/34 Jd.Piratininga - Vl.Mathias - Jd. Aquárius - Vl.Primavera - Pq.Res.Roland - Jd. Aquários - Vl. Ferreira - Jd Vanessa - Jd.dos Ipês I e II- Jd.das Laranjeiras - Jd.São Rafael - Jd.Brasil - Jd.Sto.André

Grupo Micro: 04, 06, 12 e 90

Nº de Ligações 3.814 un Extensão 62.970 m

Zona Média IV Equação: Medidor (22-Duque de Caxias)

Mês	Volume Macromedido (m3)	Volume Micromedido (m3)	Vazamentos de redes	Vazamentos de ligação	Volume Perdido (m3)	Eficiência da rede %	Indice Perdas por Ligação	Indice de Perdas Lineares
jan/10	88.273	65.025	0	2	23.248	73,66%	0,201	0,380
fev/10	78.386	68.208	1	0	10.178	87,02%	0,088	0,167
mar/10	87.550	70.675	4	7	16.875	80,73%	0,146	0,276
abr/10	79.215	75.859	2	2	3.356	95,76%	0,028	0,053
mai/10	84.524	82.255	1	3	2.269	97,32%	0,019	0,036
jun/10	81.434	65.172	1	3	16.262	80,03%	0,138	0,258
jul/10	85.278	67.990	0	5	17.288	79,73%	0,146	0,275
ago/10	90.028	73.016	1	3	17.012	81,10%	0,144	0,270
set/10	86.202	74.610	2	3	11.592	86,55%	0,098	0,184
out/10	91.129	70.700	3	5	20.429	77,58%	0,173	0,324
nov/10	85.003	74.859	2	6	10.144	88,07%	0,086	0,161
dez/10	84.643	71.609	3	6	13.034	84,60%	0,110	0,207
Totalizado	**1.021.665**	**859.978**			**161.687**	**84,17%**		

Fonte: (FOZ DE LIMEIRA, 2010)

As demais informações como, por exemplo, às características operacionais dos conjuntos moto-bomba e do reservatório foram extraídas do manual de operação e do banco de dados do Sistema de Medição e Operação Remota VIJEO CITECT, ilustrados pelas Figuras 32 e 33 e caracterizados pela Tabela 10, que estão apresentados abaixo.

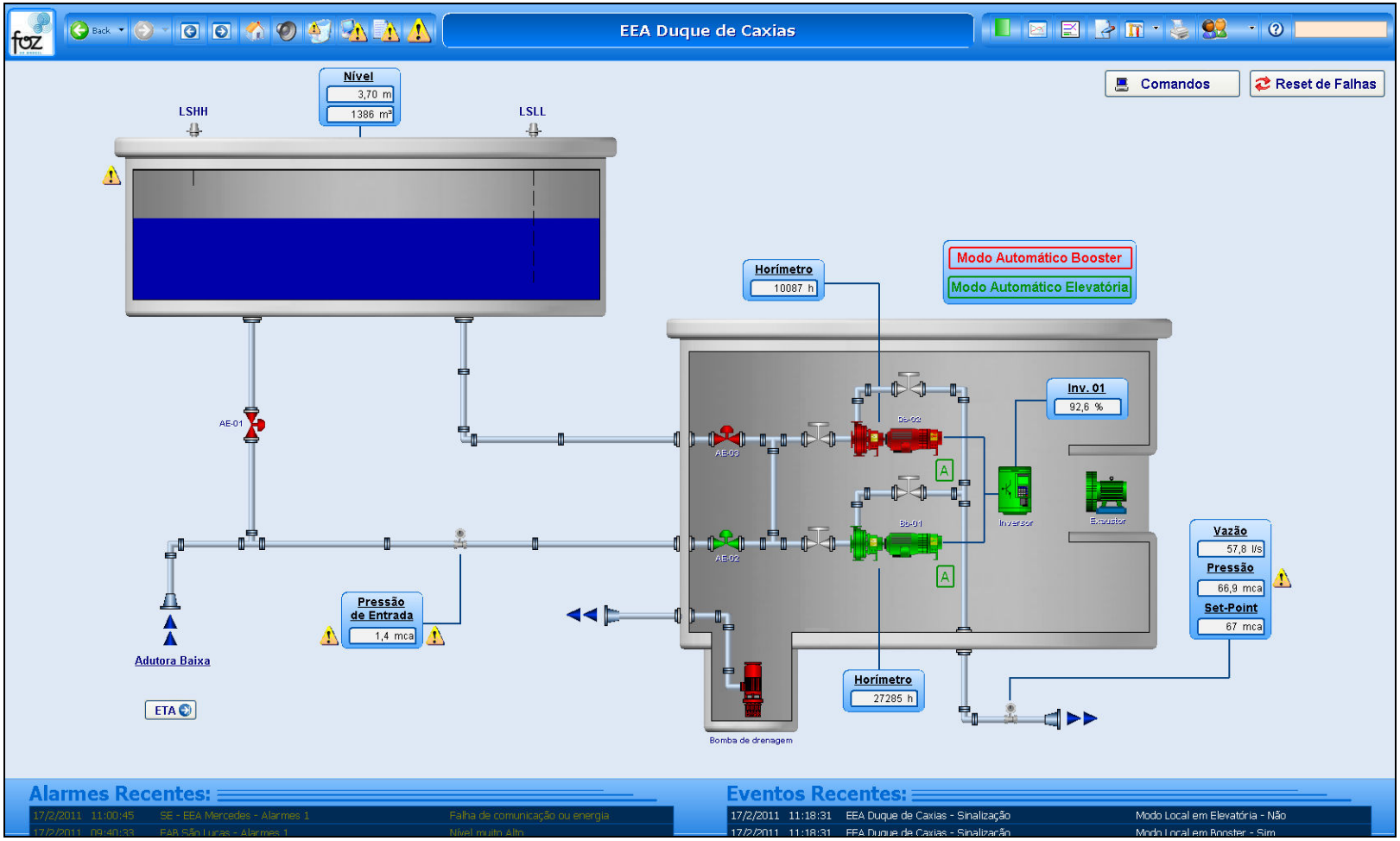

Figura 32. Representação gráfica do sistema de medição e operação remota da EEA / Booster Duque de Caxias do VIJEO CITECT.

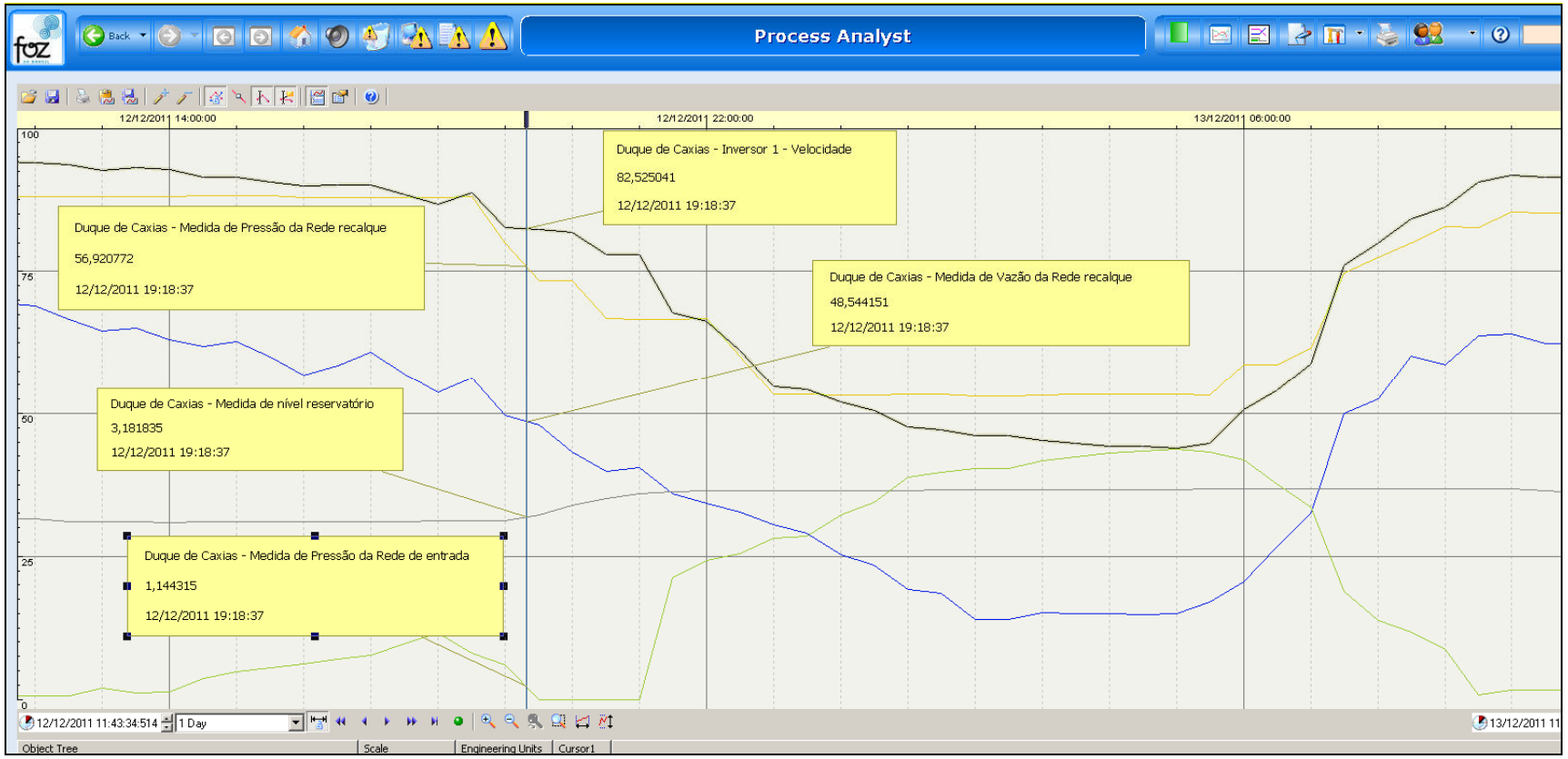

Figura 33. Gráfico de visualização de dados históricos do sistema do VIJEO CITECT.

Tabela 10. Dados do reservatório para modelagem no simulador hidráulico – EPANET.

RESERVATÓRIO	Diâmetro	Altura	Volume (m³)		Tipo de	Ø tubo saída	Cotas (m)				Altura de Água - EPANET		
	(m)	(m)	Nominal	Calculado	Apoio	reserv. (mm)	Terreno	Fundo Reserv.	NA mínimo	NA máximo	Mínima	Inicial	Máxima
DUQUE DE CAXIAS	21,50	3,90	1.500	1.416	ENTERRADO	314,60	602,60	597,450	597,575	601,350	0,31	2,00	3,90

4.3.2 Diâmetros internos e rugosidades adotadas

Tendo por base os dados característicos das redes apresentadas nos catálogos dos fabricantes foram-se estabelecidos os diâmetros internos dos tubos. Os diâmetros internos e os coeficientes de rugosidades admitidos para as tubulações lançadas no software obedecem às informações dispostas na Tabela 11.

Tabela 11. Diâmetro e rugosidades iniciais adotadas.

Material	DI (mm)	C
PVC		
PVC DEFOFO DN 100 mm	105,90	130
PVC DEFOFO DN 150 mm	153,00	130
PVC DEFOFO DN 200 mm	200,50	130
PVC DEFOFO DN 300 mm	299,80	130
PVC JE DN 60 mm	52,40	130
PVC JE DN 85 mm	74,50	130
PVC JE DN 110 mm	96,63	130
PVC JE DN 150 mm	153,00	130
FERRO FUNDIDO		
FºFº DN 50 mm	51,20	100
FºFº DN 80 mm	86,00	100
FºFº DN 100 mm	108,00	100
FºFº DN 150 mm	148,67	100
FºFº DN 200 mm	211,20	100
FºFº DN 250 mm	256,30	100
FºFº DN 300 mm	309,88	100
FºFº DN 350 mm	349,00	100
PEAD		
PEAD DE 63 mm PN-8	55,40	130
PEAD DE 110 mm PN-8	96,80	130
PEAD DE 160 mm PN-8	141,00	130

Porém, cabe ressaltar que durante a execução do modelo hidráulico houve a necessidade de aplicar alguns ajustes das rugosidades nas tubulações, tendo em vista a idade de instalação das redes e a calibração do sistema. (TAKAMI, 2005; NETTO; ALVAREZ, 1991)

4.3.3 Curvas características dos grupos elevatórios

Para a parametrização dos conjuntos moto bombas no simulador, admitiram-se as informações fornecidas pela equipe técnica da Foz de Limeira. Vale ressaltar nesse momento, que as informações referentes a esses conjuntos foram extraídas de catálogos dos fornecedores das bombas, portanto, será admitido neste estudo que as performances operacionais destes equipamentos estejam em conformidade com as informações fornecidas e que estes grupos também operarão nas curvas apresentadas.

As alturas manométricas médias horárias da saída da bomba foram determinadas através dos dados de pressão monitorados durante os trinta dias do mês de Novembro de 2010, que parcialmente estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12. Monitoramento das pressões na saída do bombeamento - parte.

MONITORAMENTO DE PRESSÕES							
Local:	**E.E.A Duque de Caxias**						
Rede:	**E.E.A Duque de Caxias - FºFº DN 250 mm**						
Data	**Horário**	**Pressão Entrada (m.c.a.)**	**Pressão Saída (m.c.a.)**	**Data**	**Horário**	**Pressão Entrada (m.c.a.)**	**Pressão Saída (m.c.a.)**
1/11/2010	00:00:00	9,70	**44,00**	2/11/2010	00:00:00	20,80	**50,00**
1/11/2010	01:00:00	19,90	**40,00**	2/11/2010	01:00:00	22,50	**48,00**
1/11/2010	02:00:00	20,40	**40,00**	2/11/2010	02:00:00	23,40	**43,00**
1/11/2010	03:00:00	20,70	**40,00**	2/11/2010	03:00:00	23,80	**40,00**
1/11/2010	04:00:00	21,50	**40,00**	2/11/2010	04:00:00	23,80	**40,00**
1/11/2010	05:00:00	22,50	**40,00**	2/11/2010	05:00:00	24,50	**40,00**
1/11/2010	06:00:00	21,80	**40,00**	2/11/2010	06:00:00	24,80	**46,00**
1/11/2010	07:00:00	19,90	**46,50**	2/11/2010	07:00:00	23,40	**46,90**
1/11/2010	08:00:00	13,70	**51,90**	2/11/2010	08:00:00	21,70	**51,00**
1/11/2010	09:00:00	2,00	**58,50**	2/11/2010	09:00:00	16,00	**55,00**
1/11/2010	10:00:00	0,00	**61,50**	2/11/2010	10:00:00	12,00	**55,40**
1/11/2010	11:00:00	0,00	**67,00**	2/11/2010	11:00:00	13,30	**58,00**
1/11/2010	12:00:00	0,10	**67,00**	2/11/2010	12:00:00	18,50	**60,00**
1/11/2010	13:00:00	1,50	**66,90**	2/11/2010	13:00:00	18,90	**60,00**
1/11/2010	14:00:00	3,40	**67,10**	2/11/2010	14:00:00	16,20	**59,00**
1/11/2010	15:00:00	3,80	**67,00**	2/11/2010	15:00:00	11,70	**57,00**
1/11/2010	16:00:00	7,70	**65,00**	2/11/2010	16:00:00	11,70	**56,00**
1/11/2010	17:00:00	10,20	**65,00**	2/11/2010	17:00:00	12,10	**56,00**
1/11/2010	18:00:00	9,30	**63,00**	2/11/2010	18:00:00	13,50	**56,00**
1/11/2010	19:00:00	10,70	**61,00**	2/11/2010	19:00:00	10,20	**56,00**
1/11/2010	20:00:00	12,50	**60,00**	2/11/2010	20:00:00	12,30	**55,00**
1/11/2010	21:00:00	15,60	**56,00**	2/11/2010	21:00:00	13,40	**55,00**
1/11/2010	22:00:00	16,50	**55,50**	2/11/2010	22:00:00	15,20	**55,00**
1/11/2010	23:00:00	19,60	**52,50**	2/11/2010	23:00:00	17,10	**50,00**
2/11/2010	00:00:00	20,80	**50,00**	3/11/2010	00:00:00	20,40	**46,00**

Através dos dados monitorados no período acima especificado foram determinadas as pressões médias horárias, que estão dispostas abaixo na Tabela 13.

Tabela 13. Alturas manométricas médias horárias da saída da bomba.

Hora	Pressão média (mca)
0	44,8
1	41,2
2	40,2
3	39,9
4	39,9
5	39,9
6	40,8
7	45,7
8	52,6
9	58,2
10	62,3
11	64,9
12	66,2
13	66,2
14	66,2
15	65,9
16	65,1
17	64,3
18	62,9
19	61,5
20	59,3
21	56,8
22	54,7
23	51,2

Já as vazões médias horárias e o coeficiente de vazão médio horário da saída do recalque foram estabelecidos considerando-se os dados de vazão monitorados durante os sete primeiros dias do mês de Novembro de 2010, que estão apresentados pelas Tabelas 14 a 17.

Tabela 14. Monitoramento das vazões na saída do bombeamento.

MONITORAMENTO DAS VAZÕES					
Local:	**E.E.A Duque de Caxias**				
Rede:	**E.E.A Duque de Caxias - FºFº DN 250 mm**				
Data	**Horário**	**Vazão (l/s)**	**Data**	**Horário**	**Vazão (l/s)**
1/11/2010	00:00:00	15,60	2/11/2010	00:00:00	18,90
1/11/2010	01:00:00	12,10	2/11/2010	01:00:00	13,00
1/11/2010	02:00:00	10,40	2/11/2010	02:00:00	11,10
1/11/2010	03:00:00	9,10	2/11/2010	03:00:00	8,40
1/11/2010	04:00:00	9,90	2/11/2010	04:00:00	7,60
1/11/2010	05:00:00	8,40	2/11/2010	05:00:00	7,50
1/11/2010	06:00:00	11,40	2/11/2010	06:00:00	10,10
1/11/2010	07:00:00	23,50	2/11/2010	07:00:00	14,20
1/11/2010	08:00:00	37,20	2/11/2010	08:00:00	21,00
1/11/2010	09:00:00	59,80	2/11/2010	09:00:00	33,10
1/11/2010	10:00:00	65,80	2/11/2010	10:00:00	38,20
1/11/2010	11:00:00	64,50	2/11/2010	11:00:00	45,80
1/11/2010	12:00:00	59,30	2/11/2010	12:00:00	46,50
1/11/2010	13:00:00	57,00	2/11/2010	13:00:00	43,20
1/11/2010	14:00:00	54,40	2/11/2010	14:00:00	38,20
1/11/2010	15:00:00	52,00	2/11/2010	15:00:00	34,70
1/11/2010	16:00:00	48,80	2/11/2010	16:00:00	32,60
1/11/2010	17:00:00	43,30	2/11/2010	17:00:00	32,50
1/11/2010	18:00:00	38,40	2/11/2010	18:00:00	35,80
1/11/2010	19:00:00	38,10	2/11/2010	19:00:00	35,00
1/11/2010	20:00:00	34,50	2/11/2010	20:00:00	33,80
1/11/2010	21:00:00	30,10	2/11/2010	21:00:00	30,10
1/11/2010	22:00:00	30,90	2/11/2010	22:00:00	25,20
1/11/2010	23:00:00	21,60	2/11/2010	23:00:00	20,60
2/11/2010	00:00:00	18,90	3/11/2010	00:00:00	15,00

Tabela 15. Monitoramento das vazões na saída do bombeamento – continuação.

Data	Horário	Vazão (l/s)	Data	Horário	Vazão (l/s)
3/11/2010	00:00:00	15,00	4/11/2010	00:00:00	14,10
3/11/2010	01:00:00	11,80	4/11/2010	01:00:00	10,20
3/11/2010	02:00:00	7,90	4/11/2010	02:00:00	8,60
3/11/2010	03:00:00	7,30	4/11/2010	03:00:00	7,90
3/11/2010	04:00:00	7,30	4/11/2010	04:00:00	7,80
3/11/2010	05:00:00	7,40	4/11/2010	05:00:00	8,40
3/11/2010	06:00:00	14,10	4/11/2010	06:00:00	19,00
3/11/2010	07:00:00	30,20	4/11/2010	07:00:00	29,50
3/11/2010	08:00:00	41,90	4/11/2010	08:00:00	44,00
3/11/2010	09:00:00	54,20	4/11/2010	09:00:00	53,10
3/11/2010	10:00:00	59,20	4/11/2010	10:00:00	62,30
3/11/2010	11:00:00	60,00	4/11/2010	11:00:00	61,60
3/11/2010	12:00:00	54,60	4/11/2010	12:00:00	58,80
3/11/2010	13:00:00	50,70	4/11/2010	13:00:00	54,30
3/11/2010	14:00:00	50,90	4/11/2010	14:00:00	53,90
3/11/2010	15:00:00	48,00	4/11/2010	15:00:00	53,00
3/11/2010	16:00:00	46,50	4/11/2010	16:00:00	51,80
3/11/2010	17:00:00	44,80	4/11/2010	17:00:00	48,30
3/11/2010	18:00:00	40,40	4/11/2010	18:00:00	43,30
3/11/2010	19:00:00	42,80	4/11/2010	19:00:00	42,90
3/11/2010	20:00:00	36,80	4/11/2010	20:00:00	36,00
3/11/2010	21:00:00	31,50	4/11/2010	21:00:00	31,80
3/11/2010	22:00:00	25,00	4/11/2010	22:00:00	26,50
3/11/2010	23:00:00	22,20	4/11/2010	23:00:00	21,10
4/11/2010	00:00:00	14,10	5/11/2010	00:00:00	14,90

Tabela 16. Monitoramento das vazões na saída do bombeamento – continuação.

Data	Horário	Vazão (l/s)	Data	Horário	Vazão (l/s)
5/11/2010	00:00:00	14,90	6/11/2010	00:00:00	15,40
5/11/2010	01:00:00	11,10	6/11/2010	01:00:00	12,40
5/11/2010	02:00:00	8,50	6/11/2010	02:00:00	10,10
5/11/2010	03:00:00	7,90	6/11/2010	03:00:00	8,90
5/11/2010	04:00:00	7,80	6/11/2010	04:00:00	8,60
5/11/2010	05:00:00	7,90	6/11/2010	05:00:00	8,10
5/11/2010	06:00:00	14,10	6/11/2010	06:00:00	10,10
5/11/2010	07:00:00	28,70	6/11/2010	07:00:00	17,80
5/11/2010	08:00:00	47,80	6/11/2010	08:00:00	37,20
5/11/2010	09:00:00	62,30	6/11/2010	09:00:00	48,50
5/11/2010	10:00:00	67,80	6/11/2010	10:00:00	47,20
5/11/2010	11:00:00	64,40	6/11/2010	11:00:00	49,10
5/11/2010	12:00:00	60,30	6/11/2010	12:00:00	49,30
5/11/2010	13:00:00	57,80	6/11/2010	13:00:00	44,00
5/11/2010	14:00:00	58,90	6/11/2010	14:00:00	40,50
5/11/2010	15:00:00	58,20	6/11/2010	15:00:00	40,20
5/11/2010	16:00:00	55,80	6/11/2010	16:00:00	39,20
5/11/2010	17:00:00	53,00	6/11/2010	17:00:00	40,80
5/11/2010	18:00:00	51,00	6/11/2010	18:00:00	39,30
5/11/2010	19:00:00	49,80	6/11/2010	19:00:00	37,50
5/11/2010	20:00:00	39,10	6/11/2010	20:00:00	33,50
5/11/2010	21:00:00	32,00	6/11/2010	21:00:00	28,80
5/11/2010	22:00:00	25,30	6/11/2010	22:00:00	24,00
5/11/2010	23:00:00	20,60	6/11/2010	23:00:00	20,90
6/11/2010	00:00:00	15,40	7/11/2010	00:00:00	16,30

Tabela 17. Monitoramento das vazões na saída do bombeamento (continuação) e definição das vazões médias horárias.

Data	Horário	Vazão (l/s)		Horário	Vazão (l/s)
7/11/2010	00:00:00	16,30		0	15,74
7/11/2010	01:00:00	14,00		1	12,09
7/11/2010	02:00:00	11,10		2	9,67
7/11/2010	03:00:00	9,80		3	8,47
7/11/2010	04:00:00	8,80		4	8,26
7/11/2010	05:00:00	7,90		5	7,94
7/11/2010	06:00:00	9,10		6	12,56
7/11/2010	07:00:00	14,40		7	22,61
7/11/2010	08:00:00	23,50		8	36,09
7/11/2010	09:00:00	34,70		9	49,39
7/11/2010	10:00:00	39,90		10	54,34
7/11/2010	11:00:00	49,50		11	56,41
7/11/2010	12:00:00	50,90		12	54,24
7/11/2010	13:00:00	43,80		13	50,11
7/11/2010	14:00:00	41,50		14	48,33
7/11/2010	15:00:00	38,80		15	46,41
7/11/2010	16:00:00	36,50		16	44,46
7/11/2010	17:00:00	39,10		17	43,11
7/11/2010	18:00:00	38,20		18	40,91
7/11/2010	19:00:00	37,80		19	40,56
7/11/2010	20:00:00	38,70		20	36,06
7/11/2010	21:00:00	37,00		21	31,61
7/11/2010	22:00:00	32,50		22	27,06
7/11/2010	23:00:00	27,10		23	22,01
8/11/2010	00:00:00	20,10		24	16,39

Vazão Média Horária do Período de Monitoramento

Nota-se que o período de monitoramento de vazão considerado foi inferior ao de pressão. A razão por essa distinção está associada à ocorrência de algumas paralisações no funcionamento do medidor de vazão em alguns dias subseqüentes ao período adotado.

Na Figura 34 estão representadas a curva das vazões médias horárias e a vazão média geral.

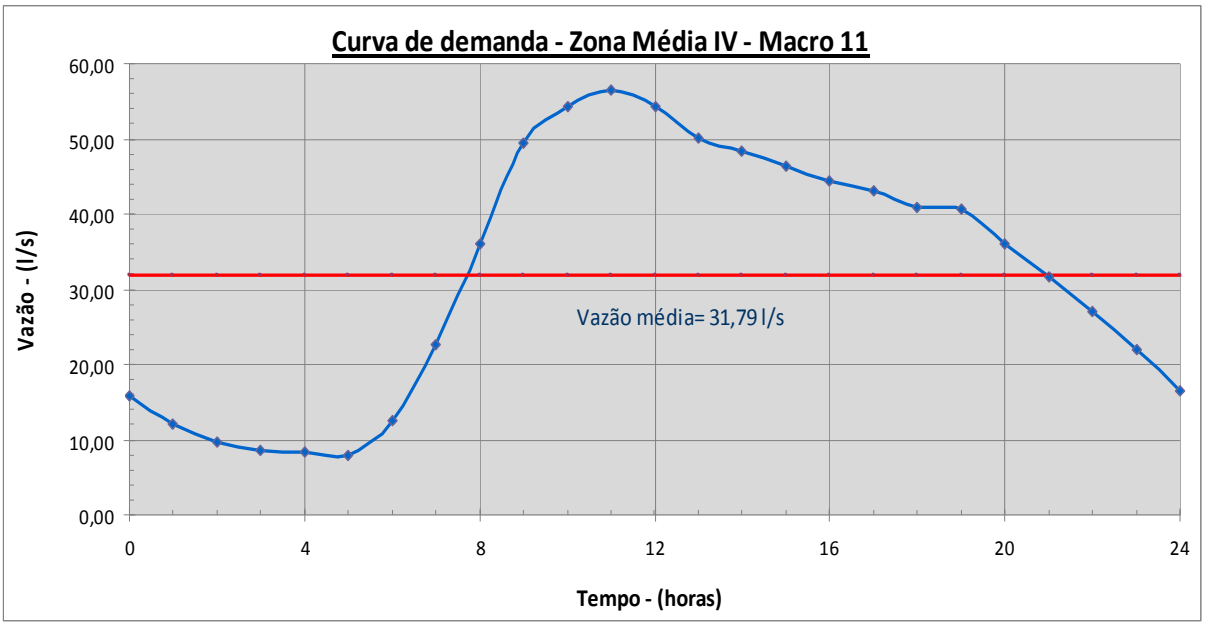

Figura 34. Curva de demanda média horária no intervalo de 24 horas.

No simulador hidráulico foi inserido um padrão na bomba, que em tese representa a variação da velocidade de rotação da bomba por unidade de hora. Os percentuais das velocidades de rotação da bomba aplicados no padrão foram definidos pela simulação hidráulica por meio de tentativas e erros, vide Figura 35, tendo por base os dados operacionais médios de altura manométrica e vazão da bomba registrados nos monitoramentos especificados anteriormente.

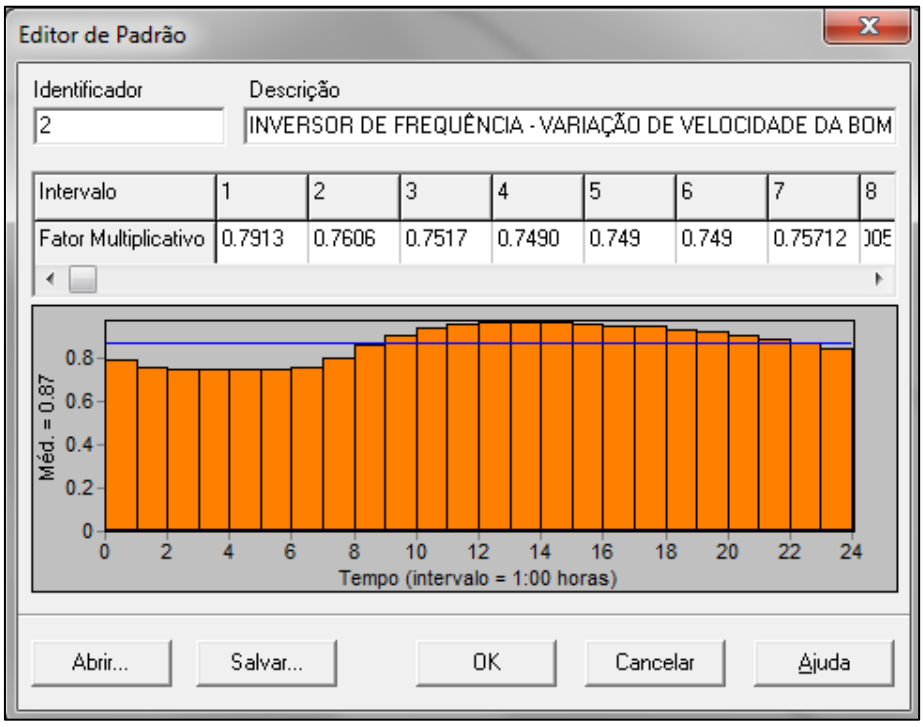

Figura 35. Perfil de variação das velocidades de rotação da bomba no intervalo de 24 horas aplicada na simulação hidráulica.

As velocidades de rotação da bomba atribuídas às horas decorrentes do dia contribuíram de uma forma preponderante para a calibração do modelo matemático. A desconsideração dessa variável certamente impossibilitaria a reprodução do comportamento hidráulico real no simulador, e conseqüentemente, o desenvolvimento dos cenários de pesquisa apresentados nesse trabalho.

4.3.4 Padrões temporais adotados na modelagem

Observa-se nas tabelas do item anterior a existência de uma coluna que representa o coeficiente de consumo horário (K) de cada dia de monitoramento, calculado mediante a associação da vazão unitária horária sobre a vazão média diária.

Para a simulação do sistema em período extensivo foram estabelecidos coeficientes de consumos médios horários a partir dos resultados das medições realizadas em campo. Os valores desses coeficientes foram obtidos através da média dos coeficientes horários extraídos ao longo dos sete dias de monitoramento, conforme indicado na Tabela 17 e reproduzido a seguir na Tabela 18.

Tabela 18. Padrão temporal de variação das demandas ao longo das 24 horas.

Padrão Temporal – Zonas de Macros 11 e 34								
N	1	2	3	4	5	6	7	8
Horário	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00
K	0,39	0,31	0,27	0,26	0,25	0,39	0,70	1,12
N	9	10	11	12	13	14	15	16
Horário	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
K	1,54	1,69	1,77	1,71	1,58	1,51	1,45	1,39
N	17	18	19	20	21	22	23	24
Horário	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	24:00
K	1,35	1,29	1,28	1,15	1,01	0,86	0,70	0,52

Esses coeficientes têm a finalidade de representar a variação temporal dos consumos durante o dia, podendo demonstrar com maior precisão o comportamento dinâmico do sistema. Entretanto, tais padrões foram ajustados para otimizar a interpretação do modelo em relação ao sistema real (calibração), como indica a Figura 36.

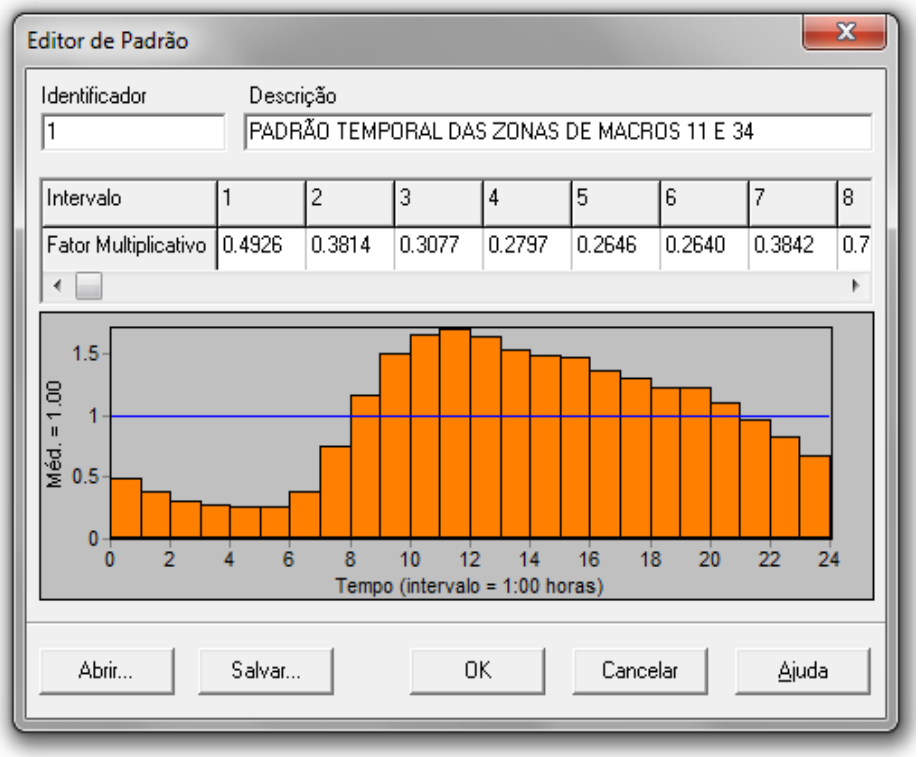

Figura 36. Padrão temporal de variação das demandas ao longo das 24 horas ajustados para a calibração do modelo.

4.3.5 Distribuição das demandas nos nós

A distribuição das demandas nos nós foi realizada, admitindo-se por referência a vazão média mensal requerida pelo sistema (volume disponibilizado medido) no período de Dezembro de 2010 e a extensão das redes de distribuição, cuja associação pode resultar um fator de vazão em marcha (l/s.m).

Fazendo notória a vazão em marcha e conhecendo-se as extensões de cada trecho, assim foram calculadas suas respectivas vazões unitárias (l/s).

Assim sendo, estabeleceu-se que a demanda atribuída para cada nó seria especificamente a metade da somatória das vazões unitária dos trechos que o mesmo estiver associado, ou seja, considerando-se que o nó N_1 esteja associado aos trechos T_1 e T_2, que por sua vez possuem as

vazões unitárias Q_1 e Q_2, respectivamente, a demanda atribuída para o nó N_1 seria a metade da somatória das vazões unitárias Q_1 e Q_2, conforme demonstra a Figura 37.

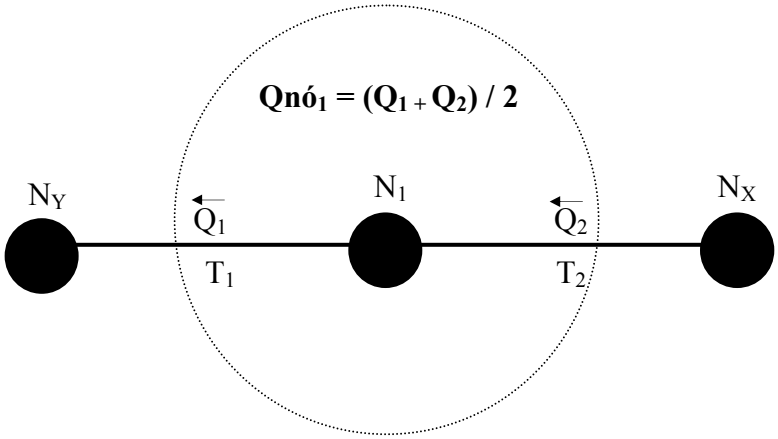

Figura 37. Conceito de definição da demanda no nó.

O mesmo conceito foi atribuído para os nós associados a três, quatro ou mais trechos.

Também foi determinado que os nós componentes das linhas primárias ou adutoras, que normalmente seguem sem "sangrias", não seriam carregados com demandas, salvo em locais específicos onde a adutora possui uma sangria de alimentação. Devido a essa condição, observar-se-á que os nós componentes das redes primárias não apresentarão demandas, e sua serventia ao modelo estará atrelada apenas para direcionar o caminhamento de uma rede ou adutora sem derivações e sem pontos de consumos e também para observar o comportamento das pressões ao longo dessas redes.

Criteriosamente foi verificado junto à área técnica da Foz de Limeira, se nesse período houve ocorrências de rompimentos e vazamentos de redes que poderiam impactar na medição dos volumes distribuídos ao sistema. A Tabela 19 demonstra a contextualização adotada para o carregamento das demandas nos nós.

Tabela 19. Dados característicos de volumes medidos disponibilizados (macro), consumidos (micro), índice de perdas e extensão de rede para determinação da vazão em marcha.

Macro 11			
Mês	**Macro**	**Micro**	**Perdas (%)**
Nov/2009	89.064	72.018	19,14
Dez/2009	91.175	65.468	28,19
Jan/2010	88.273	65.025	26,34
Fev/2010	78.386	68.208	12,98
Mar/2010	87.550	70.675	19,27
Abr/2010	79.215	126.184	-59,29
Mai/2010	84.524	82.255	2,68
Jun/2010	81.434	65.172	19,97
Jul/2010	85.278	67.990	20,27
Ago/2010	90.028	73.016	18,90
Set/2010	86.202	74.610	13,45
Out/2010	91.129	70.700	22,42
Nov/2010	85.003	74.859	11,93
Dez/2010	**84.643**	71.609	15,40

Extensão de Rede Total = 61.187 metros (primária e secundária)

Extensão de Rede Aplicada = 42.612 metros (secundária)

Número de Ligações = 3.799 unidades

Qtotal = 84.643 m³ / 31 dias / 24 horas → **Qtotal = 113,77 m³/h ou 28,31 l/s**

Qmarcha = 28,31 l/s / 42.612 metros → **Qmarcha = 0,000664 l/s.m**

O cálculo da vazão em marcha desse setor foi realizado considerando-se o volume disponibilizado ao sistema no mês de Dezembro de 2010, o qual foi convertido em vazão média mensal e a extensão das redes de distribuição.

Os valores das demandas atribuídas aos nós são disponibilizados na planilha de associação dos consumos nos nós, representada pela Tabela 20.

Tabela 20. Planilha de associação dos consumos nos nós da macro 11 – parte.

CÁLCULO DAS DEMANDAS - MACRO 11								
Trecho (ID)	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Coeficiente C	Nó (inicial)	Nó (final)	Q_{trecho} (l/s)	Nó	Q_{total} do Nó (l/s)
234	94,33	96,63	101	96	99	0,06	244	0,0778
235	57,39	96,63	101	99	100	0,04	245	0,0464
236	96,37	96,63	101	100	87	0,06	246	0,0835
237	65,86	96,63	101	87	91	0,04	247	0,0609
238	69,47	96,63	101	91	92	0,05	248	0,0967
239	60,33	96,63	101	92	94	0,04	249	0,1056
240	98,80	96,63	101	94	107	0,07	250	0,0716
241	53,83	96,63	101	107	106	0,04	251	0,0720
242	92,13	96,63	101	106	105	0,06	252	0,0999
243	61,33	96,63	101	105	103	0,04	253	0,1035
244	60,71	96,63	101	103	101	0,04	254	0,1056
245	68,15	96,63	101	101	96	0,05	255	0,1058
246	124,71	96,63	101	87	85	0,08	256	0,1063
247	36,99	96,63	101	85	311	0,02	257	0,0899
248	29,41	55,40	130	80	311	0,02	258	0,0705
249	92,27	52,40	101	103	104	0,06	259	0,0968
250	58,08	52,40	101	106	104	0,04	260	0,0783
251	66,01	52,40	101	104	102	0,04	261	0,0682
252	95,89	52,40	101	102	101	0,06	262	0,0163
253	66,82	52,40	101	102	99	0,04	263	0,0226
254	66,47	52,40	101	100	109	0,04	264	0,0000
255	65,11	52,40	101	109	108	0,04	265	0,0278
256	60,85	52,40	101	108	107	0,04	266	0,0491
257	97,64	52,40	101	108	92	0,06	267	0,0930
258	39,94	52,40	101	92	93	0,03	268	0,0852

Essa planilha foi originada através dos dados extraídos do relatório completo exportado do EPANET e também pela atribuição de algumas condicionantes, as quais associam os trechos e as vazões unitárias dos mesmos que determinado nó está associado, para assim, através do conceito anteriormente definido, calcular a vazão ou demanda que o nó deverá estar associado.

Para uma distribuição mais real e precisa dos consumos nos nós, os nós situados em bairros novos, que por sua vez se encontram em fase de ocupação (liberados provisório e/ou definitivamente), foram analisados exclusivamente, pois caso a demanda total desse setor fosse distribuída indistintamente, ou seja, associada a toda a extensão de rede secundária, bairros que se encontram na condição acima exposta estariam com demandas superiores às existentes, representando uma condição que não condiz com a realidade, impactando na calibração do modelo.

Para a aplicação dessa distribuição ajustada foi preciso determinar quais bairros se enquadravam nessa condição, e a partir disso excluir suas respectivas demandas disponibilizadas (macro medida) e extensões de rede, de toda a demanda e extensão de rede do setor, de forma que somente as demandas e as extensões de redes remanescentes fossem consideradas para o cálculo das demandas dos nós situados fora dessa específica região. Quanto aos bairros novos, o cálculo das demandas nos nós foi realizado considerando as demandas que aos respectivos bairros foram disponibilizadas e a extensão de redes que os mesmos congregam, para assim, aplicar o método de cálculo anteriormente citado.

É importante ressaltar que através das informações contidas no Dossiê da Gestão dos Novos Loteamentos e do Relatório de Gestão de Perdas do setor de Planejamento Técnico da Foz de Limeira, foram elencados os bairros desse setor que se encontravam em fase de ocupação, e que por sua vez necessariamente precisam ter suas demandas carregadas separadamente de toda a zona de macro.

A Tabela 21 demonstra a contextualização adotada para o carregamento das demandas nesses nós.

Tabela 21. Dados característicos de volumes disponibilizados e medidos por bairros em fase de ocupação para determinação da vazão em marcha.

CÁLCULO DAS DEMANDAS – MACRO 11 – BAIRROS NOVOS						
Bairro	**Vol. Micro Medido (m^3/mês)**	**Vol. Macro Medido (m^3/mês)**	**Vazão (m^3/h)**	**Vazão (l/s)**	**Extensão de Rede (metros)**	**Vazão em Marcha (l/s/m)**
Pq. Roland	6.105	7.045	9,47	2,63	11.197,12	0,0002349
Jd. Ipês II	1.543	1.780	2,39	0,66	2.621,81	0,0002536

As extensões das redes desses novos bairros foram extraídas do EPANET, mas poderiam ser levantadas do sistema GIS ou dos memoriais descritivos dos projetos executivos de implantação das redes de distribuição de água.

Os valores das demandas atribuídas aos nós são disponibilizados na planilha de associação dos consumos nos nós, representada pela Tabela 22.

Tabela 22. Planilha de associação dos consumos nos nós por bairros em fase de ocupação – Parque Residencial Roland – parte.

PQ. RES. ROLAND						
Trecho (ID)	Comprimento (m)	Nó (inicial)	Nó (final)	Q_{trecho} (l/s)	Nó	Q_{total} do Nó (l/s)
1	46,47	4	5	0,011	1	0,0254
2	11,52	5	3	0,003	2	0,0277
3	19,58	3	2	0,005	3	0,0212
4	216,21	2	1	0,051	4	0,0260
5	55,24	4	6	0,013	5	0,0068
6	61	6	9	0,014	6	0,0313
7	150,52	6	7	0,035	7	0,0256
8	67,6	7	8	0,016	8	0,0309
9	152,57	8	9	0,036	9	0,0403
10	43,28	8	10	0,010	10	0,0331
11	238,3	10	11	0,056	11	0,0698
12	149,33	3	14	0,035	12	0,0563
13	65,47	14	12	0,015	13	0,0545
14	119,3	4	12	0,028	14	0,0495
15	72,42	12	13	0,017	15	0,0382
16	71,65	13	11	0,017	16	0,0629
17	129,85	13	9	0,031	17	0,0128
18	206,4	14	28	0,048	18	0,0253
19	32,54	28	27	0,008	19	0,0142
20	122,89	27	20	0,029	20	0,0224

4.3.6 Calibração do modelo matemático

A Figura 38 ilustra panoramicamente o sistema adotado pelo modelo matemático.

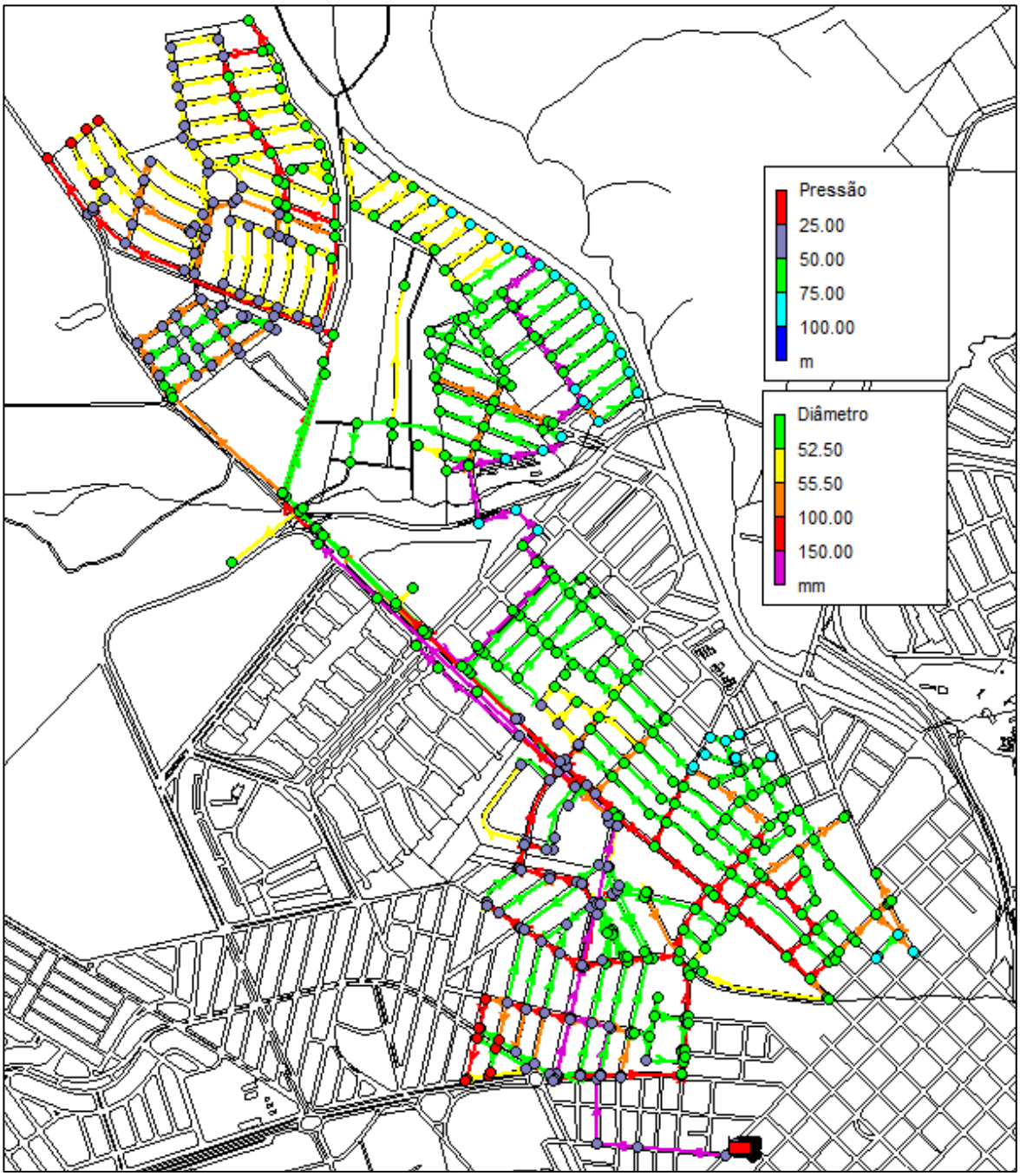

Figura 38. Vista panorâmica do modelo matemático.

Já a Figura 39 demonstra a localização dos pontos de calibração do modelo matemático.

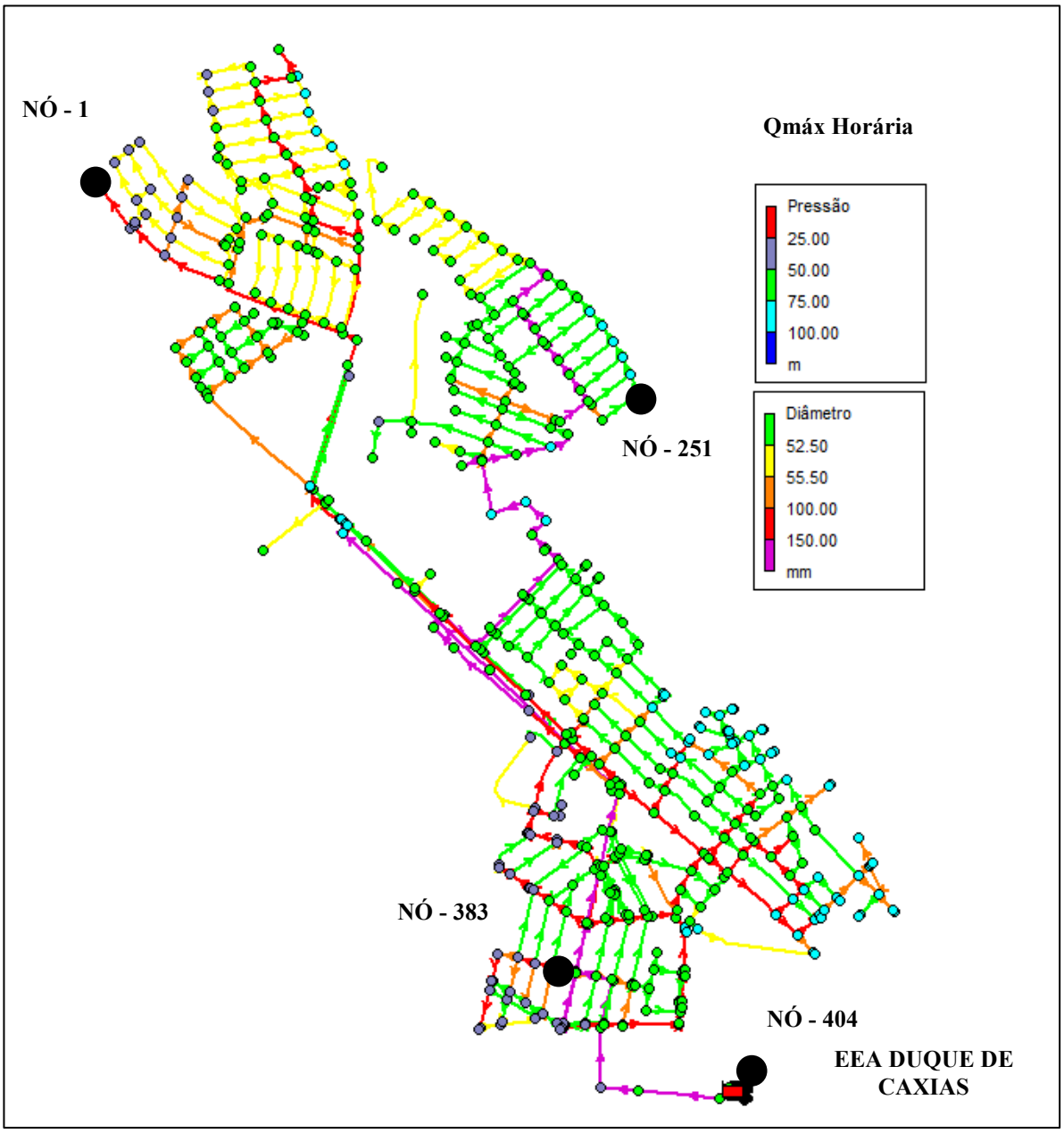

Figura 39. Pontos de calibração do modelo matemático.

Seguem abaixo as pressões médias medidas e as pressões calibradas dos pontos de calibração.

- Nó 1: Rua Carolina Roland, 2170 – Parque Residencial Roland.

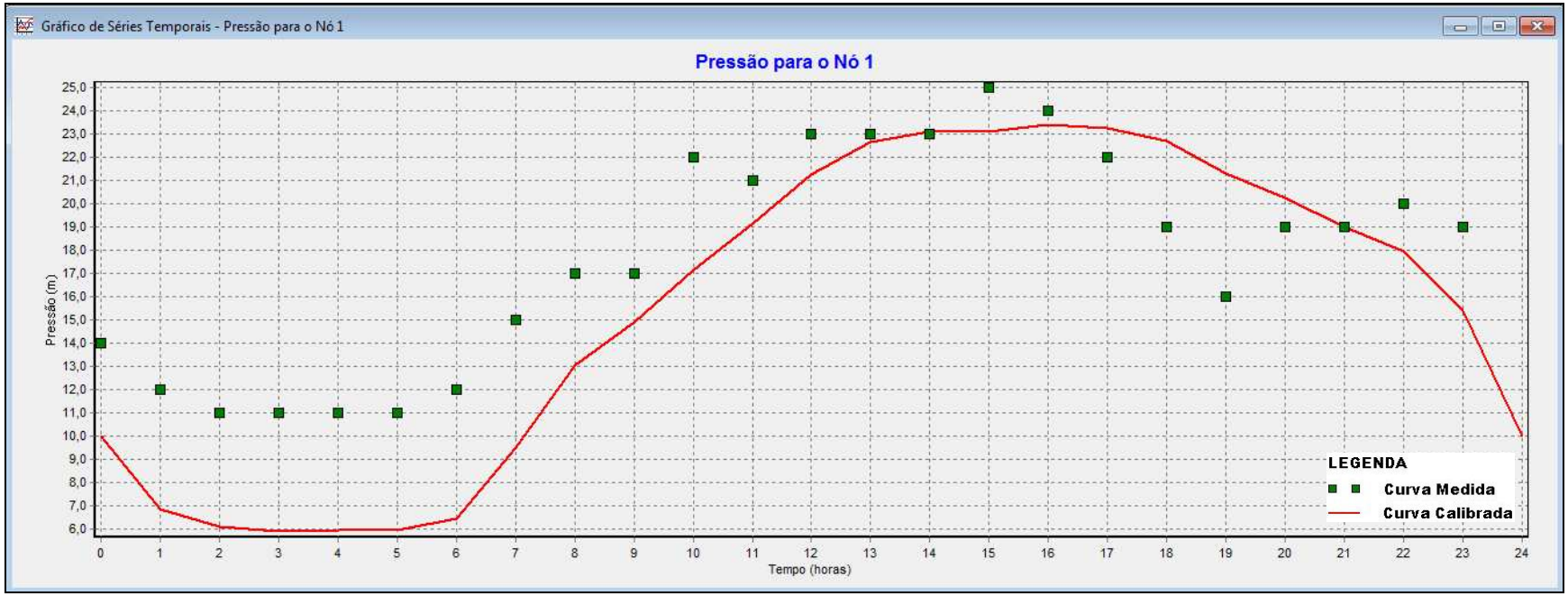

Figura 40. Gráfico de pressões temporais medidas e calibradas do nó 1.

- Nó 251: Rua Alameda Papoula, 16 - Jardim dos Ipês.

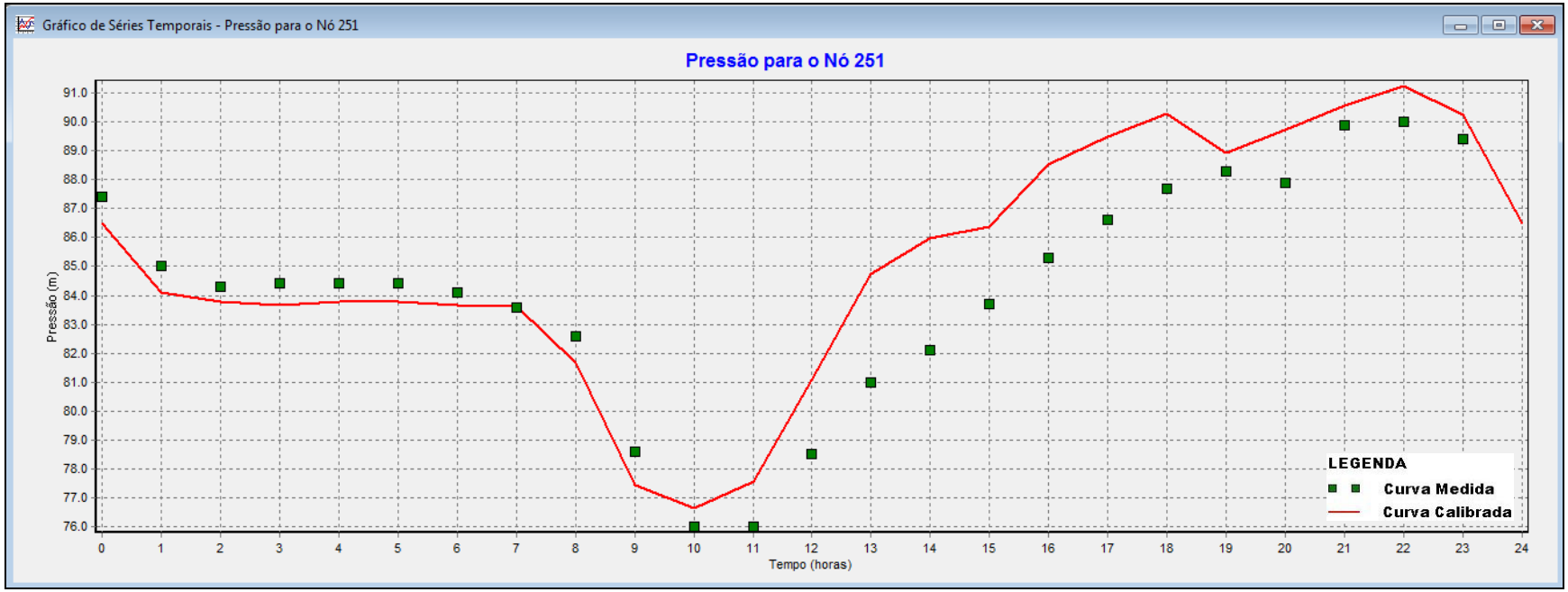

Figura 41. Gráfico de pressões temporais medidas e calibradas do nó 251.

- Nó 383: Rua Leandro Castelar, nº 250 - Jardim Piratininga.

Figura 42. Gráfico de pressões temporais medidas e calibradas do nó 383.

- Nó 404: Rua Duque de Caxias, nº 961 – Centro (Pressão no recalque da bomba).

Figura 43. Gráfico de pressões temporais medidas e calibradas do nó 404 (recalque).

Nas Figuras 44 e 45 são apresentados os Relatórios de Calibração do EPANET, que associam todos os pontos (nós) de calibração aplicados no modelo matemático.

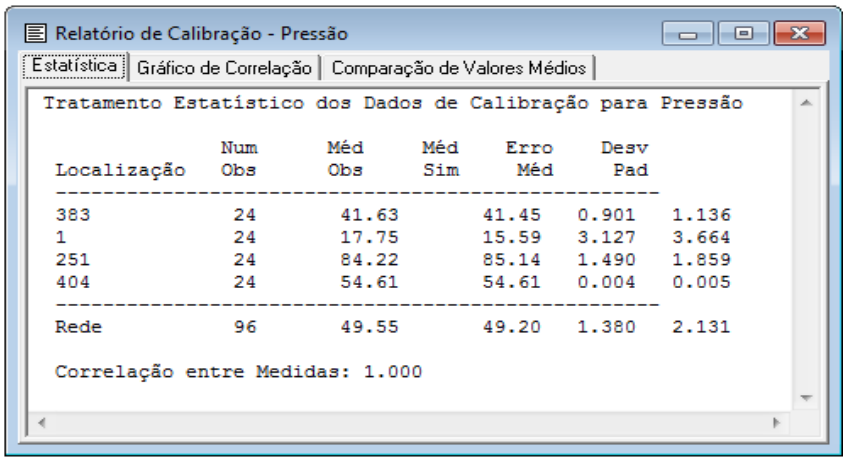

Figura 44. Relatório de tratamento estatístico dos dados de calibração de pressão dos pontos analisados.

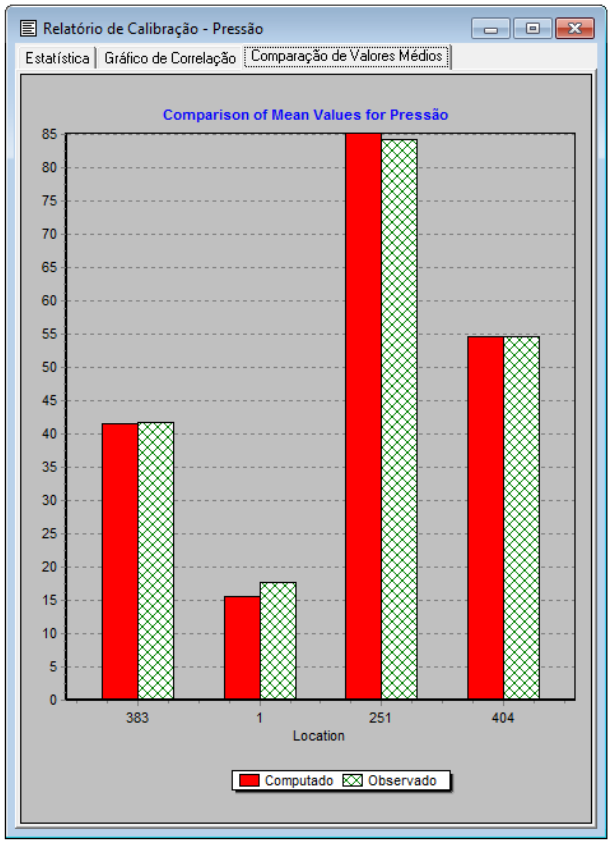

Figura 45. Comparação dos valores médios de pressão medidos e calibrados dos pontos analisados.

Avaliando o comparativo dos resultados de pressão computados e observados nos nós de calibração dispostos nas figuras acima, chegou-se a conclusão de que os resultados computados pelo modelo estavam confiáveis, ou seja, de que o modelo estava devidamente calibrado.

Na Figura 46 são apresentadas as vazões médias medidas e as vazões calibradas do ponto de calibração.

- Trecho 458: Rua Duque de Caxias, nº 961 – Centro (vazão de recalque da bomba).

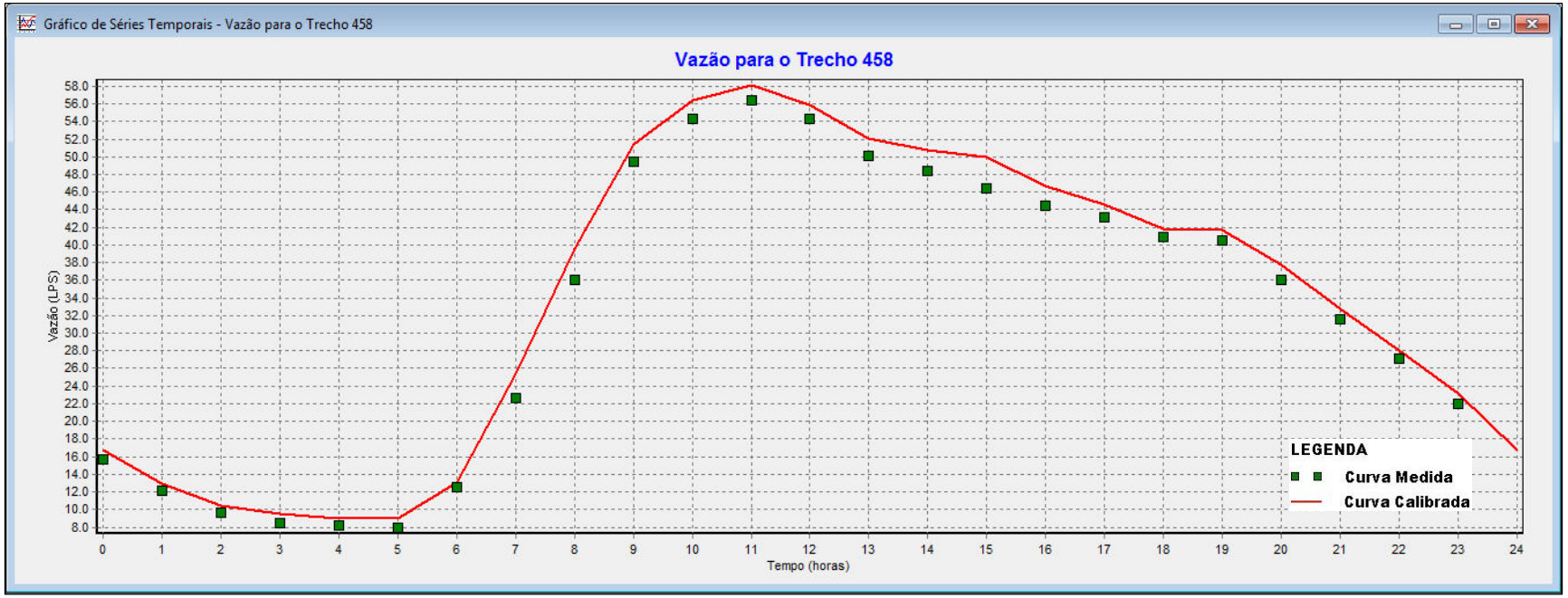

Figura 46. Gráfico de vazões temporais medidas e calibradas do trecho 458 (recalque).

Nas Figuras 47 e 48 são apresentados os Relatórios de Calibração do EPANET, que associam o ponto (nós) de calibração aplicado no modelo matemático.

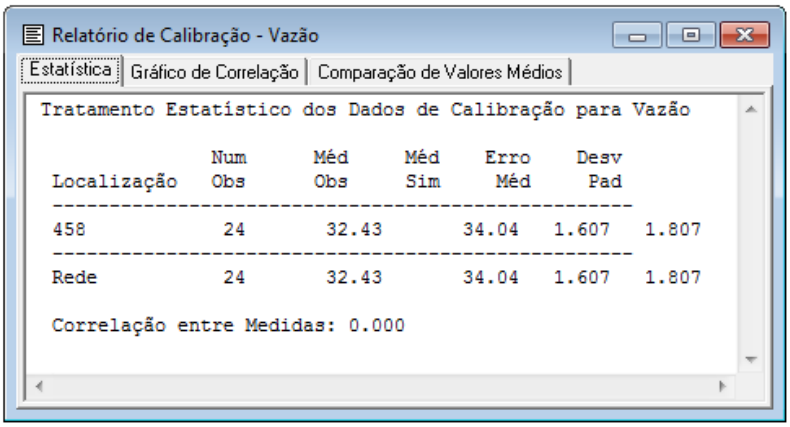

Figura 47. Relatório de tratamento estatístico dos dados de calibração de vazão do ponto analisado.

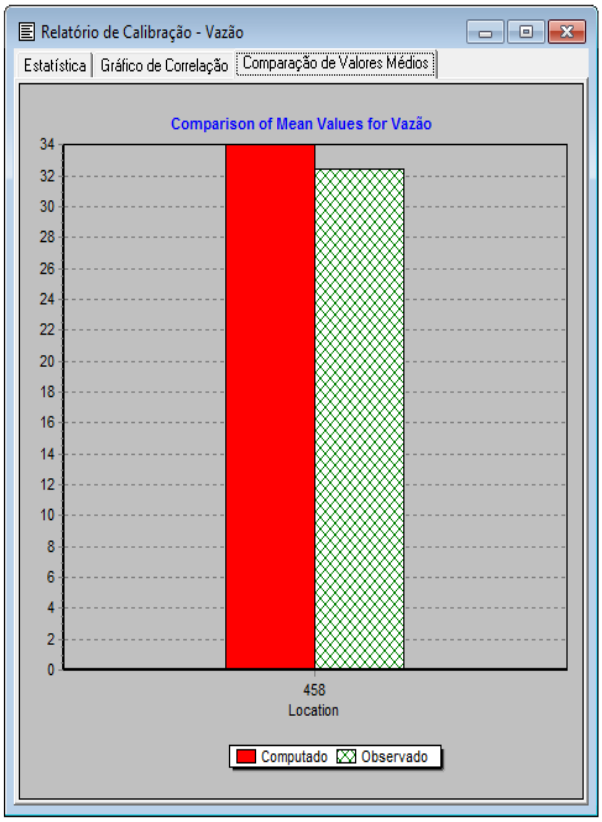

Figura 48. Comparação dos valores médios de vazão medidas e calibradas do ponto analisado.

Avaliando o comparativo dos resultados de vazão computados e observados no nó de calibração disposto nas figuras acima, chegou-se a conclusão de que os resultados computados pelo modelo estavam confiáveis, ou seja, de que o modelo estava devidamente calibrado.

4.3.7 Análise da eficiência energética no sistema de abastecimento de água através da aplicação do inversor de freqüência

A partir dos dados coletados, tratados, modelados e calibrados no simulador hidráulico, passou-se a etapa de análise da eficiência energética resultada pelo uso do inversor de freqüência, que foram realizadas em três distintos cenários, a saber:

- Cenário 1: Operação do conjunto moto-bomba sem a aplicação do inversor de freqüência;
- Cenário 2: Operação do conjunto moto-bomba com a aplicação do inversor de freqüência, seguindo o método operacional estabelecido pela Foz de Limeira;

A regra operacional adotada pela companhia consiste em estabelecer diariamente na saída do recalque as alturas manométricas dispostas na Tabela 13, de forma a possibilitar o abastecimento do ponto mais distante e desfavorável do sistema com uma pressão mínima de 15 mca. Observa-se pelos resultados monitorados em campo, os quais estão dispostos na Figura 40, que a regra operacional estabelecida não permite atingir nesse ponto a pressão mínima no período das 0h às 06h.

- Cenário 3: Operação do conjunto moto-bomba com a aplicação do inversor de freqüência, sendo este ajustado por uma regra operacional criteriosamente estabelecida por esse trabalho de pesquisa, que busca atender analogamente as condições operacionais aplicáveis pela companhia e reduzir o consumo de energia elétrica na estação elevatória.

Nesse último cenário, o critério definido consiste em estabelecer no ponto mais distante e desfavorável do sistema, durante todos os períodos do dia, uma pressão dinâmica de 15 mca, definida pela companhia como a pressão mínima dinâmica de operação. Para isso, far-se-á

necessário elevar, bem como reduzir as pressões, em determinados períodos do dia ao valor definido.

Com essa regra operacional proposta, o abastecimento de água em todo o sistema, principalmente no ponto mais crítico será mais equalizado e possivelmente submetido à cargas hidráulicas inferiores, que diretamente poderão influir na redução de rompimentos de redes, perdas de água física e principalmente na eficiência energética do conjunto moto-bomba.

4.3.7.1 Curva de rendimento da bomba nos cenários

Através da curva característica de rendimento da bomba em operação de rotação constante, vide Figura 20, inicialmente foram extraídas todas as informações conjugadas de rendimento e vazão para a reprodução da respectiva curva.

Na tentativa de possibilitar a interpolação dos rendimentos para todas as vazões recalcadas ao sistema, sendo elas inferiores ou superiores às disponibilizadas na curva catalogada, foi atribuída à curva de rendimento reproduzida da bomba uma linha de tendência polinomial de segunda ordem.

Na Figura 49 estão representadas a curva de rendimento da bomba em operação de rotação constante e a linha de tendência polinomial.

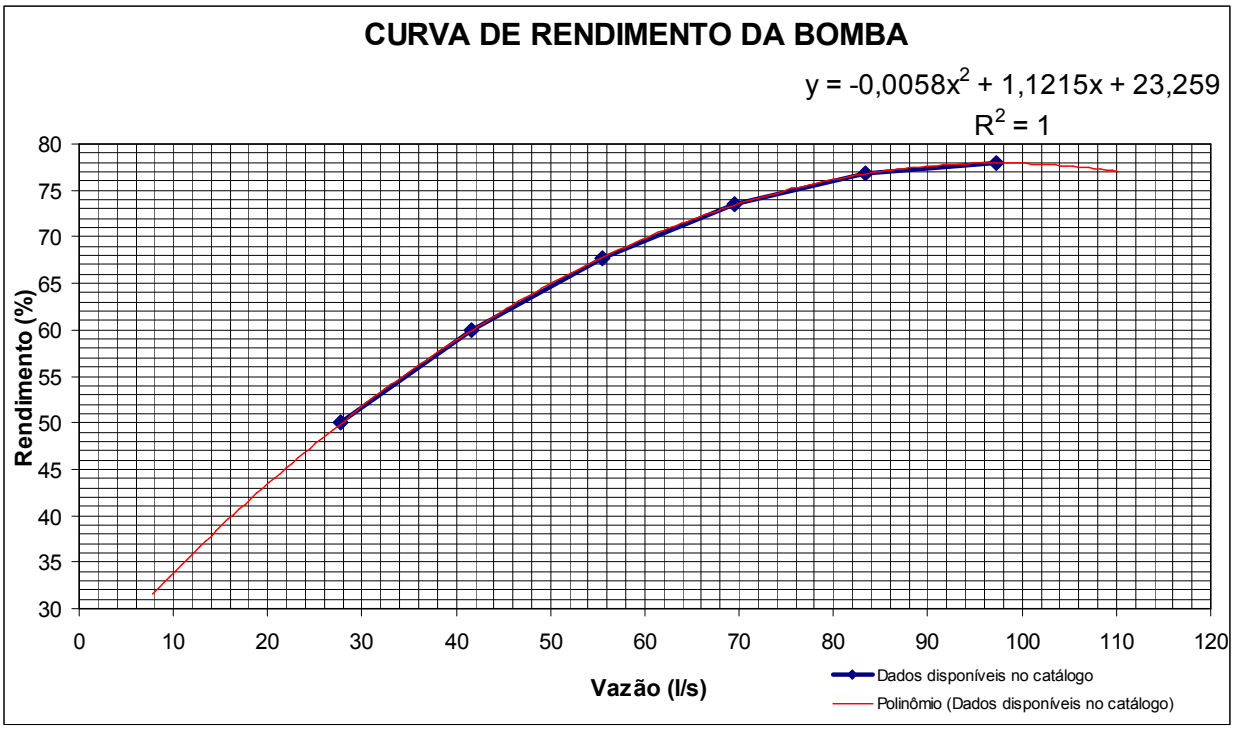

Figura 49. Curva de rendimento da bomba em rotação constante com linha de tendência para interpolação dos rendimentos nas diferentes faixas de vazão.

No conceito do cenário 1, aplicando a equação polinomial de tendência apresentada, foram calculados para cada vazões disponibilizadas ao sistema, seus respectivos rendimentos, potências, energias consumidas e custos com a eletricidade.

Cabe nesse momento ressaltar, que na simulação dos cenários sob a influência de operação do inversor de freqüência, os rendimentos adotados pelo EPANET são sempre direcionados da curva de rendimento da bomba para rotação constante, ou seja, para uma mesma vazão, simulando a operação do sistema com a bomba à rotação nominal e à rotação variada, os valores dos rendimentos são os mesmos, fato esse que não condiz com a efetiva realidade e também com as condições de semelhanças. (RODRIGUES, 2007)

No conceito dos cenários 2 e 3, cujas velocidades de rotação da bomba são variadas pelo inversor de freqüência para atendimento da regra operacional estabelecida pela concessionária e

do conceito operacional proposto nessa pesquisa, respectivamente, os rendimentos foram calculados considerando-se a equação de tendência da curva de rendimento nominal em função da vazão semelhante ou homóloga para a determinada rotação, que é calculada pelas Leis de Semelhança Física das Máquinas Hidráulicas Rotativas.

Há outras expressões que conceituam o cálculo do rendimento da máquina hidráulica submetida à diferentes velocidades de rotação, sendo elas a Lei de Semelhança Física das Máquinas Hidráulicas Rotativas, Curva de Colina e expressão empírica de Comolet.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Cenário 1

Nesse primeiro cenário a operação do conjunto moto-bomba é realizada sem a aplicação do inversor de freqüência, ou seja, a bomba operando à rotação nominal. A Figura 50 representa o perfil da velocidade de rotação da bomba.

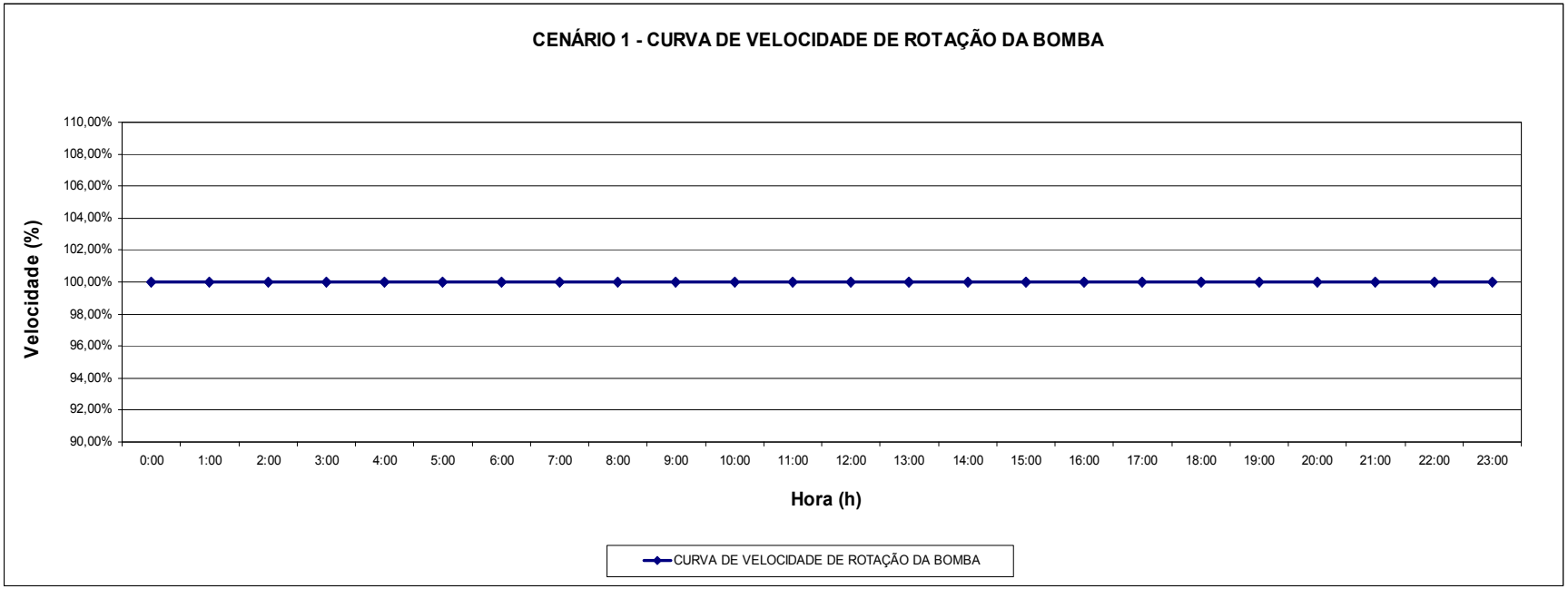

Figura 50. Curva de velocidade de rotação da bomba operada sem o inversor de freqüência ao longo das 24 horas.

Pela simulação hidráulica, o desempenho operacional da máquina hidráulica nessa condição, em termos de altura manométrica, é apresentado pela Figura 51.

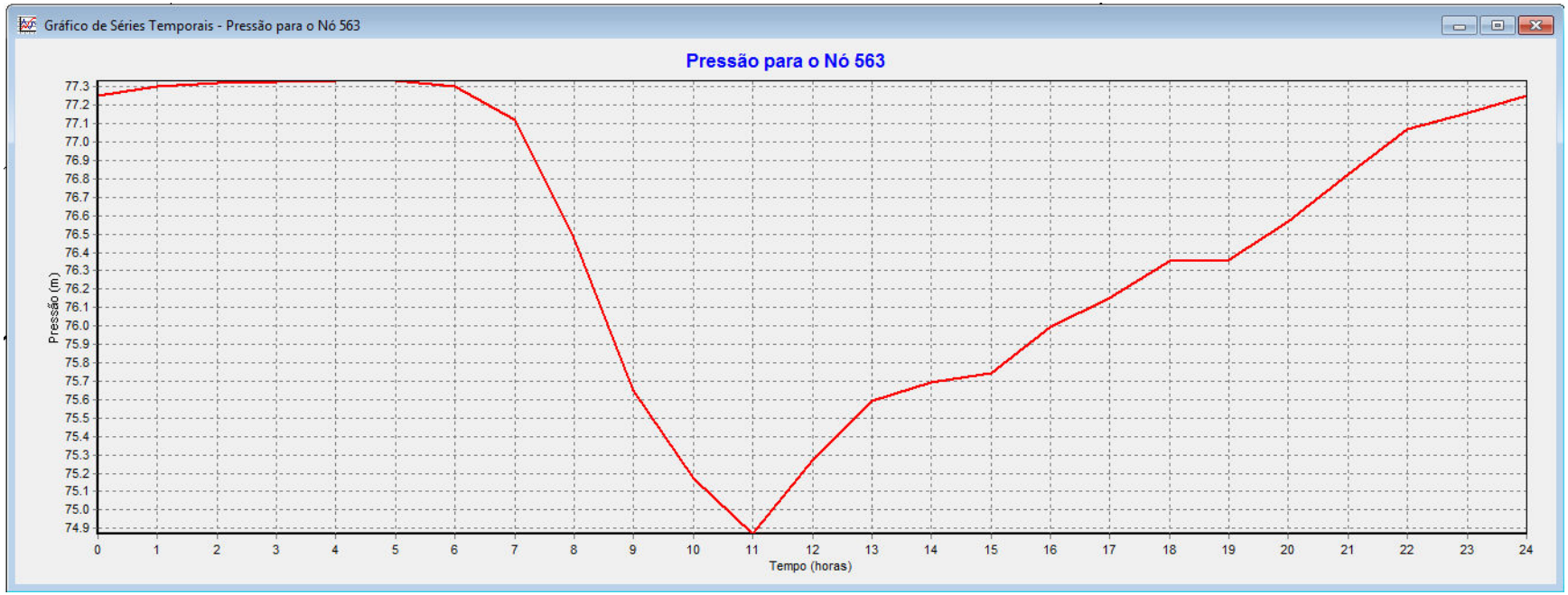

Figura 51. Altura manométrica da bomba ao longo das 24 horas.

Em termos de vazão, o desempenho operacional da máquina hidráulica nessa condição é apresentado pela Figura 52.

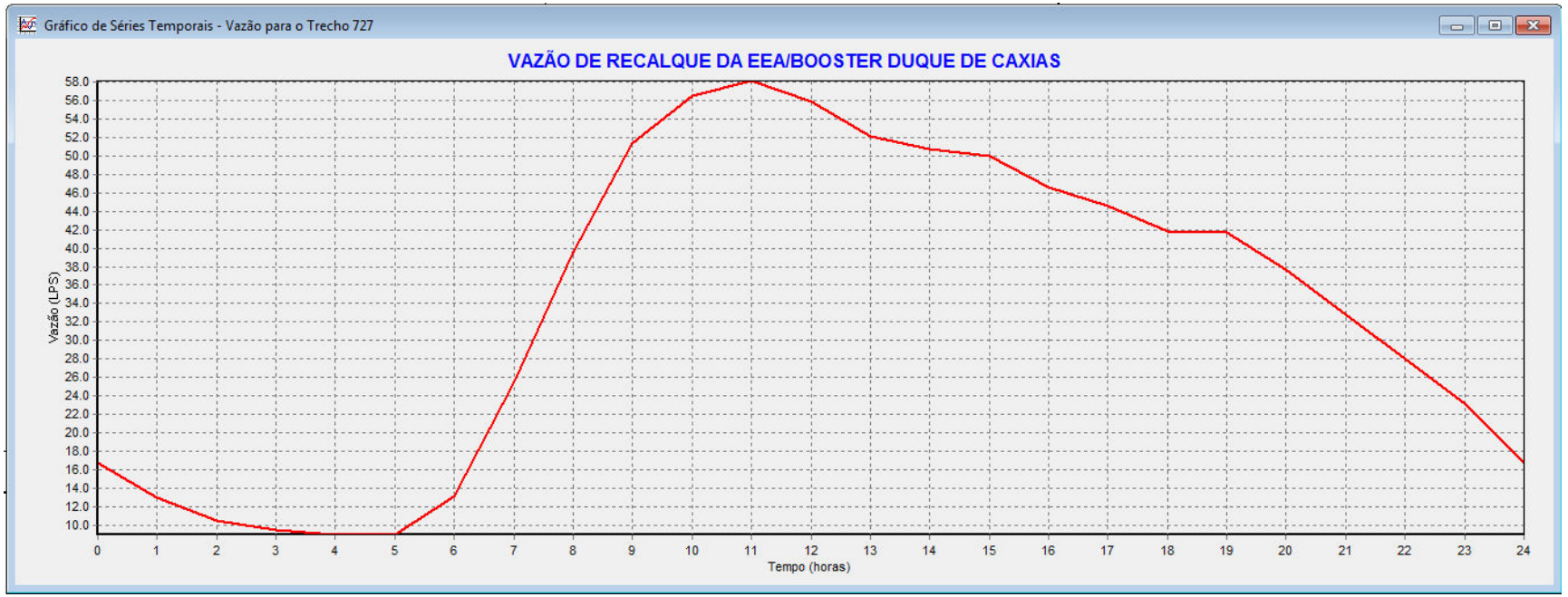

Figura 52. Vazão de recalque da bomba ao longo das 24 horas.

A Figura 53 aponta o perfil das pressões em período extensivo do nó 1.

Figura 53. Variação das pressões calibradas ao longo das 24 horas no ponto de abastecimento mais crítico do sistema.

Já a Figura 54 representa a pressão instantânea no nó 1 e na região onde as pressões estão muito elevadas.

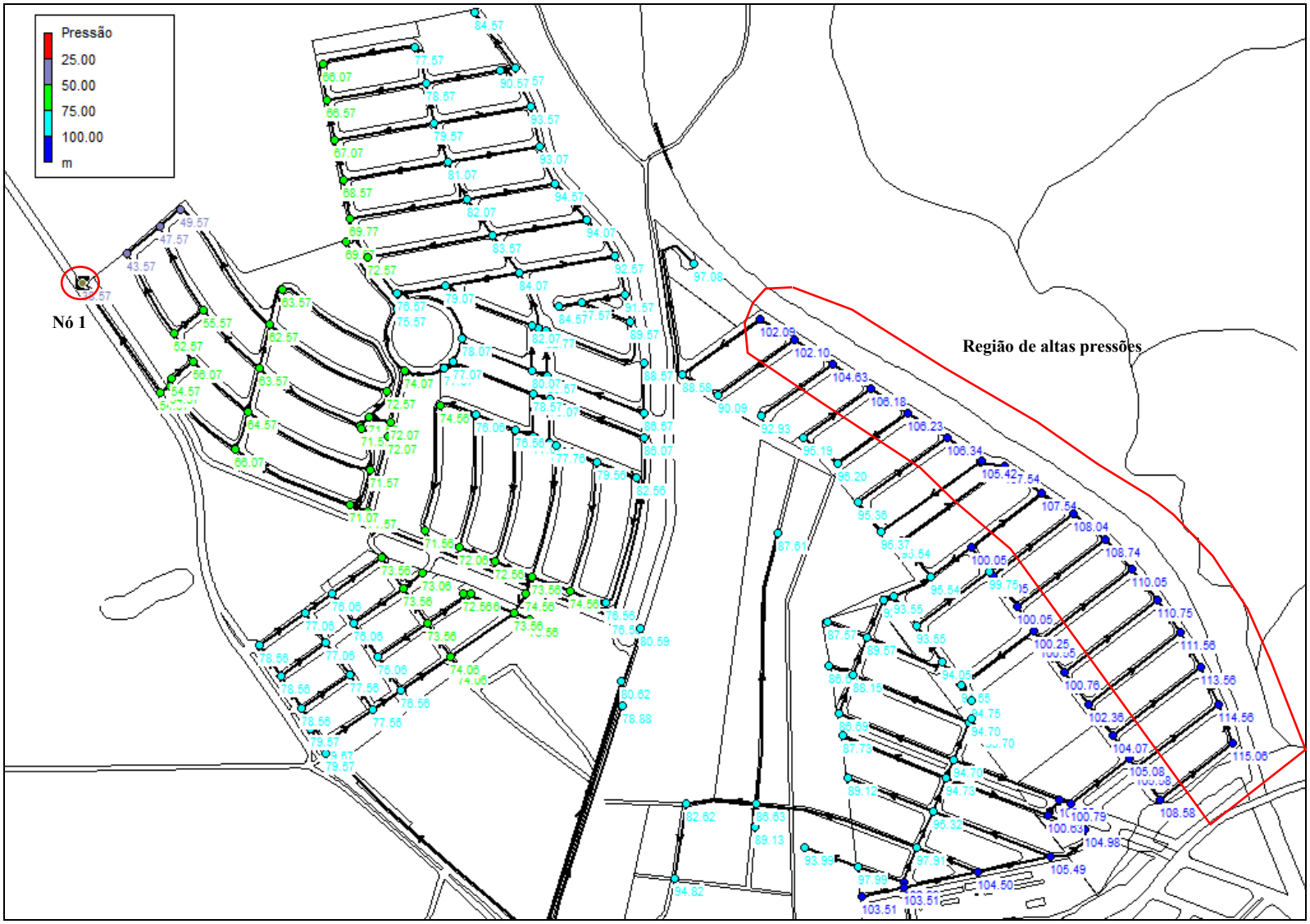

Figura 54. Pressões instantâneas no ponto mais crítico (nó 1) e na região mais favorável.

No ponto mais distante e crítico desse sistema de abastecimento, que está representado pelo nó 1, as pressões dinâmicas estão muito acima da mínima necessária, e por outro lado, na região onde o abastecimento é mais favorável, as pressões dinâmicas estão num patamar muito superior ao limite de operação estabelecido pela norma ABNT NBR 12218:94 (Projeto de rede de Distribuição de água para abastecimento público) e também pela concessionária, que estipula em 75 mca a pressão máxima estática.

O abastecimento do sistema nessa suposta condição operacional da máquina hidráulica certamente influirá em constantes rompimentos de redes, perdas exorbitantes de água não faturadas e principalmente em desperdício de energia elétrica.

Nesse cenário foi aplicada a equação polinomial de tendência apresentada para calcular a cada vazão disponibilizada ao sistema, seu respectivo rendimento, potência, energia consumida e custo com a eletricidade, considerando a tarifação média de 0,3280 R$/kWh, conforme indica a Tabela 23.

Tabela 23. Cálculo dos rendimentos, potências, energias e custos de operação da bomba com velocidade de rotação constante.

1º CENÁRIO - BOMBA SEM INVERSOR DE FREQUÊNCIA						
Tempo (h)	**Carga (m)**	**Vazão (m³/s)**	**Rendimento (%)**	**Potência (kW)**	**Energia (kWh)**	**Custo (R$)**
0:00	77,25	0,01677	40,44	31,40	31,40	10,30
1:00	77,30	0,01299	36,85	26,71	26,71	8,76
2:00	77,32	0,01048	34,38	23,10	23,10	7,58
3:00	77,33	0,00952	33,41	21,59	21,59	7,08
4:00	77,33	0,00901	32,89	20,76	20,76	6,81
5:00	77,33	0,00899	32,87	20,73	20,73	6,80
6:00	77,30	0,01308	36,94	26,83	26,83	8,80
7:00	77,12	0,02547	48,06	40,05	40,05	13,14
8:00	76,47	0,03958	58,56	50,65	50,65	16,61
9:00	75,65	0,05137	65,56	58,09	58,09	19,05
10:00	75,17	0,05646	68,09	61,08	61,08	20,04
11:00	74,87	0,05811	68,84	61,93	61,93	20,32
12:00	75,27	0,05592	67,84	60,81	60,81	19,95
13:00	75,59	0,05212	65,96	58,54	58,54	19,20
14:00	75,69	0,05076	65,24	57,71	57,71	18,93
15:00	75,75	0,05002	64,84	57,26	57,26	18,78
16:00	76,00	0,04664	62,95	55,18	55,18	18,10
17:00	76,15	0,04453	61,70	53,86	53,86	17,67
18:00	76,35	0,04182	60,02	52,14	52,14	17,10
19:00	76,36	0,04176	59,98	52,10	52,10	17,09
20:00	76,57	0,03772	57,31	49,39	49,39	16,20
21:00	76,83	0,03275	53,77	45,86	45,86	15,04
22:00	77,07	0,02804	50,15	42,23	42,23	13,85
23:00	77,15	0,02311	46,08	37,92	37,92	12,44
				TOTAL	**1.065,92**	**349,66**

5.2 Cenário 2

Nesse cenário a operação do conjunto moto-bomba é realizada com a aplicação do inversor de freqüência, de acordo com a regra operacional estabelecida pela companhia. As variações das velocidades de rotação da bomba promovidas pelo inversor de freqüência estão apresentadas na Figura 55.

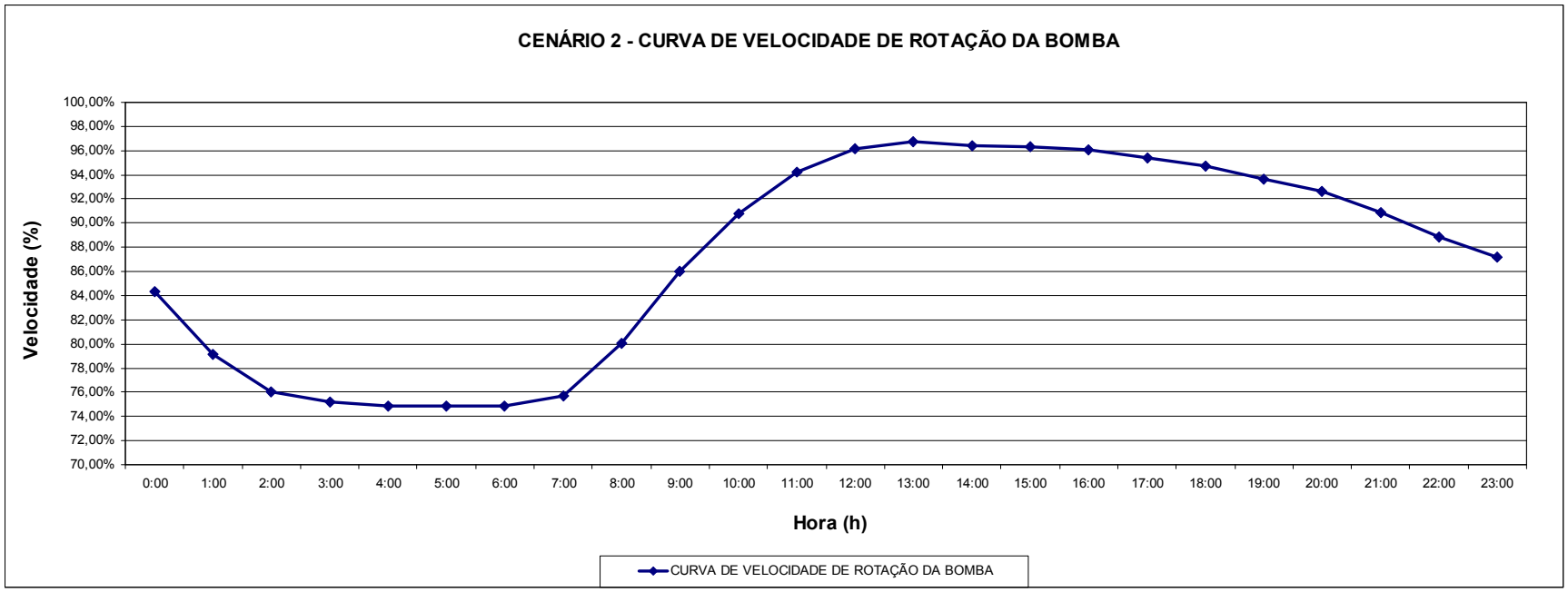

Figura 55. Curva de velocidade de rotação calibrada da bomba operada pelo inversor de freqüência ao longo das 24 horas.

Pela simulação hidráulica, o desempenho operacional da máquina hidráulica nessa condição, em termos de altura manométrica, é apresentado pela Figura 56.

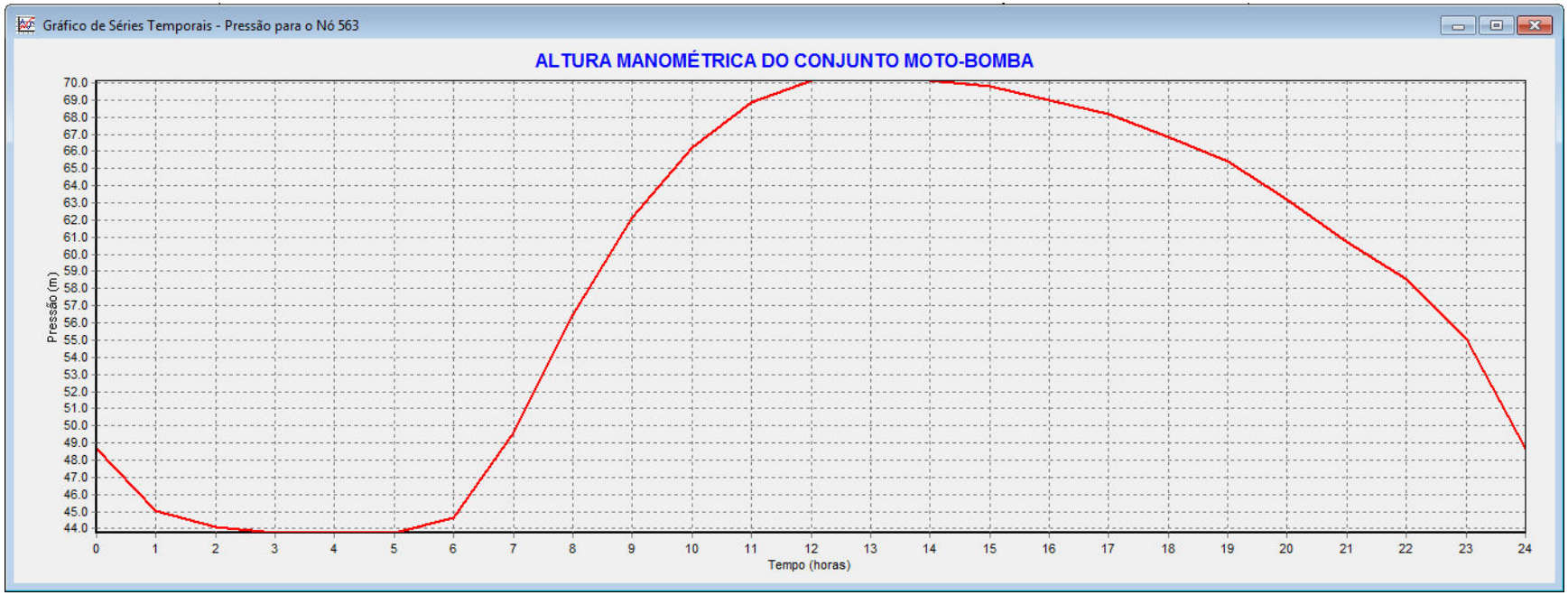

Figura 56. Altura manométrica da bomba ao longo das 24 horas.

Em termos de vazão, o desempenho operacional da máquina hidráulica nessa condição é apresentado pela Figura 57.

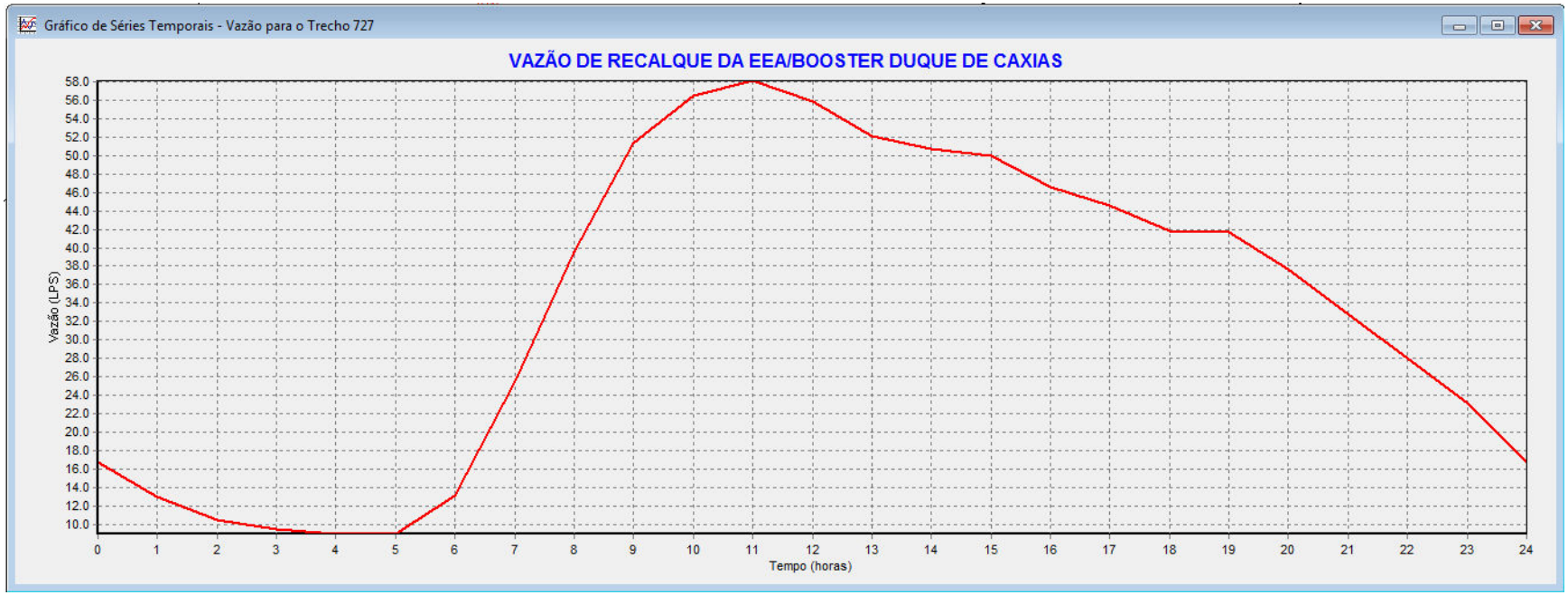

Figura 57. Vazão de recalque da bomba ao longo das 24 horas.

A Figura 58 aponta o perfil das pressões calibradas em período extensivo do nó 1.

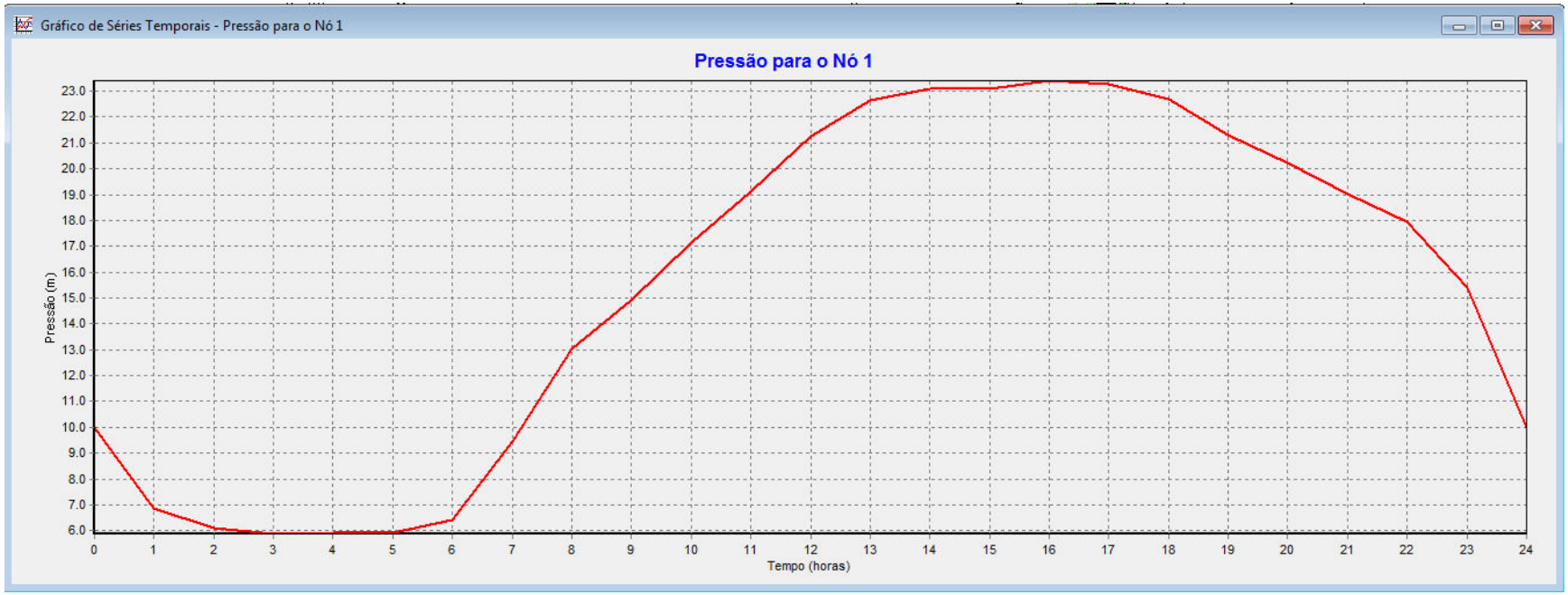

Figura 58. Variação das pressões ao longo das 24 horas no ponto de abastecimento mais crítico do sistema**.**

Já a Figura 59 representa a pressão instantânea no nó 1 e na região onde as pressões estão muito elevadas.

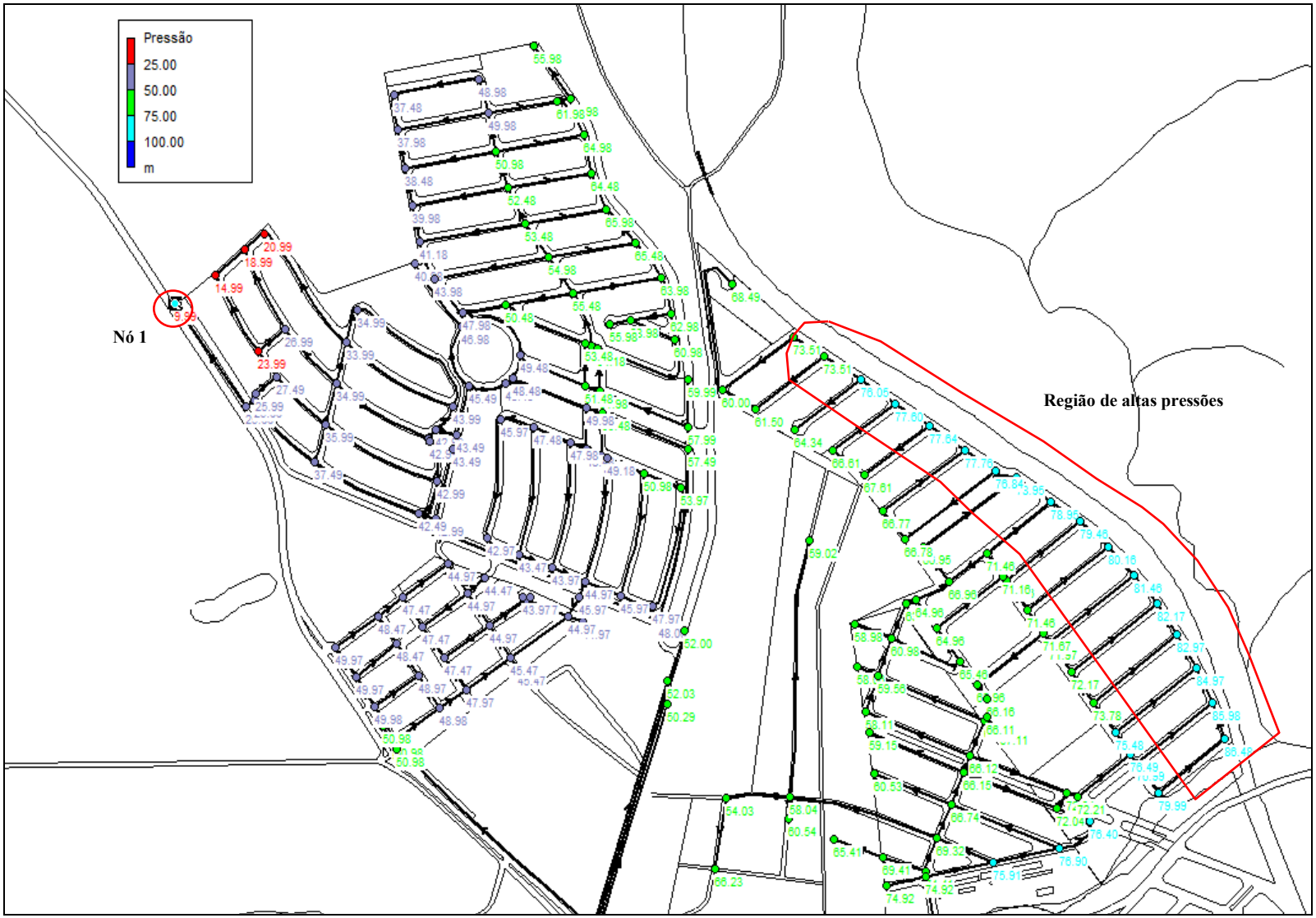

Figura 59. Pressões instantâneas no ponto mais crítico (nó 1) e na região mais favorável.

No ponto mais distante e crítico desse sistema de abastecimento, que está representado pelo nó 1, observa-se na Figura 40 que nas primeiras horas do dia a regra operacional estabelecida não permite atingir nesse ponto, tanto pela curva medida quanto pela calibrada, a pressão mínima requerida pelo sistema e definida pela companhia.

Já nas demais horas do dia as pressões dinâmicas são razoavelmente superiores à requerida pelo sistema, permitindo ainda a presença de pressões elevadas nos locais em que o abastecimento é mais favorável, e conseqüentemente a potencialidade de indício de rompimentos de redes, perdas de água não faturadas e desperdício de energia elétrica.

Analisando as curvas de pressão medida e calibrada do nó 1 verifica-se que a calibração desse ponto não foi tão bem representativa o quanto se esperava. Por esse motivo, para a análise da eficiência energética desse cenário foi adotada a curva de pressão medida, ao invés da curva calibrada.

Nesse cenário foi aplicada a equação de tendência da curva de rendimento nominal e a vazão semelhante ou homóloga para a determinada rotação para calcular a cada vazão disponibilizada ao sistema, seu respectivo rendimento, potência, energia consumida e custo com a eletricidade, considerando a tarifação média de 0,3280 R$/kWh, conforme indica a Tabela 24.

Tabela 24. Cálculo dos rendimentos, potências, energias e custos de operação da bomba com velocidade de rotação variável, conforme a operação disposta no cenário 2.

2º CENÁRIO - BOMBA COM INVERSOR DE FREQUÊNCIA								
Tempo (h)	**Carga (m)**	**Vazão (m³/s)**	**Vazão Homóloga (m³/s)**	**Velocidade de Rotação (%)**	**Rendimento (%)**	**Potência (kW)**	**Energia (kWh)**	**Custo (R$)**
0:00	48,67	0,01677	0,01414	84,33%	37,96	21,07	21,07	6,91
1:00	45,07	0,01299	0,01028	79,13%	34,17	16,79	16,79	5,51
2:00	44,07	0,01048	0,00797	76,06%	31,83	14,22	14,22	4,66
3:00	43,76	0,00952	0,00716	75,17%	30,99	13,18	13,18	4,32
4:00	43,77	0,00901	0,00675	74,90%	30,56	12,65	12,65	4,15
5:00	43,77	0,00899	0,00673	74,90%	30,55	12,62	12,62	4,14
6:00	44,66	0,01308	0,00980	74,90%	33,69	16,99	16,99	5,57
7:00	49,58	0,02547	0,01928	75,71%	42,73	28,96	28,96	9,50
8:00	56,50	0,03958	0,03168	80,05%	52,97	41,37	41,37	13,57
9:00	62,13	0,05137	0,04419	86,02%	61,49	50,87	50,87	16,69
10:00	66,23	0,05646	0,05127	90,81%	65,51	55,94	55,94	18,35
11:00	68,85	0,05811	0,05474	94,19%	67,27	58,29	58,29	19,12
12:00	70,13	0,05592	0,05375	96,12%	66,78	57,55	57,55	18,88
13:00	70,13	0,05212	0,05041	96,71%	65,05	55,06	55,06	18,06
14:00	70,11	0,05076	0,04892	96,37%	64,24	54,29	54,29	17,81
15:00	69,82	0,05002	0,04816	96,29%	63,82	53,63	53,63	17,59
16:00	69,02	0,04664	0,04480	96,06%	61,86	51,00	51,00	16,73
17:00	68,21	0,04453	0,04246	95,35%	60,42	49,27	49,27	16,16
18:00	66,80	0,04182	0,03960	94,69%	58,57	46,74	46,74	15,33
19:00	65,41	0,04176	0,03908	93,59%	58,23	45,97	45,97	15,08
20:00	63,19	0,03772	0,03493	92,61%	55,36	42,20	42,20	13,84
21:00	60,70	0,03275	0,02975	90,85%	51,49	37,83	37,83	12,41
22:00	58,58	0,02804	0,02492	88,87%	47,60	33,81	33,81	11,09
23:00	55,07	0,02311	0,02014	87,15%	43,49	28,68	28,68	9,41
						TOTAL	**898,96**	**294,89**

5.3 Cenário 3

Nesse cenário a operação do conjunto moto-bomba é realizada com a aplicação do inversor de freqüência, de acordo com a regra operacional proposta por esse trabalho de pesquisa. As variações das velocidades de rotação da bomba promovidas pelo inversor de freqüência estão apresentadas na Figura 60.

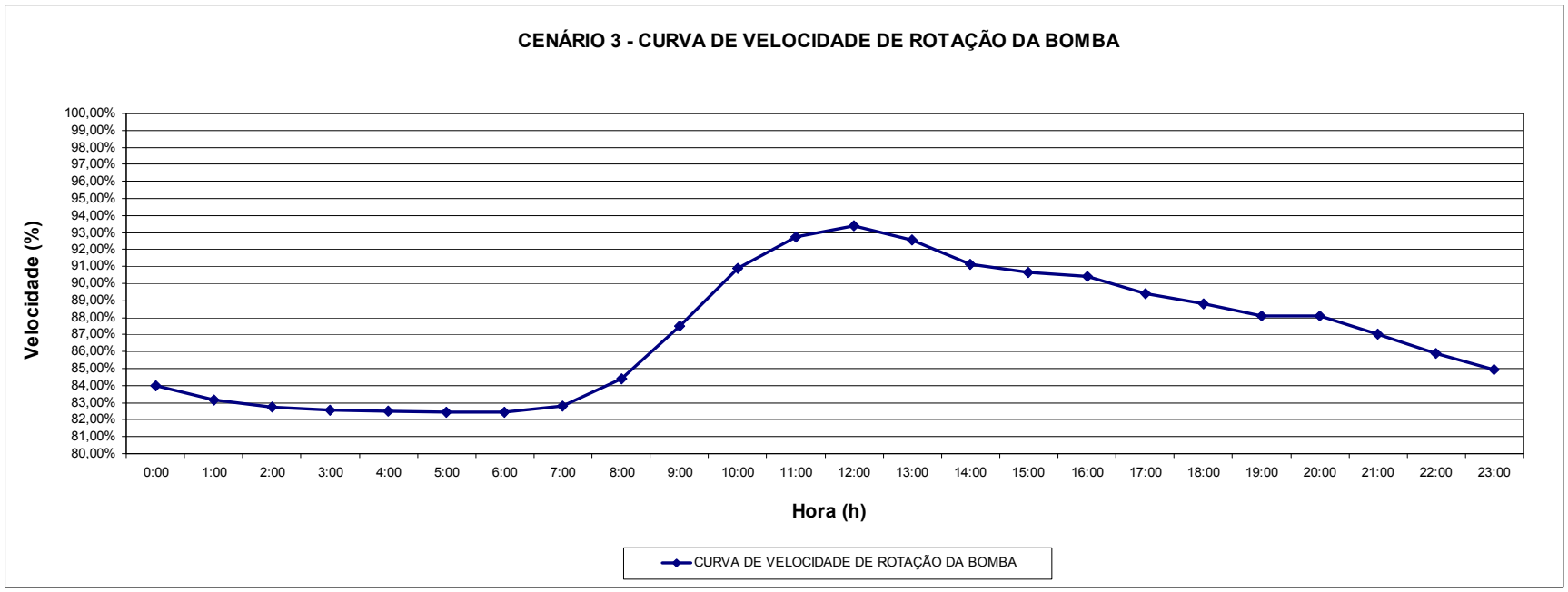

Figura 60. Curva de velocidade de rotação da bomba operada pelo inversor de freqüência ao longo das 24 horas.

Pela simulação hidráulica, o desempenho operacional da máquina hidráulica nessa condição, em termos de altura manométrica, é apresentado pela Figura 61.

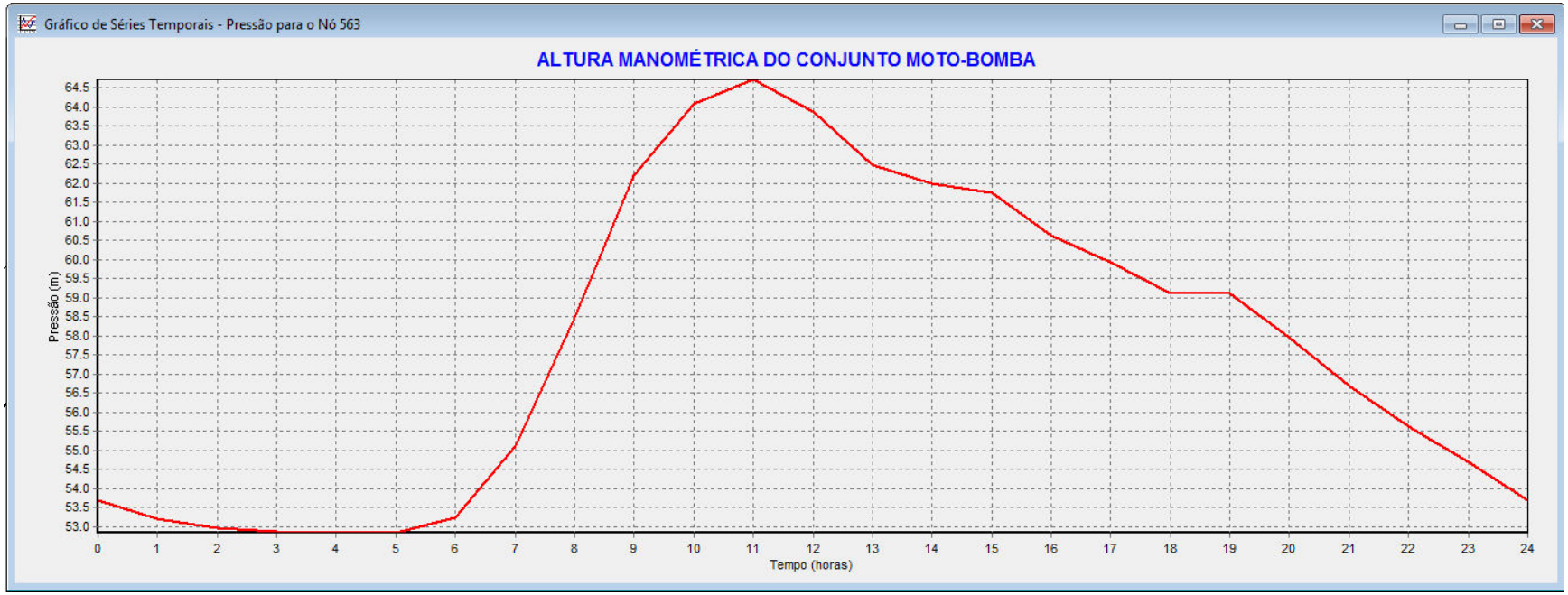

Figura 61. Altura manométrica da bomba ao longo das 24 horas.

Em termos de vazão, o desempenho operacional da máquina hidráulica nessa condição é apresentado pela Figura 62.

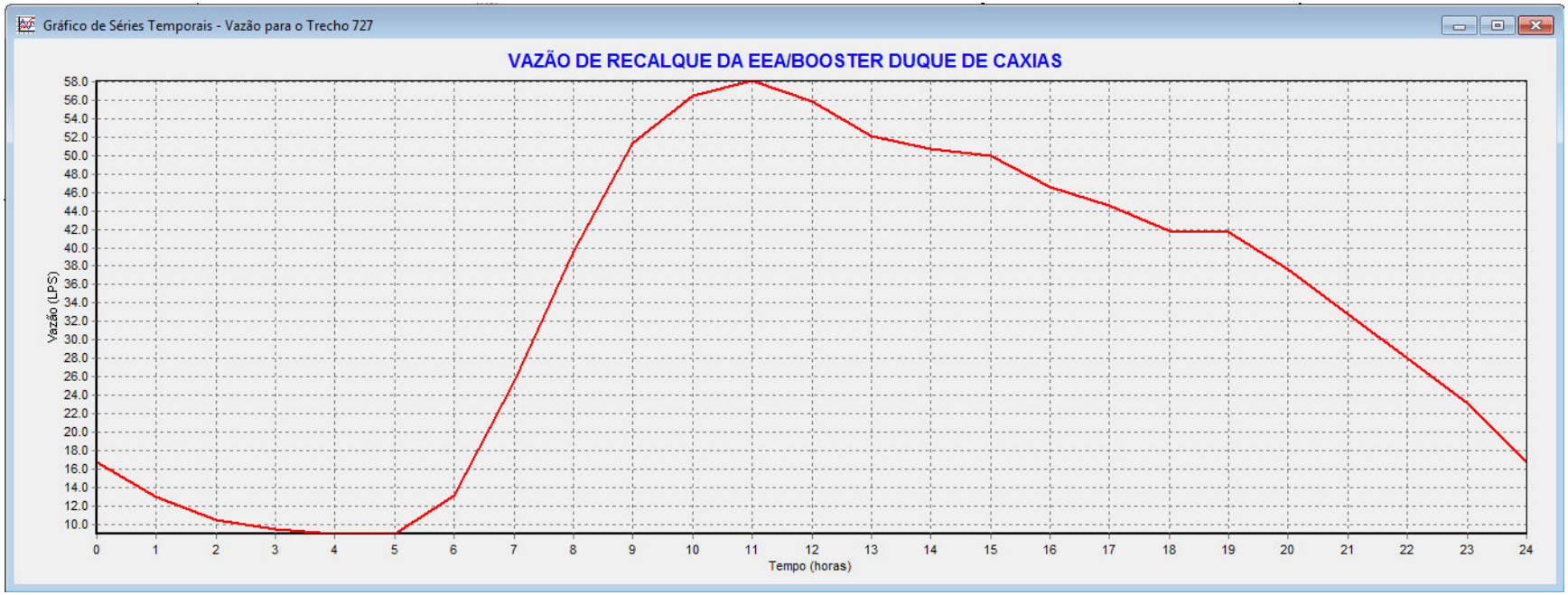

Figura 62. Vazão de recalque da bomba ao longo das 24 horas.

A Figura 63 aponta o perfil das pressões em período extensivo do nó 1.

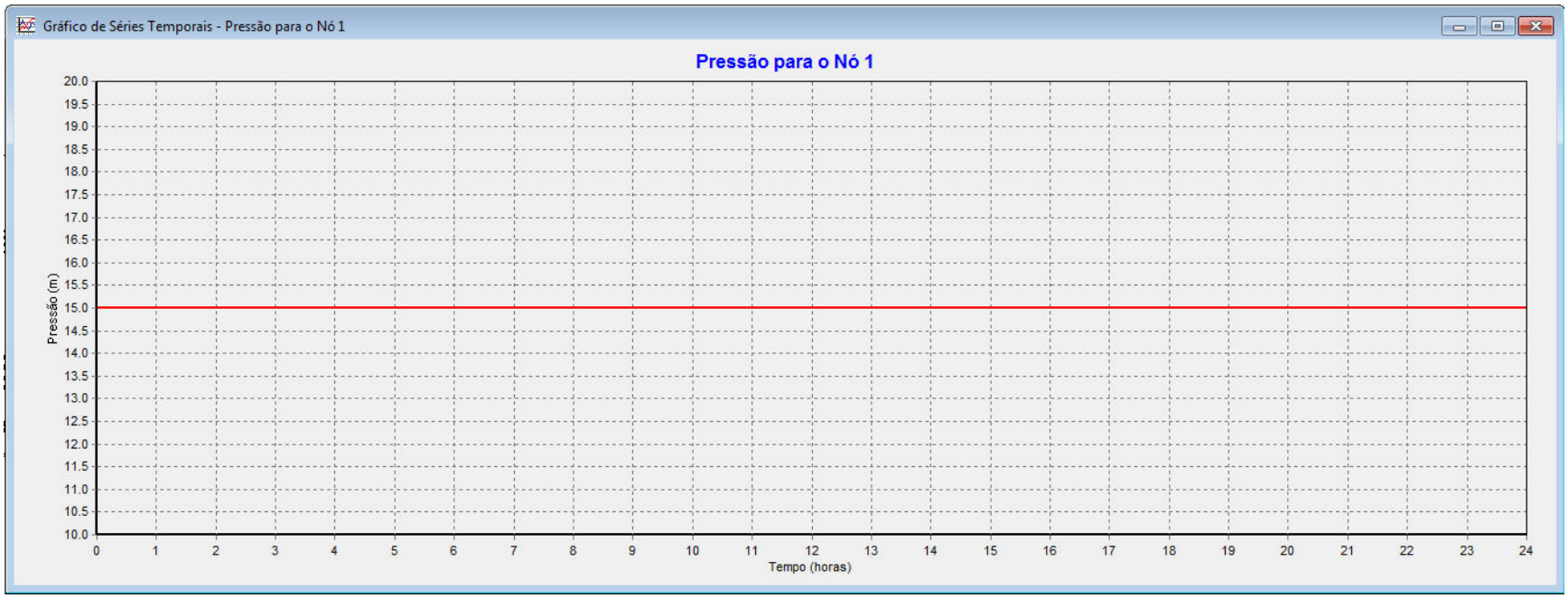

Figura 63. Variação das pressões ao longo das 24 horas no ponto de abastecimento mais crítico do sistema.

Já a Figura 64 representa a pressão instantânea no nó 1 e na região onde as pressões estão muito elevadas.

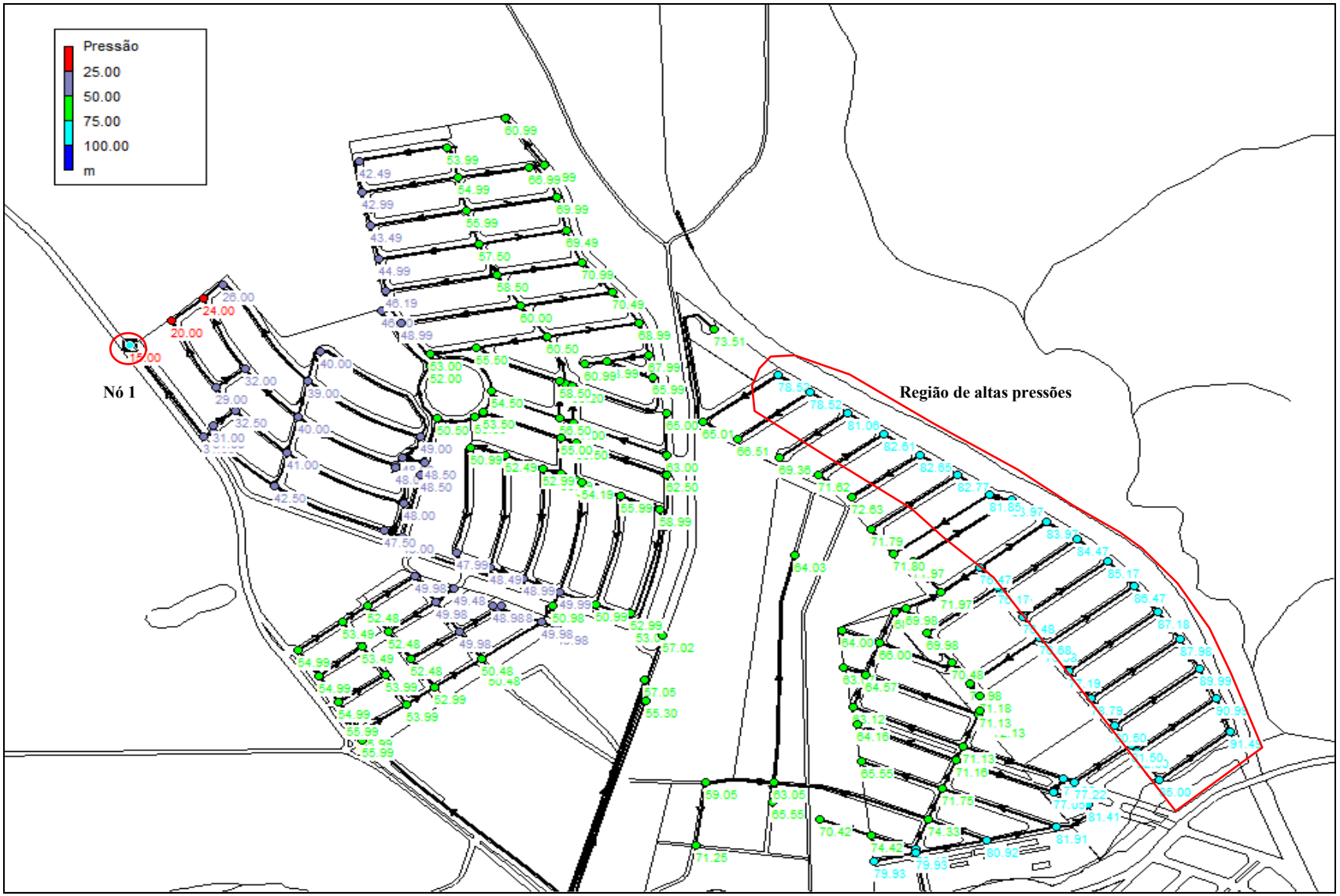

Figura 64. Pressões instantâneas no ponto mais crítico (nó 1) e na região mais favorável.

No ponto mais distante e crítico desse sistema de abastecimento, que está representado pelo nó 1, observa-se que a regra operacional proposta permitiu estabelecer nesse ponto, para todas as horas do dia, a pressão mínima requerida pelo sistema e definida pela companhia.

Essa operação permitiu a elevação das pressões no período da madruga e a redução nas demais horas do dia, favorecendo a redução da potencialidade de indício de rompimentos de redes e perdas de água não faturadas e contribuindo à eficiência energética do conjunto moto-bomba, que é o principal alvo dessa pesquisa.

Nesse cenário também foi aplicada a equação de tendência da curva de rendimento nominal e a vazão semelhante ou homóloga para a determinada rotação para calcular a cada vazão disponibilizada ao sistema, seu respectivo rendimento, potência, energia consumida e custo com a eletricidade, considerando a tarifação média de 0,3280 R$/kWh, como mostra a Tabela 25.

Tabela 25. Cálculo dos rendimentos, potências, energias e custos de operação da bomba com velocidade de rotação variável, conforme a operação disposta no cenário 3.

3º CENÁRIO - BOMBA COM INVERSOR DE FREQUÊNCIA OTIMIZADO								
Tempo (h)	Carga (m)	Vazão (m³/s)	Vazão Homóloga (m³/s)	Velocidade de Rotação (%)	Rendimento (%)	Potência (kW)	Energia (kWh)	Custo (R$)
0:00	53,68	0,01677	0,01409	84,02%	37,91	23,27	23,27	7,63
1:00	53,21	0,01299	0,01080	83,17%	34,70	19,52	19,52	6,40
2:00	52,96	0,01048	0,00867	82,77%	32,55	16,71	16,71	5,48
3:00	52,88	0,00952	0,00786	82,55%	31,71	15,56	15,56	5,10
4:00	52,84	0,00901	0,00743	82,48%	31,27	14,92	14,92	4,89
5:00	52,84	0,00899	0,00741	82,44%	31,25	14,90	14,90	4,89
6:00	53,23	0,01308	0,01078	82,44%	34,68	19,68	19,68	6,45
7:00	55,11	0,02547	0,02108	82,78%	44,33	31,03	31,03	10,18
8:00	58,48	0,03958	0,03342	84,43%	54,26	41,81	41,81	13,71
9:00	62,22	0,05137	0,04495	87,50%	61,95	50,56	50,56	16,59
10:00	64,08	0,05646	0,05131	90,87%	65,53	54,11	54,11	17,75
11:00	64,72	0,05811	0,05389	92,74%	66,85	55,13	55,13	18,08
12:00	63,88	0,05592	0,05221	93,36%	66,00	53,04	53,04	17,40
13:00	62,48	0,05212	0,04823	92,54%	63,86	49,98	49,98	16,39
14:00	62,00	0,05076	0,04626	91,14%	62,73	49,17	49,17	16,13
15:00	61,75	0,05002	0,04534	90,65%	62,19	48,68	48,68	15,97
16:00	60,62	0,04664	0,04216	90,40%	60,23	46,00	46,00	15,09
17:00	59,95	0,04453	0,03982	89,42%	58,72	44,55	44,55	14,62
18:00	59,12	0,04182	0,03715	88,83%	56,92	42,57	42,57	13,96
19:00	59,11	0,04176	0,03679	88,09%	56,67	42,69	42,69	14,00
20:00	57,96	0,03772	0,03322	88,07%	54,12	39,59	39,59	12,99
21:00	56,69	0,03275	0,02850	87,03%	50,51	36,02	36,02	11,82
22:00	55,63	0,02804	0,02408	85,88%	46,90	32,59	32,59	10,69
23:00	54,68	0,02311	0,01962	84,91%	43,03	28,78	28,78	9,44
						TOTAL	**870,84**	**285,66**

5.4 Sínteses dos resultados

Os principais parâmetros operacionais da máquina hidráulica nos três cenários apresentados estão demonstramos pelos gráficos abaixo relacionados.

A Figura 65 apresenta as curvas de cargas (alturas manométricas) da bomba para os três cenários.

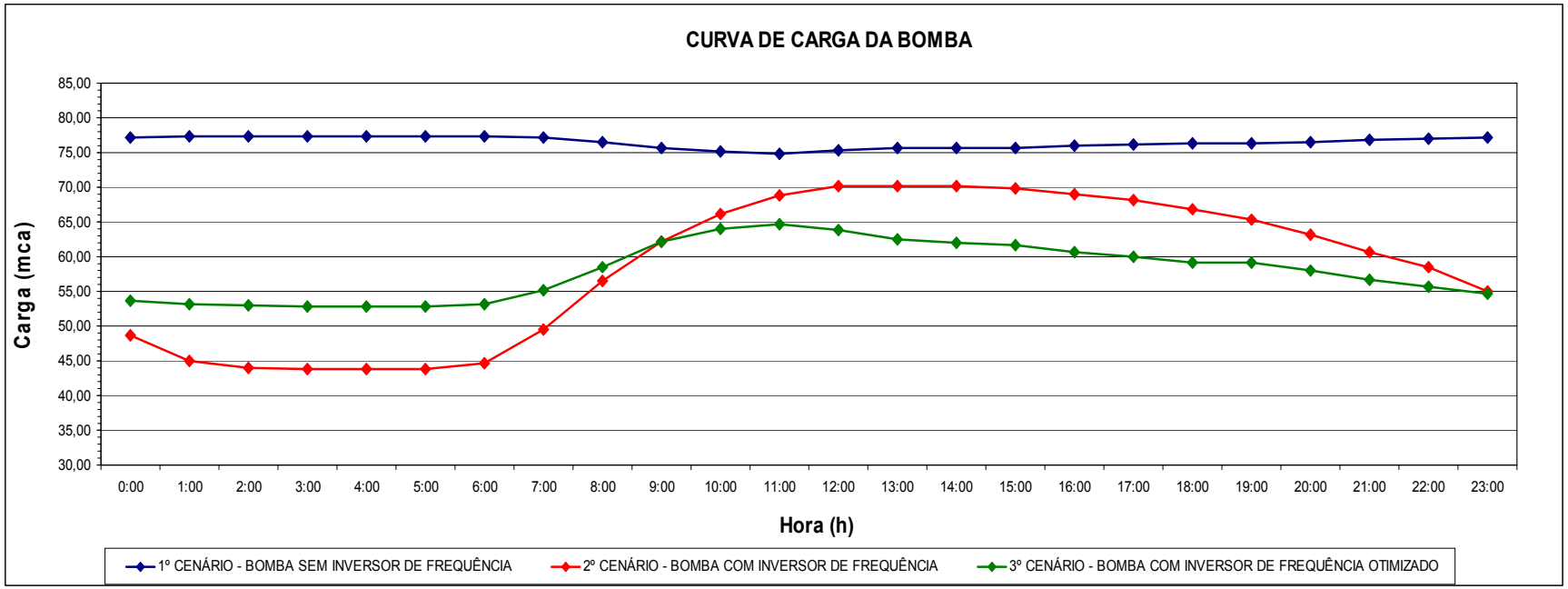

Figura 65. Curvas de cargas da bomba nos três cenários.

A Figura 66 apresenta as curvas de potência da bomba para os três cenários.

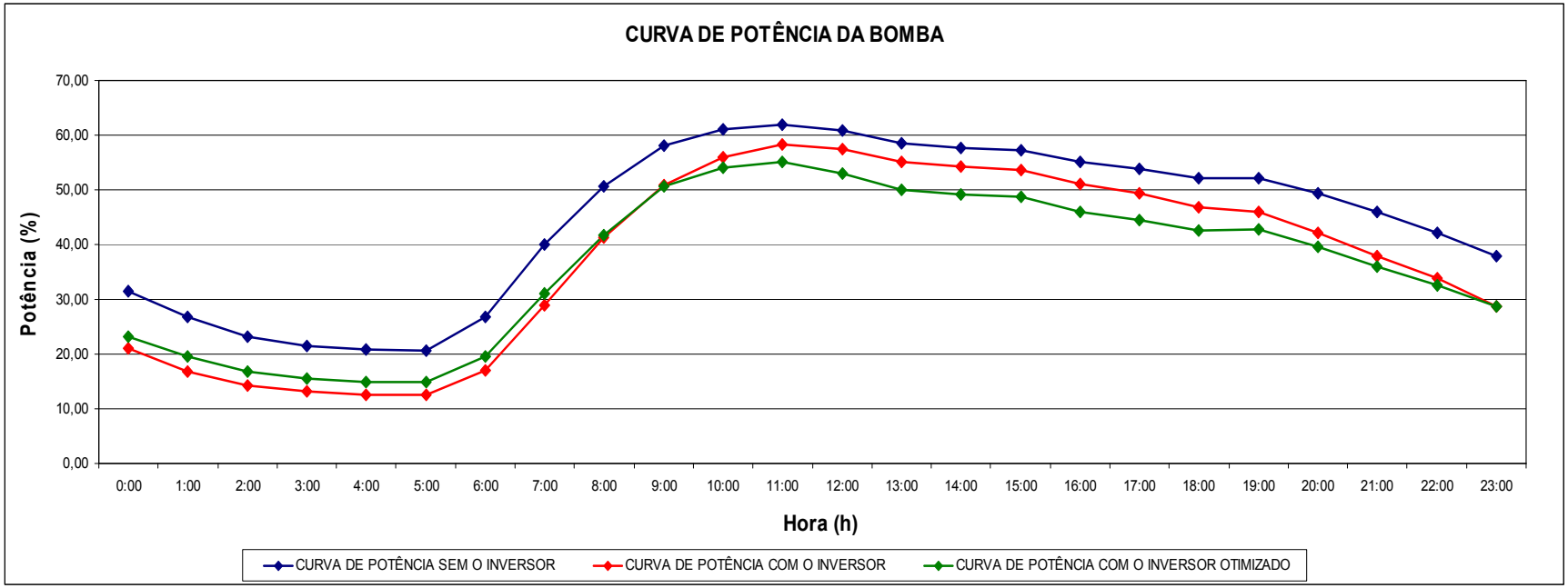

Figura 66. Curvas de potências da bomba nos três cenários.

A Figura 67 apresenta as curvas de rendimento da bomba para os três cenários.

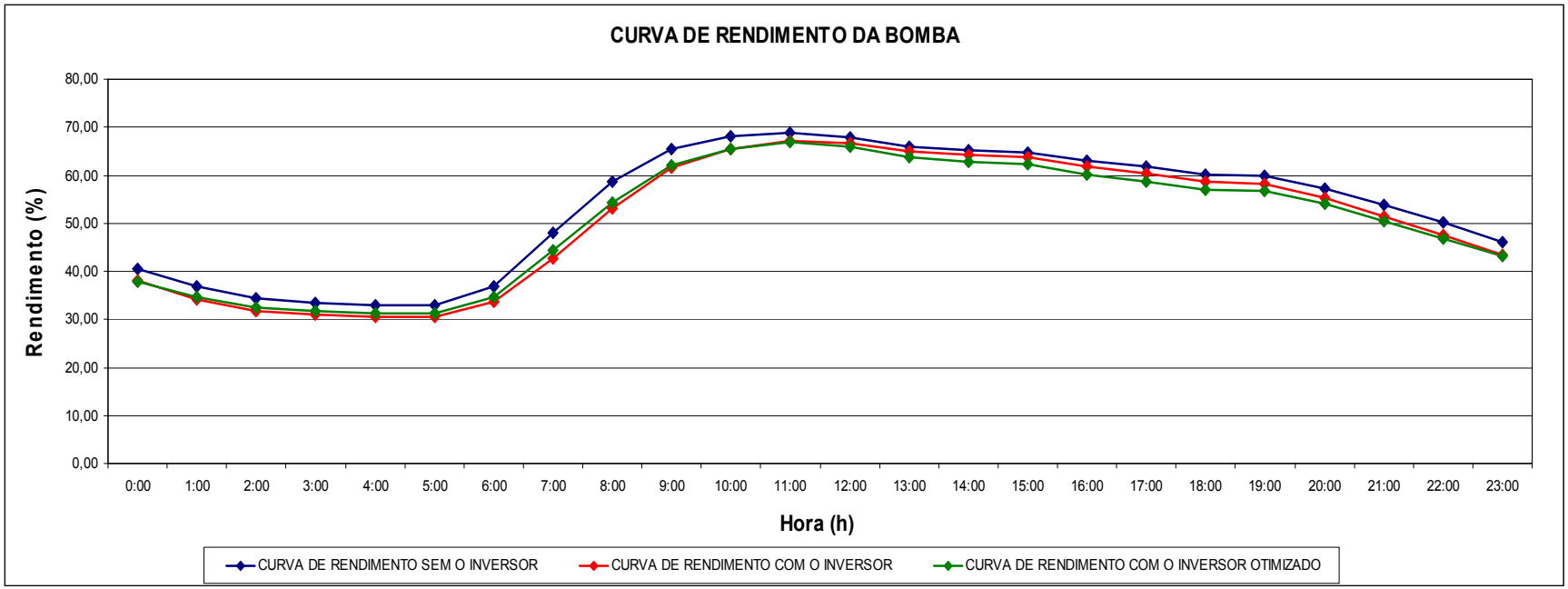

Figura 67. Curvas de rendimentos da bomba nos três cenários.

A Figura 68 apresenta as curvas de custos com energia elétrica da bomba para os três cenários.

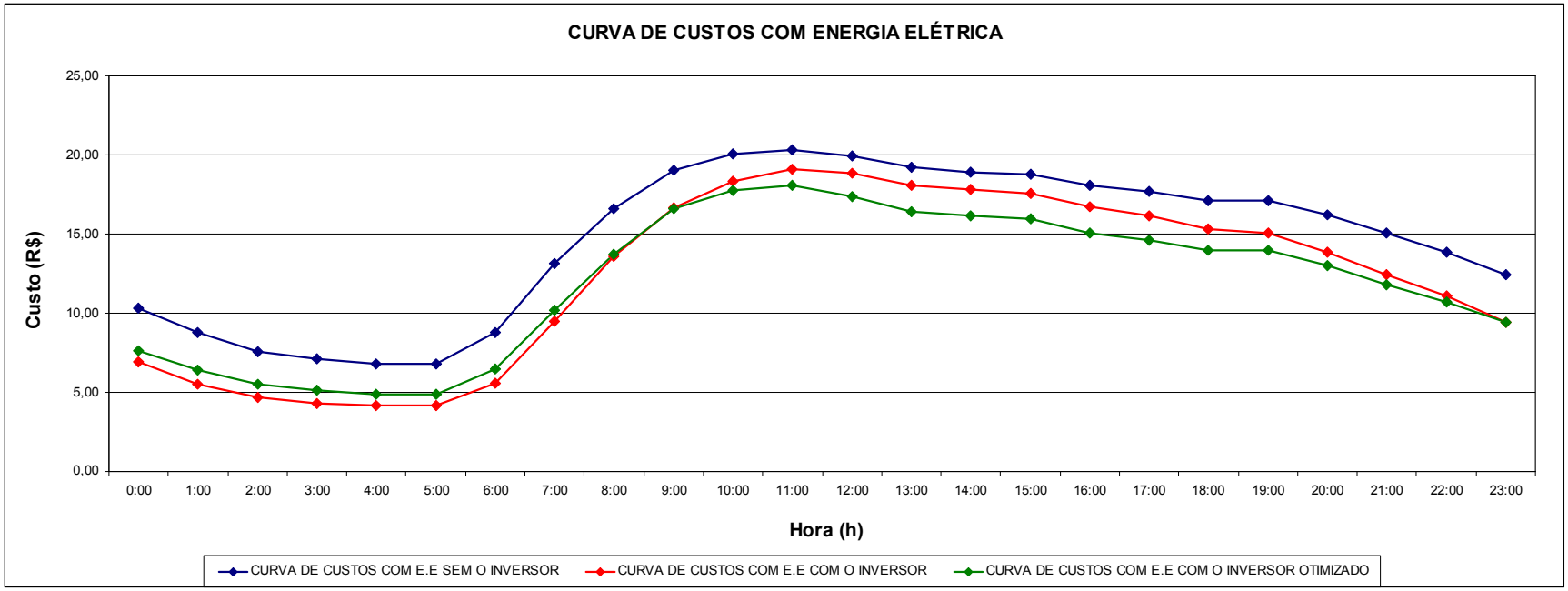

Figura 68. Curvas de custos com energia elétrica da bomba nos três cenários.

E por fim, a Figura 69 apresenta as curvas de velocidade de rotação da bomba para os três cenários.

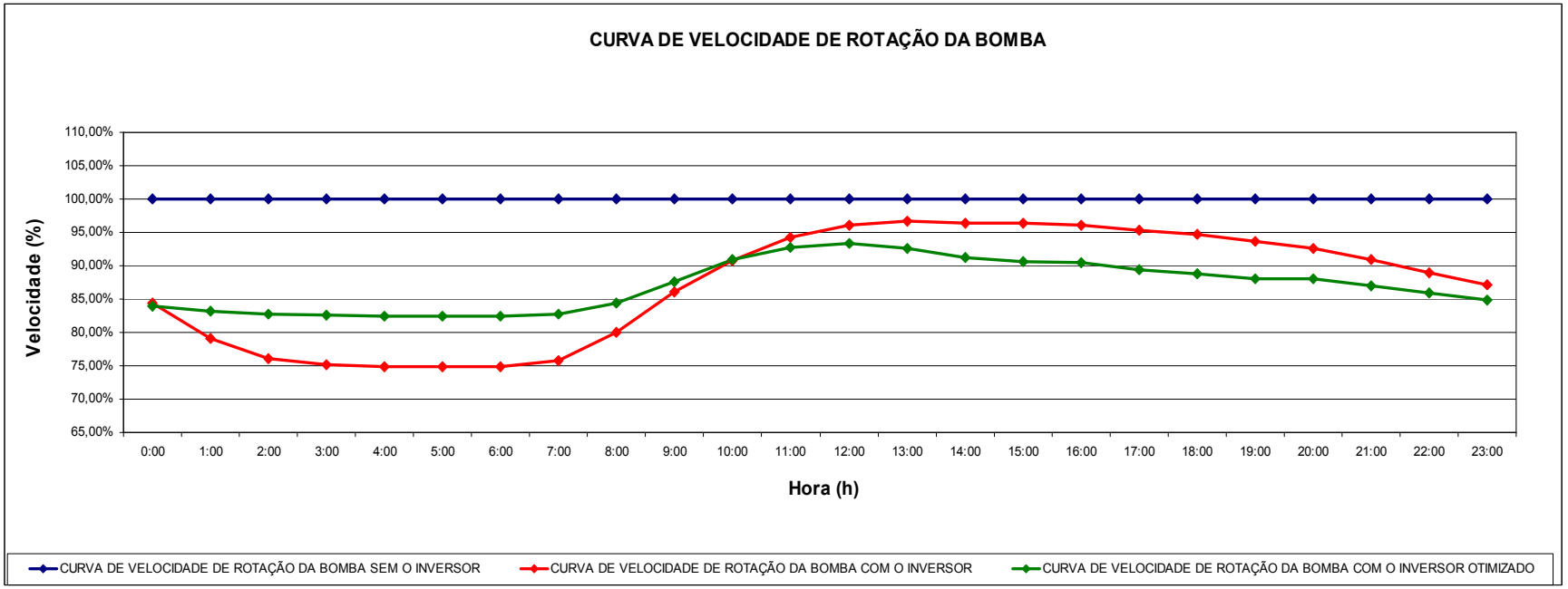

Figura 69. Curvas de velocidade de rotação da bomba nos três cenários.

A Tabela 26 apresentada abaixo relaciona comparativamente os resultados desses três cenários, no que se refere ao consumo de energia elétrica.

Tabela 26. Relação do consumo de energia elétrica nos três cenários.

CONSUMO DE ENERGIA (kW)	CENÁRIOS		
	1	2	3
DIÁRIA	1.065,92	898,96	870,84
MENSAL	31.977,59	26.968,84	26.125,29
ANUAL	383.731,13	323.626,04	313.503,50

O consumo mensal de energia elétrica calculado no cenário 2 é superior ao consumo efetivamente realizado pela concessionária no mês de Novembro de 2010, conforme disposto na Tabela 6. Essa diferença de valores é justificada pelas vazões médias adotadas, que por sua vez foram extrapoladas levando em conta apenas as medições dos sete primeiros dias do período acima especificado.

Já a Tabela 27 relaciona comparativamente os resultados desses três cenários, no que se refere aos custos com energia elétrica.

Tabela 27. Relação do custo com energia elétrica nos três cenários.

CUSTOS COM ENERGIA	CENÁRIOS		
(R$)	1	2	3
DIÁRIA	349,66	294,89	285,66
MENSAL	10.489,67	8.846,64	8.569,93
ANUAL	125.876,09	106.159,70	102.839,18

E por fim, a Tabela 28 apresenta as reduções de consumo e custos com energia elétrica entre os cenários, comparando um com os demais cenários.

Tabela 28. Relação da redução de consumo e custos com energia elétrica nos três cenários.

CENÁRIOS	REDUÇÃO DE CONSUMO E CUSTOS COM ENERGIA ELÉTRICA (%)
1 ao 2	15,66
1 ao 3	18,30
2 ao 3	3,13

Nota-se que o Cenário 2, o qual representa a atual operação da máquina hidráulica tem demonstrado uma considerável eficiência, apresentando uma redução de 15,66% no consumo de energia elétrica, tendo por comparação a operação do sistema com a bomba à rotação constante.

Já o Cenário 3, o qual faz referência à operação proposta por esse trabalho de pesquisa, tem resultado valores ainda mais atrativos, apresentando uma redução de 18,3% e 3,13% no consumo de energia elétrica, tendo por comparação a operação do sistema com os Cenários 1 e 2, respectivamente.

Assim sendo, pelos resultados demonstrados evidencia-se que a eficiência energética conquistada na operação dos conjuntos moto-bomba nos Cenários 2 e 3 é expressivamente conveniente operacional e financeiramente.

6. CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS

Esse trabalho de pesquisa faz abordagem ao uso eficiente de energia elétrica em sistema de abastecimento de água através do emprego de inversor de freqüência nos conjuntos moto-bomba.

A grande motivação para a realização dessa pesquisa se deve a carência de informação sobre esse dispositivo e principalmente sobre o princípio operacional adotado nos sistemas elevatórios de água provido dessa ferramenta.

As conclusões tomadas sobre o respectivo tema e sobre as avaliações experimentais, as quais serão apresentadas a seguir, somente foram viabilizadas mediante aos compartilhamentos de informações disponibilizadas por alguns autores que também investigaram com profundidade o assunto e principalmente à generosidade dispensada pela FOZ DO BRASIL – Unidade Limeira, que tem apostado e creditado confiança no desenvolvimento dessa pesquisa, disponibilizando dados, informações, instalações, equipamentos e toda a estrutura necessária para o desenvolvimento das análises. Certamente sem esse apoio incondicional prestado, dificilmente o objetivo dessa pesquisa seria conquistado.

Pelas avaliações realizadas nessa pesquisa, tem-se a apresentar por principais conclusões e recomendações, que indiscutivelmente o uso do inversor de freqüência na estação pressurizadora de água Duque de Caxias tem resultado uma significante eficiência energética e operacional do sistema e também tem se demonstrado uma ferramenta fundamental para o controle das pressões nas redes de distribuição de água.

A curva das velocidades de rotação da bomba estabelecida no Cenário 2 foi constituída e calibrada considerando os dados operacionais médios de altura manométrica e vazão da bomba registrados nos monitoramentos anteriormente especificados, que a rigor representa a regra operacional estabelecida pela Foz do Brasil. Pelos resultados aqui apresentados, tal regra tem-se mostrada eficiente, porém evidencia-se pelas análises e simulações, que se aplicada a operação instituída no Cenário 3, a operação do sistema poderá ser mais eficaz em termos energéticos e operacionais.

É válido observar que a bomba em operação possui capacidade superior à requerida pelo sistema e também que nos pontos de operação, correspondentes a média e máxima vazão, as faixas de rendimento alcançados muito se tem distanciado das curvas de melhores rendimentos. Como sugestão de melhoria operacional é deixada por proposição dessa pesquisa uma revisão mais criteriosa do dimensionamento da máquina hidráulica supostamente ideal para operação desse sistema.

Enfatiza-se que o melhor dimensionamento possível para um conjunto moto-bomba é aquele em que o ponto de operação para a máxima vazão esteja situado à direita das curvas de melhores rendimentos, de tal forma que, ao longo das faixas de vazão médias operacionais, a curva do sistema flutuasse nas faixas de melhores rendimentos do conjunto, resultando assim um rendimento mais eficiente.

Além disso, cabe mencionar que setorizações, mudanças no abastecimento ou provisão de novas válvulas redutoras de pressão seriam viáveis de se executar nas regiões topograficamente mais acidentadas ou mais favoráveis ao abastecimento, para que as cargas hidráulicas pudessem ser reduzidas.

Essas e outras possíveis ações potencialmente resultariam na redução de indícios de rompimento de tubulações, que diretamente está atrelado a custos operacionais de mão-de-obra, peças, materiais, máquinas e equipamentos usados na reabilitação das redes de distribuição e limpeza das vias públicas, desperdício de produtos químicos e energia usada no tratamento e transporte da água perdida, seja pelo vazamento em si e pela limpeza da(s) tubulação(s), através das descargas após a execução do reparo; interrupção da distribuição de água no setor de influência, que ocasiona insatisfação dos clientes afetados e também na necessidade, em casos de maior gravidade, de divulgação nos meios de comunicação local; e tantas outras conseqüências suscetíveis.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTMANN, D; LANG, P. C; RIGON, K. **Modulação da velocidade em bombas submersas para redução das perdas físicas e energéticas nos subsistemas de distribuição**. Programa de conservação de energia. COMUSA. Novo Hamburgo – RS. Disponível em:< www.semasa.sp.gov.br/admin/biblioteca/docs/.../35Assemae024.pdf>.Acesso em:18/05/2011.

ANEEL. 2008. Disponível em:<www.aneel.gov.br>. Acesso em: 2011.

ANEEL. Energia Hidráulica. **Potenciais e geração hidrelétrica no Brasil**. 2007. Disponível em: <www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_par2_cap3.pdf>. Acesso em: 22/05/2011.

AZEVEDO, L. G. T.; PORTO, R. L.; FILHO, K. Z. Sistemas de suporte a decisões aplicados a problemas de recursos hídricos. In: **Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento dos Recursos Hídricos**. 2000. ABRH, Editora UFRGS, Porto Alegre - RS.

BARRETO, M. P. et al. Aplicações de inversores de frequência em sistemas de abastecimento de água. 2007. In: **37ª Assembléia Nacional da ASSEMAE**. Guarulhos – SP. Disponível em:<www.eletrobras.com/elb/.../FileDownload.EZTSvc.asp?...>. Acesso em: 17/05/2011.

CLINGENPEEL, W. H. Optimizing Pump Operating Cost - Journal of American Water Works Association. nº 10, Vol 75, p. 502-509, 1983. In: VICENTE, R. V. **Modelo de operação para centros de controle de sistemas de abastecimento de água. Estudo de caso: Sistema adutor metropolitano de São Paulo**. 2005. 139p. Tese (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-10042006-141721/pt-br.php>. Acesso em: 23/03/2011.

COURA**,** S. P. A conta de energia elétrica no saneamento. **Guias práticos – Técnicas de operação em sistemas de abastecimento de água**. v. 5. Brasília: Ministério das Cidades, SNSA, 2007.

CUNHA, A. A. R. **Otimização energética em tempo real da operação de sistemas de abastecimento de água**. 2009. 179p. Tese (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos – SP. Disponível em:< www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde.../Alice_Cunha.pdf>. Acesso em:18/03/2011.

ELEKTRO. **Banco de Dados**. Empresa Elektro S/A. 2010. Limeira - SP

EPANET. **Manual EPANET 2.0**. 191p. cap 9 – Simulação hidráulica utilizando o EPANET 2.0. Disponível em:< http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/epanet/manual_do_epanet_brasil.pdf >. Acesso em: 24/04/2011.

FOZ DE LIMEIRA. **Banco de Dados**. Empresa Foz do Brasil S/A. 2010. Limeira – SP.

GUMIER, C. C.; LUVIZOTTO JR, E. **Aplicação de modelo de simulação-otimização na gestão de perda de água em sistemas de abastecimentos**. 2007. In: Artigo Técnico - Engenharia Sanitária Ambiental, Volume12, Número 1, Páginas 32-41. Rio de Janeiro – RJ. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/esa/v12n1/a05v12n1.pdf>. Acesso em: 21/03/20111.

GURGEL, B. B. F. A. **Proposição de uma metodologia para avaliação de inversores de freqüência em estações elevatórias de água. Estudos de casos no sistema de abastecimento de água de São José dos Campos**. 2006. 130p. Tese (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP. Disponível em: < www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/.../MestradoBrenoGurgel.pdf >. Acesso em:19/03/2011.

IBGE. 2009. Disponível em:<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/indicadoresminimos/sinteseindicsociais2009/indic_sociais2009.pdf>. Acesso em: 20/10/2009.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Situação do Saneamento no Brasil**. 2011. Disponível em: <http://www. tratabrasil. org.br/detalhe.php?secao=20. Acesso em: 14/05/2011.

KSB. Disponível em:<www.ksb.com.br>. Acesso em: 23/06/2011.

MACHADO, C. J. S. **Recursos hídricos e cidadania no Brasil: limites, alternativas e desafios**. 2003. Ambiente & Sociedade, Volume 6, Número 2, Páginas 121-136.

MACINTYRE, A. J. **Bombas e instalações de bombeamento**. 2ª ed. 1987. 782p. Ed. Guanabara. Rio de Janeiro – RJ.

MAKINO, D. L. **Transposição de águas entre bacias hidrográficas: Estudo de caso do município de Iracemápolis–SP**. 2007. 64p. Trabalho de Graduação Interdisciplinar, Centro Superior de Educação Tecnológica - Universidade Estadual de Campinas, Limeira – SP.

MARTINS, V. A; PEREZ. A. M. E. A; BARDALES, K. L. N; GONÇALVES, F. V; CHEUNG, P. B; IDE, C. N. Modelagem computacional como ferramenta para estudos de eficiência energética no saneamento. 2006. In: **VI – SEREA - Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água**. Anais.... João Pessoa - PB. Disponível em:< http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/6serea/TRABALHOS/trabalhoM%20(3).pdf>. Acesso em: 15/04/2011.

MATOS FILHO, A. B. A. Uma Visão sobre a Formação Profissional nas Empresas do Novo Setor de Energia Elétrica Brasileiro. 2001. 46 p (p 3-7). Monografia (MBA em Energia Elétrica) – Instituto de Economia da UFRJ, Rio de Janeiro. In: SOUSA, H. **Análise de preços de energia**

elétrica em sistemas hidrotérmicos. 2008. 143p. Tese (Mestrado em Engenharia Civil na área de Recursos Hídricos) – Universidade estadual de campinas, Campinas – SP. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000431961>. Acesso em: 18/03/2011.

NETTO, A; ALVAREZ, G. A. **Manual de Hidráulica**. 1991. 335p. 7ª ed. Ed. Edgard Blucher Ltda. São Paulo – SP.

PALINI JUNIOR, L. **Perdas físicas de água em sistemas de abastecimento: método de diagnóstico, controle e redução através de sistema de informações geográficas**. 2008. 189p. Tese (Mestrado em Engenharia Civil, na área de Recursos Hídricos) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP. Disponível em: < http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000470530 >. Acesso em: 20/05/2011.

PALO, P. R. **Avaliação da eficácia de modelos de simulação hidráulica na obtenção de informações para diagnóstico de perdas de água**. 2010. 168p. Tese (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo – SP. Disponível em: < http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-27092010-104217/pt-br.php >. Acesso em: 21/05/2011.

PERETO, A. S. Comentários aos manuais do PROCEL: "Eficiência energética nos sistemas de saneamento" e "Programa de saneamento", como contribuição à otimização do uso de energia elétrica. 2003. In: **22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Anais.... Joinville - SC. Disponível em: < http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/abes22/lxxv.pdf >. Acesso em: 25/03/2011.

Programa de Modernização do Setor Saneamento. In: Sistema Nacional de informações sobre Saneamento: diagnóstico dos serviços de água e esgotos. 2007. 233p. Brasília: MCIDADES. SNSA. 2009.

ReCESA. **Guia do profissional em treinamento: nível 2.** Abastecimento de água: gerenciamento de perdas de água e energia elétrica em sistemas de abastecimento**.** 2008. 139p. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org). – Salvador: ReCESA.

RODRIGUES, W. **Critérios para o uso eficiente de inversores de freqüência em sistemas de bombeamento de água**. 2007. 208p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil, na área de Recursos Hídricos) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP. Disponível em:< http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/zeus/auth.php?back=http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000419830&go=x&code=x&unit=x >. Acesso em: 21/03/2011.

SANEAR. **Saneamento**. 2011. Disponível em: <http://www.eletrobras.com/elb/procel/main.asp?TeamID={17B0348E-BC5F-44B2-8FB4-6A9BEEF33020}>. Acesso em: 24/10/2011.

SANEAS. **Publicação Técnica Bimestral dos Engenheiros da Sabesp - AESABESP**. 2008. Revista. Ano IX, Outubro/Dezembro.

SOUZA, H. **Análise de preços de energia elétrica em sistemas hidrotérmicos**. 2008. 143p. Tese (Mestrado em Engenharia Civil na área de Recursos Hídricos) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000431961>. Acesso em: 18/03/2011

SOUSA, M. **Aproveitamentos energéticos em sistemas de saneamento**. 2005. 111p. Tese (Mestrado em Engenharia Civil, na área de Recursos Hídricos) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP.

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento. Ministério das Cidades. **Diagnósticos dos Serviços de Água e Esgoto – 2009**. Brasília - DF. 2011. Disponível em: http://www.snis.gov.br. Acesso em: 10/04/2011.

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento. Ministério das Cidades. **Diagnósticos dos Serviços de Água e Esgoto – 2007**. Brasília - DF. 2009. Disponível em: http://www.snis.gov.br. Acesso em: 26/05/2009.

TAKAMI, R. Hidrotécnica. **Apostila**. 2005. 115p. CESET – Centro Superior de Educação Tecnológica – Universidade Estadual de Campinas. Limeira – SP.

TSUTIYA, M. T. Redução do Custo de Energia Elétrica em Sistemas de Abastecimento de Água – ABES. 1ª Ed. 2001. São Paulo. In: RODRIGUES, W. **Critérios para o uso eficiente de inversores de freqüência em sistemas de bombeamento de água**. 2007. 208p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil, na área de Recursos Hídricos) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP. Disponível em:< http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/zeus/auth.php?back=http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000419830&go=x&code=x&unit=x >. Acesso em: 21/03/2011.

TSUTIYA, M. T. Abastecimento de água. 1ª Ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. Escola Politécnica da universidade de São Paulo. 2004. 634p. São Paulo – SP. In: GURGEL, B. B. F. A. **Proposição de uma metodologia para avaliação de inversores de freqüência em estações elevatórias de água. Estudos de casos no sistema de abastecimento de água de São José dos Campos**. 2006. 130p. Tese (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-13032007-011128/pt-br.php>. Acesso em: 19/03/2011.

TUNDISI, J. G. **Água no século XXI: enfrentando a escassez**. 2003. 248p. RiMa IIE – São Carlos – SP.

VIANA, A. N. C. **Máquinas Hidráulicas**. Apostila. 38p. cap 2 – Considerações sobre bombas de fluxo. 2010. Disponível em:< xa.yimg.com/kq/.../Considerações+sobre+bombas+cap+2+2010.doc >. Acesso em: 15/04/2011.

VICENTE, R. V. **Modelo de operação para centros de controle de sistemas de abastecimento de água. Estudo de caso: Sistema adutor metropolitano de São Paulo**. 2005. 139p. Tese(Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP. Disponível em: < http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-10042006-141721/pt-br.php >. Acesso em: 23/03/2011.

ZESSLER, U; SHAMIR, U. Optimal Operation of Water Distribution Systems – Journal of Water Resources Planning and Management n° 6, Vol. 115, p. 735-751, 1989. In: RODRIGUES, W. **Critérios para o uso eficiente de inversores de freqüência em sistemas de bombeamento de água**. 2007. 208p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil, na área de Recursos Hídricos) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP. Disponível em:< http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/zeus/auth.php?back=http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000419830&go=x&code=x&unit=x>. Acesso em: 21/03/2011.

WEG. **Guia Técnico**. Motores de indução alimentados por inversores de freqüência PWM.