

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE GUARATINGUETÁ

MATEUS RICARDO NOGUEIRA VILANOVA

**Desenvolvimento e avaliação de indicadores de eficiência
hidráulica e energética para sistemas de abastecimento de água
como ferramenta de suporte à tomada de decisões**

Guaratinguetá

2012

MATEUS RICARDO NOGUEIRA VILANOVA

**Desenvolvimento e avaliação de indicadores de eficiência
hidráulica e energética para sistemas de abastecimento de água
como ferramenta de suporte à tomada de decisões**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de
Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista para
obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Transmissão e Conversão de Energia

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Perrella Balestieri

Co-orientador: Prof. Dr. Paulo Magalhães Filho

Guaratinguetá

2012

V696d	Vilanova, Mateus Ricardo Nogueira Desenvolvimento e avaliação de indicadores de eficiência hidráulica e energética para sistemas de abastecimento de água como ferramenta de suporte à tomada de decisões / Mateus Ricardo Nogueira Vilanova - Guaratinguetá : [s.n.], 2012. 316 f. : il. Bibliografia: f. 249-266 Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012. Orientador: Prof. Dr. José Antônio Perrella Balestieri Coorientador: Prof. Dr. Paulo Magalhães Filho 1. Abastecimento de água 2. Água – conservação 3. Energia elétrica – conservação I. Título CDU 628.1(043)
-------	--

MATEUS RICARDO NOGUEIRA VILANOVA

**ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA"**

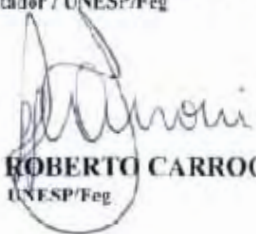
**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

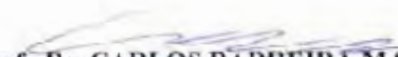

Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO PERRELLA BALESTIERI
Orientador / UNESP/Feg


Prof. Dr. LUIZ ROBERTO CARROCCI
UNESP/Feg


Prof. Dr. RUBENS ALVES DIAS
UNESP/Feg


Prof. Dr. CARLOS BARREIRA MARTINEZ
UFMC/ Depto. de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos


Prof. Dr. MARCELO RODRIGUES DE HOLANDA
USP/EEL

Novembro de 2012

DADOS CURRICULARES
MATEUS RICARDO NOGUEIRA VILANOVA

NASCIMENTO	02.07.1980 – ITAJUBÁ / MG
FILIAÇÃO	Wilton Ricardo Barbosa Vilanova Maria de Fátima Sonja Nogueira Vilanova
2002/2005	Curso de Graduação em Engenharia Hídrica Universidade Federal de Itajubá
2006/2008	Curso de Pós-graduação em Engenharia da Energia Nível de Mestrado Universidade Federal de Itajubá

Dedico essa tese aos meus pais, Ricardo e Fátima, e a minha avó, Antonieta.

Dedico, também, a todas as pessoas que trabalham de forma dedicada e honesta para tornar seus sonhos realidade, ao contrário da maioria que aceita o acaso e se deixa levar pela vida.

AGRADECIMENTOS

Aos professores *José Antônio Perrella Balestieri* e *Paulo Magalhães Filho*, pela oportunidade, ensinamentos, conselhos e amizade.

Aos amigos *Tales Mota* e *Donizete Ferreira*, da COPASA/Itajubá, pela disponibilização de dados e informações utilizadas na pesquisa.

Aos amigos *Mario*, *Fábio* e *Damon*, do SAAE Passos/MG, também pela disponibilização de dados e informações utilizadas na pesquisa.

À senhora *Ana Maria Ramos Antunes*, supervisora técnica da Seção Técnica de Referência Atendimento ao Usuário e Documentação da Biblioteca Prof. Carlos Alberto de Buarque Borges, pelo auxílio na obtenção de referências bibliográficas utilizadas no trabalho, bem como às outras funcionárias da biblioteca que auxiliaram nessa obtenção.

Aos professores *Francisco Antonio Lotufo*, *Rubens Alves Dias* e *Fernando Augusto Silva Marins*, e ao colega *Marco Aurélio Reis*, pelos ensinamentos e apoio em questões técnicas relacionadas à tese.

À professora *Isabel Cristina de Barros Trannin*, pela amizade e parceria profissional.

Aos diversos professores e pesquisadores de universidades e centros de pesquisa brasileiros e estrangeiros, que disponibilizaram artigos e modelos computacionais analisados e algumas vezes utilizados durante a pesquisa.

Aos professores *Luiz Roberto Carrocci* e *Silvio Jorge Coelho Simões*, integrantes da banca de qualificação desta pesquisa, e ao professor *José Alexandre Matelli*, pelas valiosas sugestões e contribuições para o aperfeiçoamento da tese.

Ao engenheiro *Brunno Daibert Andrés*, da Construtora Vibrat Ltda, pela amizade e confiança no meu trabalho desde os tempos de graduação.

Às Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (ELETROBRAS) e à Fundação ROGE, pela concessão de bolsa para desenvolvimento dessa pesquisa.

Este trabalho contou com apoio das seguintes entidades:

Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (ELETROBRÁS) – através do convênio ECV-274/2008

VILANOVA, M. R. N. **Desenvolvimento e avaliação de indicadores de eficiência hidráulica e energética para sistemas de abastecimento de água como ferramenta de suporte à tomada de decisões.** 2012. 316 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

RESUMO

Água e energia elétrica são recursos fundamentais para o desenvolvimento humano, sendo seu uso racional e conservação em sistemas de abastecimento de água fundamentais para a promoção do desenvolvimento sustentável. Nesse contexto, a presente tese se propôs a desenvolver um conjunto de indicadores de eficiência hidráulica e energética para sistemas de abastecimento de água, que permite comparar a situação atual de um sistema com a sua condição tecnicamente ótima, referente aos fatores e componentes, físicos e operacionais, mais relevantes no contexto hidráulico e energético. Esta condição ótima, representada por um valor-alvo, corresponde ao valor da variável analisada que propicia o menor consumo de água e/ou energia elétrica na unidade considerada, atendendo, simultaneamente, aos limites e requisitos operacionais do sistema (demandas de água e pressões de serviço, variáveis em termos espaciais e temporais). Para tanto, foi realizada a modelagem hidráulica e energética generalizada destes sistemas, identificando seus principais fluxos hidráulicos e energéticos. Através de processos de otimização e simulação, foram propostos e desenvolvidos quatro indicadores: indicador de operação otimizada de bombeamento, indicador de recuperação de energia hidráulica, indicador de carga hidráulica disponibilizada e indicador de eficiência hídrica. Após a modelagem teórica e conceitual, os indicadores propostos foram aplicados em casos reais. Os resultados dos casos estudados indicam que os indicadores propostos permitiram quantificar e analisar satisfatoriamente os níveis de eficiência hidráulica e energética, compondo importantes ferramentas para o gerenciamento sustentável de sistemas de abastecimento de água.

PALAVRAS-CHAVE: Abastecimento de água. Medição de desempenho. Conservação e uso racional de água e energia elétrica. Sustentabilidade.

VILANOVA, M. R. N. **Development and evaluation of hydraulic and energetic efficiency indicators for water supply systems as decision-making support tool.** 2012. 316 f. Thesis (Doctorate in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

ABSTRACT

Water and electricity are key resources for human development, been their rational use and conservation in water supply systems critical for promoting sustainable development. In this context, this thesis proposes to develop a set of hydraulic and energetic efficiency indicators for water supply systems, which allows you to compare the current state of a system with its technically optimal condition, referring to the more relevant factors and components, physical and operational, in the context of hydraulic and energy efficiency. This optimum condition, represented by a target value, corresponds to the value of the variable analyzed that provides the lowest water and electricity consumption in the unit considered, given both the limits and operational requirements of the system (water demands and service pressures service, varying in spatial and temporal scales). Therefore, hydraulic and energetic modeling of these systems was performed to identify its main hydraulic and energetic flows. Through optimization and simulation processes, four indicators were proposed and developed: optimal operation of pumping indicator, hydraulic energy recovery indicator, supplied hydraulic head indicator and water efficiency indicator. After the conceptual and theoretical modeling, the proposed indicators were applied to real cases. The results of the case studies indicate that the proposed indicators allowed satisfactorily quantifying and analyzing the levels of energy and hydraulic efficiency, composing important tools for the sustainable management of water supply systems.

KEYWORDS: Water supply. Performance measurement. Water and electricity conservation and rational use. Sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Matriz elétrica brasileira, em 25/11/2010 (BRASIL, 2010b)	37
Figura 2 – Composição do consumo de energia elétrica no Brasil em 2009, por setor (BRASIL, 2010c)	38
Figura 3 – Vazões de retirada de sub-bacias brasileiras, e zonas de demanda – ano base 2009 (BRASIL, 2011a)	42
Figura 4 – Disponibilidade e estresse quantitativo/qualitativo no Brasil – ano base 2009 (BRASIL, 2011a)	42
Figura 5 – Projeção da situação dos sistemas de abastecimento de água brasileiros para 2015 (adaptado de BRASIL, 2010a)	44
Figura 6 – Mapa com a projeção da situação dos sistemas de abastecimento de água brasileiros para 2015 (adaptado de BRASIL, 2010a).....	45
Figura 7 – Atividades-chave (cadeia de suprimentos) de indústrias de abastecimento de água e águas residuais (adaptado de Abbott e Cohen, 2009).....	47
Figura 8 – Inter-relações entre usos de água e energia (adaptado de UNESCO, 2009).....	52
Figura 9 – Dificuldade de melhoria da performance de sistemas de abastecimento de água, em função do nível de serviço (adaptado de KINGDOM, 1998).....	55
Figura 10 – Configurações de redes de distribuição de água e localizações populacionais avaliadas energeticamente (adaptado de Filion, 2008).....	55
Figura 11 – Influência de vazamentos sobre sistemas de bombeamento (adaptado de COLOMBO; KARNEY, 2005)	57
Figura 12 – Componentes do balanço hídrico e localização dos pontos de medição de vazão, segundo a IWA (adaptado de Alegre <i>et al.</i> , 2004)	59
Figura 13 – Potencial eólico brasileiro, por região (BRASIL, 2008a)	66
Figura 14 – Radiação solar média no Brasil (BRASIL, 2008a)	67
Figura 15 – Dimensões do desempenho, segundo Sink e Tuttle (1989, adaptado de ANDERSEN; FAGERHAUG, 2002).....	74
Figura 16 - Relação entre índices e indicadores, e público alvo (adaptado de Shields <i>et al.</i> , 2002).....	77
Figura 17 – Mapa mundial do uso de <i>benchmarking</i> para o setor de abastecimento de água (adaptado de WALTER <i>et al.</i> , 2009).....	88
Figura 18 – Processo de desenvolvimento de sistemas de medição de performance (adaptado	

de Andersen; Fagerhaug, 2002).....	109
Figura 19 – Método para desenvolvimento de indicadores baseado em suas características fundamentais (adaptado de Franceschini <i>et al.</i> , 2007)	110
Figura 20 – Unidades de um sistema de abastecimento de água (BRASIL, 2006a)	114
Figura 21 – Relações hierárquicas entre componentes, subcomponentes e sub-subcomponentes de sistemas de distribuição de água (adaptado de Cullinane (1989) <i>apud</i> Mays (1999))	114
Figura 22 – Modelo geral de SAA proposto.....	116
Figura 23 – Fluxos globais de água e energia elétrica em SAAs	126
Figura 24 – Estrutura de medição de desempenho proposta	127
Figura 25 – Esquema geral de estação de bombeamento	128
Figura 26 – Exemplo de curva do sistema.....	133
Figura 27 – Altura total de elevação, parcela estática e parcela dinâmica	133
Figura 28 – Decomposição da curva do sistema	134
Figura 29 – Etapas de cálculo dos indicadores de eficiência hidráulica e energética	140
Figura 30 – Curva característica de uma bomba radial operando com rotação constante (n_0)	144
Figura 31 – Curva característica de uma associação de duas bombas centrífugas iguais em paralelo (//) operando com rotação constante (n_0).....	144
Figura 32 – Curvas de isorendimento características de uma bomba centrífuga	144
Figura 33 – Curva característica de uma bomba centrífuga operando com rotação variável (n_n)	145
Figura 34 – Superfície de possibilidades de operação de uma bomba centrífuga decorrente da variação da rotação	146
Figura 35 – Superfície de possibilidades de rendimento de uma bomba centrífuga decorrente da variação da rotação	147
Figura 36 – Superfície de possibilidades de operação de uma associação em paralelo de duas bombas centrífugas decorrente da variação da rotação	147
Figura 37 – Esquematização do problema de otimização	149
Figura 38 – Rendimento dos motores em função da potência elétrica.....	156
Figura 39 – Curva da bomba 1	157
Figura 40 – Curva de rendimento da bomba 1	157
Figura 41 – Curva da bomba 3	158
Figura 42 – Curva de rendimento da bomba 3	158

Figura 43 – Curva da associação em paralelo	159
Figura 44 – Rendimento do motor em função da potência de eixo.....	160
Figura 45 – Curva do sistema de alto recalque da COPASA/Itajubá.....	161
Figura 46 – Validação do modelo de curva do sistema desenvolvido.....	161
Figura 47 – Padrão horário de bombeamento de água bruta (vazões demandadas pelo sistema)	163
Figura 48 – Padrão horário discreto de bombeamento de água bruta (vazões demandadas pelo sistema).....	164
Figura 49 – Padrão horário de acionamento dos conjuntos moto-bomba, dias úteis	164
Figura 50 – Padrão horário de acionamento dos conjuntos moto-bomba, sábados.....	165
Figura 51 – Padrão horário de acionamento dos conjuntos moto-bomba, domingos	165
Figura 52 – Altura da bomba 1 com rotação variável	166
Figura 53 – Rendimento da bomba 1 com rotação variável.....	167
Figura 54 – Altura da bomba 3 com rotação variável	168
Figura 55 – Rendimento da bomba 3 com rotação variável.....	168
Figura 56 – Esquema genérico de potencial hidrelétrico aplicado a SAAs.....	171
Figura 57 – Captação da Serra dos Toledos e ETA.....	176
Figura 58 – Simulação de quedas líquidas e potência elétrica gerada.....	177
Figura 59 – Esquema genérico de disponibilização de cargas hidráulicas.....	180
Figura 60 – Padrão de demanda de água e nível do reservatório – Setor Aclimação	185
Figura 61 – Zonas de pressão do setor Aclimação durante o período de máxima demanda e menores pressões	187
Figura 62 – Perfil temporal de pressões no nó J109 (nó crítico de pressões mínimas).....	187
Figura 63 – Zonas de pressão do setor Aclimação durante o período de mínima demanda e maiores pressões	188
Figura 64 – Perfil temporal de pressões nos nós J98 e J108 (nós críticos de pressões máximas)	188
Figura 65 – Representação física global dos <i>inputs</i> e <i>outputs</i> hídricos de um SAA	195
Figura 66 – Representação física global dos inputs e outputs hídricos em um SAA, conforme dados disponíveis no SNIS	196
Figura 67 – Modelo funcional de inputs e outputs proposto para DEA	200
Figura 68 – Perfil horário de cargas elétricas na captação de Itajubá – dias úteis	209
Figura 69 – Perfil horário de cargas elétricas na captação de Itajubá – sábados.....	209
Figura 70 – Perfil horário de cargas elétricas na captação de Itajubá – domingos.....	210

Figura 71 – Perfil horário de cargas hidráulicas disponibilizadas ao setor Aclimação.....	214
Figura 72 – Perfil horário de pressões medianas no setor Aclimação.....	218
Figura 73 – Frequência de não-excedência de pressões, momento de mínimas pressões.....	219
Figura 74 – Frequência de excedência de pressões, momento de máximas pressões	219
Figura 75 – Minimização da carga hidráulica disponibilizada para a adutora de água bruta da COPASA/Itajubá, captação do Rio Sapucaí.....	221
Figura 76 – Perfil de carga hidráulica disponibilizada para a adutora de água bruta da COPASA/Itajubá, captação do Rio Sapucaí – dias úteis.....	222
Figura 77 – Perfil de carga hidráulica disponibilizada para a adutora de água bruta da COPASA/Itajubá, captação do Rio Sapucaí – sábados	223
Figura 78 – Perfil de carga hidráulica disponibilizada para a adutora de água bruta da COPASA/Itajubá, captação do Rio Sapucaí – domingos	223
Figura 79 – Ilustração do caso de falsa eficiência BCC dos sistemas de Sorocaba (SRC) e Ribeirão Preto (RP)	229
Figura 80 – Fluxos hidráulicos e energéticos em captações superficiais por bombeamento .	267
Figura 81 – Fluxos hidráulicos e energéticos em captações superficiais por gravidade	267
Figura 82 – Fluxos hidráulicos e energéticos em captações subterrâneas em lençóis freáticos	268
Figura 83 – Fluxos hidráulicos e energéticos em captações subterrâneas em poços artesianos	268
Figura 84 – Fluxos hidráulicos e energéticos em aduções de água bruta por gravidade.....	268
Figura 85 – Fluxos hidráulicos e energéticos em aduções de água bruta por bombeamento.	269
Figura 86 – Fluxos hidráulicos e energéticos em ETAs convencionais, com adução de água bruta por gravidade.....	269
Figura 87 – Fluxos hidráulicos e energéticos em ETAs convencionais, com adução de água bruta por bombeamento	269
Figura 88 – Fluxos hidráulicos e energéticos na reservação primária.....	270
Figura 89 – Fluxos hidráulicos e energéticos na adução de água tratada por gravidade.....	270
Figura 90 – Fluxos hidráulicos e energéticos na adução de água tratada por bombeamento.	270
Figura 91 – Fluxos hidráulicos e energéticos na adução da reservação secundária	271
Figura 92 – Fluxos hidráulicos e energéticos na rede de distribuição de água	271
Figura 93 – Visão geral do setor Aclimação (fonte: Google Earth)	280
Figura 94 – Localização dos setor Aclimação em relação à ETA e captação (fonte: Google Earth)	281

Figura 95 – Setor aclimação ativo na interface GeoMedia	281
Figura 96 – Exemplo de consulta a atributos de consumo	282
Figura 97 – Exemplo de consulta a atributos físicos de tubulações	282
Figura 98 – Instalação do medidor de vazão	290
Figura 99 – Localização dos <i>dataloggers</i> de pressão	291
Figura 100 – <i>Dataloggers</i> de pressão 1 e 2	291
Figura 101 – <i>Datalogger</i> e reservatório	292
Figura 102 – Resultados do monitoramento de pressões, vazões e níveis	292
Figura 103 – Padrão diário de consumo do setor Aclimação	295
Figura 104 – Coleta de dados com GPS topográfico	298
Figura 105 – Localização dos pontos utilizados para conferência de cotas topográficas da rede	299
Figura 106 – Correlação entre pressões observadas e simuladas no EPANET para o setor Aclimação	300
Figura 107 – Comparação entre pressões médias observadas e simuladas no EPANET para o setor Aclimação	300
Figura 108 – Exemplo de simulação do setor Aclimação	301
Figura 109 – Representação gráfica dos principais componentes da DEA orientada a <i>inputs</i>	312
Figura 110 – Curva original das bombas	315
Figura 111 – Características originais dos motores	316

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tecnologias para sistemas de abastecimento de água convencionais e descentralizadas	48
Tabela 2 - Pegadas d'água de variados combustíveis e fontes energéticas.....	51
Tabela 3 – Medidas de eficiência energética aplicáveis a sistemas de bombeamento	54
Tabela 4 – Decomposição do balanço hídrico e perdas de água, segundo IWA.....	60
Tabela 5 – Metodologias de análise de eficiência e produtividade utilizadas em SAAs	75
Tabela 6 – Critérios de classificação de SMDs	82
Tabela 7 – Características e condições necessárias à efetividade de SMDs	84
Tabela 8 – Características fundamentais de indicadores inseridos em SMD	85
Tabela 9 – Categorias e exemplos de indicadores utilizados em Portugal.....	94
Tabela 10 – Simulação de consumos específicos para dois sistemas fictícios.....	103
Tabela 11 - Principais componentes de SAAs	115
Tabela 12 - Principais tipos de captação em função do manancial disponível.....	118
Tabela 13 – Variáveis e fatores que influenciam o consumo de energia em SAAs.....	136
Tabela 14 – Conjunto de indicadores de eficiência hidráulica e energética proposto.....	142
Tabela 15 – Exemplo de extração de parâmetros da curva original da bomba	150
Tabela 16 – Exemplo de geração de pontos para as superfícies de possibilidades de operação e rendimento	152
Tabela 17 – Características básicas dos conjuntos moto-bomba da estação de alto recalque da COPASA/Itajubá	155
Tabela 18 – Levantamento das curvas do conjunto moto-bomba 1	156
Tabela 19 – Levantamento das curvas do conjunto moto-bomba 3	156
Tabela 20 – Dados da curva do sistema de alto recalque da COPASA/Itajubá	159
Tabela 21 – Vazões bombeadas (demandas pelo sistema) pela estação de alto recalque da COPASA/Itajubá	162
Tabela 22 – Sumário das funções utilizadas no problema de otimização	169
Tabela 23 – Demandas e consumos da ETA – COPASA/Itajubá	178
Tabela 24 – Exemplos de índices de perdas de água clássicos obtido por balanço hídrico em diferentes níveis de um SAAs	192
Tabela 25 – <i>Inputs</i> e <i>outputs</i> considerados	201
Tabela 26 – Equações necessárias ao cálculo dos inputs e outputs.....	201

Tabela 27 – Principais estatísticas dos <i>inputs</i> e <i>outputs</i> considerados	201
Tabela 28 – Matriz de correlação entre <i>inputs</i> e <i>outputs</i>	201
Tabela 29 – Resultados da otimização – ponto de operação 1	207
Tabela 30 – Resultados da otimização – ponto de operação 2	208
Tabela 31 – Indicador de carga hidráulica disponibilizada – período de déficit de pressão ..	216
Tabela 32 – Indicador de carga hidráulica disponibilizada – período de excesso de pressão	217
Tabela 33 – Resultados da DEA.....	225
Tabela 34 – Caracterização dos sistemas <i>benchmarks</i>	230
Tabela 35 – Caracterização das DMUS mais ineficientes.....	233
Tabela 36 – Metas de redução de perdas de água.....	237
Tabela 37 – Possibilidades de análise de eficiência hidráulica e energética utilizando os indicadores propostos	240
Tabela 38 – Cálculo da altura de elevação do sistema, para vazão nula	272
Tabela 39 – Cálculo da altura de elevação do sistema, para vazão $0,05 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	275
Tabela 40 – Cálculo da queda líquida da captação da Serra dos Toledos, para vazão $0,07 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	277
Tabela 41 – Características físicas das tubulações do setor Aclimação	283
Tabela 42 – Consumos do setor Aclimação, janeiro 2010	285
Tabela 43 – Consumos do setor Aclimação, fevereiro 2010.....	286
Tabela 44 – Participação média de cada trecho no consumo do setor Aclimação	288
Tabela 45 – Padrões temporais de consumo de água no setor Aclimação	293
Tabela 46 – Padrões temporais de nível do reservatório de abastecimento do setor Aclimação	296
Tabela 47 – Consumo médio em cada nó do setor Aclimação.....	297
Tabela 48 – Padrões de bombeamento, nível de reservatório e acionamento de bombas medidos – COPASA/Itajubá.....	302
Tabela 49 – Padrões de bombeamento (vazão demanda pelo sistema) calculados – COPASA/Itajubá	306
Tabela 50 – Padrão de acionamento do conjunto moto-bomba 1.....	306
Tabela 51 – Padrão de acionamento do conjunto moto-bomba 3.....	307
Tabela 52 – Superfícies de operação com rotação variável – Bomba 1	308
Tabela 53 – Superfícies de operação com rotação variável – Bomba 3	309
Tabela 54 – <i>Inputs</i> and <i>outputs</i> considerados na literatura para análise de eficiência em sistemas de abastecimento de água através de DEA	313

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APQC	<i>American Productivity and Quality Center</i>
ASCE	<i>American Society of Civil Engineers</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
AWWARF	<i>American Water Works Association Research Foundation</i>
BCC	Banker, Charnes e Cooper
BEN	Balanco Energético Nacional
BIG	Banco de Informações de Geração
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CCR	Charnes, Cooper e Rhodes
CE	Comissão Européia
CGH	Central geradora hidrelétrica
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONPET	Programa Nacional da Racionalização do Uso de Derivados do Petróleo e do Gás Natural
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
COSAMA	Companhia de Saneamento do Amazonas
CRS	<i>Constant returns to scale</i> , retornos de escala constantes
DEA	<i>Data envelopment analysis</i> , análise envoltória de dados
DMU	<i>Decision making unit</i> , unidade de tomada de decisões
ELL	<i>Economic level of leakage</i> , nível econômico de vazamento
ELETROBRAS	Centrais Elétricas Brasileiras S.A.
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
EOL	Central geradora eolielétrica
EUA	Estados Unidos da América
ETA	Estação de tratamento de água
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
IBNET	<i>The International Benchmarking Network for Water and Sanitation Utilities</i>

IWA	<i>International Water Association</i>
IPCC	Painel Intergovernamental para Mudanças Climáticas
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
KRI	<i>Key result indicator</i> , indicador chave de resultado
KPI	<i>Key performance indicator</i> , indicador chave de desempenho
MCIDADES	Ministério das Cidades
MDL	Mecanismo de desenvolvimento limpo
NEV	Nível econômico de vazamentos
NDLTD	<i>Networked Digital Library of Theses and Dissertations</i>
NPRS	<i>Australian Government National Performance Reports</i>
NWC	<i>Australian Government National Water Commission</i>
NYSERDA	New York State Energy Research & Development Authority
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PCH	Pequena central hidrelétrica
PI	<i>Performance indicator</i> , indicador de desempenho
PIB	Produto interno bruto
PLANASAB	Plano Nacional de Saneamento Básico
PME	Ponto de máxima eficiência
PNCDA	Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
SAA	Sistema de abastecimento de água
SAAE	Serviço autônomo de água e esgoto
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
SFV	Sistema fotovoltaico
SGI	Sistema de gerenciamento de informações
SI	Sistema Internacional de Unidades
SIG	Sistema de informações geográficas
SIN	Sistema Interligado Nacional
SMD	Sistema de medição de desempenho
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SOL	Central geradora solar fotovoltaica
UA	Unidade de análise
UARL	<i>Unavoidable annual real losses</i> , perdas de água anuais inevitáveis
UE	União Européia

UHE	Usina hidrelétrica
UNESCO	<i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i>
USDOE	<i>United States Department of Energy</i>
UTE	Usina termelétrica
UTN	Usina termonuclear (UTN)
UTS	Unidade de tratamento simplificado
VRP	Válvula redutora de pressão
VRS	<i>Variable returns to scale</i> , retornos variáveis de escala
WERF	<i>Water Environment Research Foundation</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A19	perdas reais no período de referência [m^3]
A3	volume total de água afluyente ao sistema [m^3]
AG005	extensão da rede de água [km]
AG006	volume de água produzido [$1.000 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$]
AG008	volume de água micromedido [$1.000 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$]
AG010	volume de água consumido [$1.000 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$]
AG024	volume de água de serviço [$1.000 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$]
C	constante associada às perdas de carga e outros constantes do equacionamento [$\text{s}^2 \cdot \text{m}^{-5}$]
C7	carga instalada na estação de bombeamento [kW]
CEE	consumo energético da ETA durante o período de análise considerado [kWh]
CEE _L	consumo energético linear [$\text{kWh} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{m}^{-1}$]
C _{EL}	consumo de energia elétrica no período de referência ou consumo de energia elétrica pelo conjunto moto-bomba [kWh]
C _{ELA}	consumo energético atual do período de análise, referente às P_{ELTOTj} [Wh]
C _{ELO}	valor alvo de consumo, referente ao consumo otimizado no período de análise obtido pela integração de $\text{Min}(P_{\text{ELTOTj}})$ neste período [Wh]
D2	consumo máximo diário de energia para bombeamento, no dia de maior consumo [kWh]
D4	consumo de energia elétrica reativa no período de referência [kWh]
D5	recuperação de energia elétrica no período de referência [kWh]
D	diâmetro interno da tubulação [m]
D _{EL}	demanda elétrica registrada na ETA durante o período de análise considerado [W]
Ef	eficiência calculada através da DEA [1]
EHE _p	energia média produzida no período de análise considerado, considerando a vazão média aduzida pelo sistema atual [kWh]
f	fator de atrito, obtido através do diagrama de Moody [1]
g	aceleração da gravidade [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]

H	altura manométrica ou altura total de elevação do sistema [m]
H_0	altura original ou nominal referente à rotação n_0 [m]
H_1	altura fornecida pela bomba 1 [m]
H_3	altura fornecida pela bomba 3 [m]
H_A	carga hidráulica atualmente disponibilizada à UA [m]
H_{DS}	altura demandada pelo sistema [m]
H_{FORj}	altura de elevação fornecida ao sistema no tempo j [m]
H_G	altura geométrica ou desnível geométrico [m]
H_{ij}	altura de elevação da bomba i , no tempo j [m]
H_{ISO}	altura da bomba i no ponto de <i>shut off</i> [m]
H_L	queda líquida [m]
H_{MAN}	altura manométrica total [m]
H_n	altura manométrica referente à rotação alterada n_n [m]
H_{OTM}	carga hidráulica ótima requerida pela UA, considerando os limites de pressão [m]
H_p	perdas de carga [m]
h_{PD}	perda de carga distribuída [m]
h_{PL}	perda de carga localizada [m]
H_{PR}	perdas de carga no recalque [m]
H_{PS}	perdas de carga na sucção [m]
I	indicador generalizado [%]
IEH	índice de eficiência hídrica [%]
$IEHCCR$	índice de eficiência hídrica global [%]
$IEHBCC$	índice de eficiência hídrica puramente técnica [%]
In	insumos [unidade monetária]
IN_{013}	índice de perdas de faturamento [%]
IN_{049}	índice de perdas na distribuição [%]
I_{CHD}	indicador de carga hidráulica disponibilizada [%]
I_{OIBC}	indicador de operação otimizada de bombeamento, parcela consumo [%]
I_{OIBD}	indicador de operação otimizada de bombeamento, parcela demanda [%]
IPA	índice de perdas de água [%]
$IPAA$	índice de perdas de água alvo [%]

IPL	índice de perdas lineares [$1.000 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$]
I_{REHC}	indicador de recuperação de energia hidráulica, parcela consumo [%]
I_{REHP}	indicador de recuperação de energia hidráulica, parcela potência [%]
I_{REHD}	indicador de recuperação de energia hidráulica, parcela demanda [%]
IVI	índice de vazamentos infraestruturais [%]
ITPR	indicador técnico de perdas reais [$\text{L} \cdot (\text{ligação} \cdot \text{dia})^{-1}$]
jm	índice referente ao momento de maior demanda durante o período de análise
k	coeficiente de perda de carga (tabelado em função do tipo de singularidade) [1]
L	comprimento da adutora relacionada ao sistema de bombeamento ou tubulação considerada [km]
m	quantidade de <i>inputs</i> [1]
$\text{Min} (P_{ELTOTjm})$	valor alvo de demanda, referente à demanda otimizada no tempo jm [W]
n	quantidade de DMUs [1]
n_0	rotação original ou nominal [rpm]
n_1	rotação da bomba 1 [rpm]
n_3	rotação da bomba 3 [rpm]
n_n	rotação alterada [rpm]
O	produtos [unidade monetária]
P	produtividade [%]
P_0	potência absorvida (de eixo) original ou nominal referente à rotação n_0 [W].
P_1	pressão manométrica no ponto 1 [Pa]
P_2	pressão manométrica no ponto 2 [Pa]
P_{EIXOij}	potência de eixo do conjunto i, no tempo j [kW]
P_{EL}	potência elétrica consumida pelo conjunto moto-bomba [W]
P_{ELij}	potência elétrica solicitada pelo conjunto moto-bomba i, no tempo j [W]
$P_{ELTOTAjm}$	potência elétrica total atual demandada no tempo jm [W]
P_{ELTOTj}	potência elétrica total solicitada pela estação de bombeamento no tempo j [W]
Ph4	utilização da capacidade de bombeamento [%]
Ph5	consumo específico de energia normalizado [$\text{kWh} \cdot \text{m}^{-3}$]

Ph6	consumo de energia reativa [%]
Ph7	recuperação de energia [%]
P _{HEL}	potência elétrica gerada [W]
P _{HELMÁX}	potência elétrica instalada máxima, considerando o limite da vazão máxima aduzida por gravidade pelo SAA ou a máxima combinação de vazão e queda líquida, dentro dos mesmos limites de vazão do SAA [W]
P _{HELP}	potência elétrica produzida, considerando a vazão média aduzida pelo sistema atual [W]
P _n	potência absorvida (de eixo) referente à rotação alterada n _n [W]
Pot _{NOMi}	potência nominal do motor i [kW]
PRAI	perdas reais anuais inevitáveis [L.(ligação.dia) ⁻¹]
Q	vazão volumétrica [m ³ .s ⁻¹]
Q ₀	vazão original ou nominal referente à rotação n _n [m ³ .s ⁻¹]
Q ₁	vazão fornecida pela bomba 1 [l.s ⁻¹]
Q ₃	vazão fornecida pela bomba 3 [l.s ⁻¹]
Q _{DS}	vazão demandada pelo sistema [m ³ .s ⁻¹]
Q _{FORj}	vazão fornecida ao sistema no tempo j [m ³ .s ⁻¹]
Q _{ij}	vazão da bomba i, no tempo j [m ³ .s ⁻¹]
Q _{iPME}	vazão da bomba i no ponto de máxima eficiência [m ³ .s ⁻¹]
Q _n	vazão referente à rotação alterada n _n [m ³ .s ⁻¹]
Q _{TUR}	vazão turbinada [m ³ .s ⁻¹]
S	situação (valor atual) do componente/parâmetro analisado [unidade hidráulica, energética, ou percentual]
s	quantidade de variáveis de saída (<i>outputs</i>) [1]
u _r	peso da variável de saída (<i>output</i>) r
V	volume bombeado no período de referência [m ³]
v	velocidade média do escoamento [m.s ⁻¹]
v _i	peso da variável de entrada (<i>input</i>) i
v ₁	velocidade média do escoamento no ponto 1 [m.s ⁻¹]
v ₂	velocidade média do escoamento no ponto 2 [m.s ⁻¹]
VA	valor-alvo do componente/parâmetro analisado [unidade hidráulica, energética, ou percentual]
VABC	volume de água bruta captada [1.000 m ³ .ano ⁻¹]

VAF	volume de água consumido no período de referência [m ³]
VAF	volume de água faturado no período de referência [m ³]
VAIT	volume de água tratada importada no período de referência [m ³]
VAP	volume de água produzido no período de referência [m ³]
VAS	volume de água de serviço no período de referência [m ³]
VE	volume de água afluente ao sistema ou ao nível do sistema considerado [m ³ .ano ⁻¹]
VPA	volume de perdas de água [1.000 m ³ .ano ⁻¹]
VPAD	volume de perdas de água na distribuição [1.000 m ³ .ano ⁻¹]
VAPA	volume de perdas de água alvo [1.000 m ³ .ano ⁻¹]
VS	volume de água efluente do sistema ou do nível do sistema considerado [m ³ .ano ⁻¹]
x_{ij}	<i>input</i> i da DMU j [unidade específica]
WRI	ineficiência na utilização dos recursos hídricos [%]
y_{rj}	<i>output</i> r da DMU j [unidade específica]
z_1	cota ou parcela potencial da carga hidráulica no ponto 1 [m]
z_2	cota ou parcela potencial da carga hidráulica no ponto 2 [m]
z_{BCC}	formato de multiplicadores do modelo DEA BCC
Δt	tempo de funcionamento do conjunto moto-bomba [horas]
λ	vetor não negativo
μ	fator de escala
ρ	massa específica da água [kg.m ⁻³]
η_{IF}	rendimento do inversor de frequência [%]
η_{Bi}	rendimento da bomba i (i=1,2,3) [%]
η_{Bij}	rendimento da bomba i, no tempo j [%]
η_{GER}	rendimento do gerador [%]
η_M	rendimento do motor [%]
η_{Mij}	rendimento do motor i, no tempo j [%]
η_{TUR}	rendimento da turbina [%]
θ	forma de envelope do modelo DEA CCR
θ_{BCC}	forma de envelope do modelo DEA BCC

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	23
1 INTRODUÇÃO.....	28
1.1 OBJETIVOS	29
1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	30
1.2 JUSTIFICATIVAS E MOTIVAÇÃO	30
1.3 HIPÓTESES E CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO	31
1.4 DELIMITAÇÃO E LIMITAÇÕES DA PESQUISA	34
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	36
2.1 O SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO.....	37
2.1.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E CONSERVAÇÃO DE ENERGIA	38
2.2 PANORAMA DOS RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL	40
2.2.1 CONJUNTURA NACIONAL DO SETOR DE SANEAMENTO BÁSICO/AMBIENTAL – ABASTECIMENTO DE ÁGUA.....	43
2.2.2 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	46
2.2.3 EFICIÊNCIA HIDRÁULICA, CONSERVAÇÃO E USO RACIONAL DE ÁGUA	49
2.3 INTER-RELAÇÕES ENTRE ENERGIA ELÉTRICA E ÁGUA.....	50
2.4 EFICIÊNCIA E CONSERVAÇÃO HIDRÁULICA E ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	53
2.4.1 PRINCIPAIS FONTES DE DESPERDÍCIO DE ÁGUA E ENERGIA EM SISTEMAS DE ABATECIMENTO.....	56
2.4.1.1 A questão das perdas de água.....	56
2.4.1.2 Uso de equipamentos pouco eficientes, em más condições de manutenção ou mal dimensionados	61
2.4.1.3 Projeto inadequado de adutoras e redes de distribuição	62
2.4.1.4 Operação ineficiente do sistema.....	63
2.4.2 METODOLOGIAS, TECNOLOGIAS E EQUIPAMENTOS PARA OTIMIZAÇÃO HIDRÁULICA E ENERGÉTICA DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	64
2.4.2.1 Utilização de fontes renováveis de energia para bombeamento.....	64
2.4.2.2 Recuperação de energia através de turbinas hidráulicas	67

2.4.2.3 Gerenciamento de perdas de água e pressões	68
2.4.2.4 Otimização operativa de SAAs	69
2.4.2.5 Uso de equipamentos eficientes	70
2.4.2.6 Uso de bombas com rotação variável	71
2.4.2.7 Otimização da capacidade de armazenamento e operação de reservatórios	71
2.5 DISTINÇÃO E COMPLEMENTARIEDADE ENTRE OS CONCEITOS DE PRODUTIVIDADE, EFICIÊNCIA E DESEMPENHO	72
2.6 INDICADORES DE EFICIÊNCIA, DESEMPENHO OU PERFORMANCE.....	75
2.6.1 SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE DESEMPENHO (SMDS).....	80
2.6.2 INDICADORES APLICADOS A SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	88
2.6.1.1 O caso dos indicadores de performance para perdas reais de água	89
2.6.1.2 Os indicadores DRIVA-PI da Escandinávia.....	90
2.6.1.3 Associação entre indicadores de performance e <i>benchmarking</i>	90
2.6.1.4 Indicadores de desempenho contratuais no setor de abastecimento de água e esgoto na República Checa.....	93
2.6.1.5 O caso de Portugal.....	94
2.6.1.6 Indicadores de performance de Quebec, Canadá.....	95
2.6.1.7 Indicadores da IWA.....	95
2.6.1.8 Indicadores da IBNET	96
2.6.1.9 Indicadores do SNIS	96
2.6.1.10 National Water Initiative, Austrália.....	97
2.6.1.11 Estudo empírico no setor de água e esgoto brasileiro	97
2.6.1.12 Indicadores de desempenho aplicados à avaliação de tecnologias e estratégias para infraestruturas distribuídas de água	98
2.6.3 INDICADORES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	99
2.6.4 INDICADORES EXISTENTES NA LITERATURA RELACIONADOS AO USO DE ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA EM SAAS	101
2.6.4.1 IWA Ph4 – Utilização da capacidade de bombeamento.....	101
2.6.4.2 IWA Ph5 – Consumo de energia normalizado	102
2.6.4.3 IWA Ph6 – Consumo de energia reativa	105
2.6.4.4 IWA Ph7 – Recuperação de energia.....	106
2.6.4.5 IWA WR1 – Ineficiência na utilização dos recursos hídricos.....	106
2.6.4.6 SNIS IN ₀₁₃ – Índice de perdas de faturamento	106

2.6.4.7 SNIS IN ₀₄₉ – Índice de perdas na distribuição	107
2.6.4.8 SNIS IN ₀₅₈ – Índice de consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água.....	107
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	108
3.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES E EMBASAMENTO TEÓRICO.....	109
3.2 PROPOSTA DE UM MODELO GENERALIZADO DE SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E UNIDADES DE ANÁLISE	113
3.2.1 MANANCIAL	117
3.2.2 CAPTAÇÃO	117
3.2.3 ADUÇÃO DE ÁGUA BRUTA	118
3.2.4 TRATAMENTO	119
3.2.5 RESERVAÇÃO PRIMÁRIA.....	121
3.2.6 ADUÇÃO DE ÁGUA TRATADA.....	121
3.2.7 RESERVAÇÃO SECUNDÁRIA	122
3.2.8 REDE DE DISTRIBUIÇÃO.....	122
3.2.9 RESERVAÇÃO TERCIÁRIA.....	124
3.2.10 ELEVATÓRIAS E <i>BOOSTERS</i>	124
3.2.11 LIGAÇÕES PREDIAIS	125
3.2.12 FLUXOS GLOBAIS, BALANÇOS HIDRÁULICOS E ENERGÉTICOS	125
3.2.13 DECLARAÇÃO DE METAS DE EFICIÊNCIA HIDRÁULICA E ENERGÉTICA PARA O MODELO PROPOSTO.....	126
3.3 PROPOSTA DE UMA ESTRUTURA DE MEDIÇÃO DE DESEMPENHO HIDRÁULICO E ENERGÉTICO PARA SAAS	127
3.4 MODELAGEM MATEMÁTICA DAS RELAÇÕES HIDROENERGÉTICAS.....	128
3.5 IDENTIFICAÇÃO DOS PRINCIPAIS FATORES INFLUENTES SOBRE O USO DE ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA EM SAAs	135
3.6 PROPOSTA DE UM CONJUNTO DE INDICADORES DE EFICIÊNCIA HIDRÁULICA E ENERGÉTICA PARA SAAS	139
3.7 DETALHAMENTO DOS INDICADORES PROPOSTOS.....	143
3.7.1 INDICADOR DE OPERAÇÃO OTIMIZADA DE BOMBEAMENTO	143
3.7.1.1 Definição do valor-alvo do indicador de operação otimizada de bombeamento	148
3.7.1.2 Interpretação do indicador de operação otimizada de bombeamento.....	153
3.7.1.3 Aplicação do indicador de operação otimizada de bombeamento – estudo de	

caso	154
3.7.2 INDICADOR DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA HIDRÁULICA	171
3.7.2.1 Definição do valor-alvo do indicador de recuperação de energia hidráulica ..	172
3.7.2.2 Interpretação do indicador de recuperação de energia hidráulica	174
3.7.2.3 Aplicação do indicador de recuperação de energia hidráulica – estudo de caso	175
3.7.3 INDICADOR DE CARGA HIDRÁULICA DISPONIBILIZADA (I_{CHD})	178
3.7.3.1 Definição do valor-alvo do indicador de carga hidráulica disponibilizada	180
3.7.3.2 Interpretação do indicador de carga hidráulica disponibilizada	182
3.7.3.3 Aplicação do indicador de carga hidráulica disponibilizada – estudo de caso 1	182
3.7.3.4 Aplicação do indicador de carga hidráulica disponibilizada – estudo de caso 2	189
3.7.4 INDICADOR DE EFICIÊNCIA HÍDRICA ASSOCIADO ÀS PERDAS DE ÁGUA (IEH)	191
3.7.4.1 Disponibilidade de dados e indicadores e seleção das DMUS	194
3.7.4.2 Caracterização da tecnologia de produção	195
3.7.4.3 Fatores que influenciam as perdas de água em SAAS	197
3.7.4.4 Definição dos <i>inputs</i> e <i>outputs</i>	198
3.7.4.5 Seleção do modelo de DEA	202
3.7.4.6 Definição de <i>benchmarks</i> e metas de redução de perdas de água	205
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	207
4.1 INDICADOR DE OPERAÇÃO OTIMIZADA DE BOMBEAMENTO	207
4.2 INDICADOR DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA HIDRÁULICA	211
4.3 INDICADOR DE CARGA HIDRÁULICA DISPONIBILIZADA	213
4.3.1 CASO 1: REDE DE DISTRIBUIÇÃO DO SETOR ACLIMAÇÃO	214
4.3.2 CASO 2: ADUTORA DE RECALQUE DA CAPTAÇÃO DA COPASA/ITAJUBÁ	220
4.4 INDICADOR DE EFICIÊNCIA HÍDRICA	223
4.4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS MAIS EFICIENTES (<i>BENCHMARKS</i>)	229
4.4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS MENOS EFICIENTES	232
4.4.3 DEFINIÇÃO DE METAS DE REDUÇÃO DE ÍNDICES DE PERDAS DE ÁGUA	237

4.5 INTEGRAÇÃO E COMPLEMENTARIEDADE ENTRE OS INDICADORES PROPOSTOS.....	239
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	241
5.1 PERSPECTIVAS, TENDÊNCIAS E OPORTUNIDADES DE PESQUISA PARA FUTUROS TRABALHOS	246
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	249
APÊNDICE A – FLUXOGRAMAS ENERGÉTICOS E HIDRÁULICOS DAS UNIDADES DE ANÁLISE DE SAAS	267
APÊNDICE B – CÁLCULO DA CURVA DO SISTEMA DE ALTO RECALQUE DA COPASA/ITAJUBÁ.....	272
APÊNDICE C – CÁLCULO DA QUEDA LÍQUIDA DA CAPTAÇÃO DE ÁGUA BRUTA DA SERRA DOS TOLEDOS DA COPASA/ITAJUBÁ	277
APÊNDICE D – MODELAGEM HIDRÁULICA DE REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA PARA OBTENÇÃO DO INDICADOR de carga hidráulica disponibilizada	280
APÊNDICE E – PADRÃO DE PRODUÇÃO, BOMBEAMENTO E VARIAÇÃO DE NÍVEL DE RESERVATÓRIO – COPASA ITAJUBÁ	302
APÊNDICE F – SUPERFÍCIES DE INTERPOLAÇÃO DE CURVAS DE ROTAÇÃO VARIÁVEL.....	308
APÊNDICE G - ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS E O SEU USO NA MEDIÇÃO DE EFICIÊNCIA DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA (SAAS)	311
ANEXO A – CURVAS DOS CONJUNTOS MOTO-BOMBA DA ESTAÇÃO ELEVATÓRIO DE ÁGUA BRUTA (CAPTAÇÃO) – COPASA ITAJUBÁ.....	315

1 INTRODUÇÃO

Água e energia elétrica são dois dos mais importantes recursos utilizados em diversos setores produtivos, bem como no cotidiano das populações. O alarde mundial acerca das mudanças climáticas trouxe à tona elos até então pouco abordados entre esses dois recursos. Se, por um lado, o mau uso dos recursos energéticos é tido como a principal causa do aquecimento global, por outro, aproxima-se de um consenso científico o fato de que as principais consequências das mudanças climáticas sobre os seres humanos terão como vetor a água – por exemplo, pelo aumento da frequência e magnitude de secas, inundações e proliferação de doenças de veiculação hídrica (UNESCO, 2009).

Segundo a UNESCO (2009), água e energia estão sujeitas a pressões de mesma natureza: demográficas, econômicas, sociais e tecnológicas. Nesse contexto, promover a eficiência hidráulica e energética de sistemas de abastecimento de água (SAAs) torna-se um objetivo estratégico para o alcance da sustentabilidade de cidades e nações, uma vez que, na sua maioria, tais sistemas demandam grandes montantes de energia elétrica para bombeamento, ao mesmo tempo em que perdem significativa parcela da água captada durante o processo de disponibilização.

Considerando-se a amostra de municípios participantes do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) (BRASIL, 2011b), em 2009, 612 prestadores de serviços de água e esgoto nacionais eram de administração pública direta, 364 autarquias, 34 sociedades de economia mista, 3 empresas públicas, 48 empresas privadas e 3 organizações sociais. Esse cenário é semelhante ao da Austrália, e difere, por exemplo, do Reino Unido (majoritariamente privado) e dos Estados Unidos (equilíbrio entre sistemas públicos e privados) (BYRNES *et al.*, 2010). Ehrhardt e Janson (2010) indicam que a regulamentação convencional utilizada em serviços de água não possui motivações comerciais, impedindo a maximização dos lucros. Para os autores, tal regulamentação deveria ser adaptada de forma a permitir que os cidadãos avaliassem o desempenho dos serviços, obrigando os governos a considerar a questão da eficiência na gestão dos sistemas. A falta de competição no setor, no qual se verificam monopólios na produção e fornecimento, é indicada por Abbott e Cohen (2009) e Tupper e Resende (2004) como um dos principais motivos da baixa eficiência dos sistemas de abastecimento de água. Vários estudos (SAAL; PARKER, 2001; TUPPER; RESENDE, 2004; NAUGES; VAN DEN BERG, 2008; ABBOTT; COHEN, 2009; WALTER *et al.*, 2009; BYRNES *et al.*, 2010;) indicam que a regulação é o principal fator a exercer

influência sobre a eficiência de SAAs, superando, inclusive, a questão da propriedade¹ (pública ou privada).

Para Perard (2010², *apud* ARARAL, 2010), os serviços de abastecimento de água sofrem com excessivas interferências políticas e centralização, dificultando o alcance de objetivos técnicos voltados ao aumento de seu desempenho. O exemplo mais relevante da ineficiência dos serviços de abastecimento no Brasil é o índice médio de perdas de água, que no ano de 2009 se aproximou dos 40% (BRASIL, 2011b). Assumindo-se que o consumo energético é diretamente proporcional ao volume de água bombeado, o desperdício de energia elétrica nos sistemas é, no mínimo, da mesma magnitude. Rogers (2005³ *apud* ROGERS; LOUIS, 2009) afirma que as abordagens utilizadas no setor público de abastecimento de água para determinação e avaliação de desempenho são inadequadas, uma vez que estas não fornecem uma visão consistente, baseada na eficiência e referentes a padrões de qualidade uniformes.

Contribui com esse cenário de ineficiências o ainda incipiente processo de cobrança pelo uso dos recursos hídricos, importante mecanismo de gestão instituído pela Lei nº 9.433 (BRASIL, 1997). Quando efetivo, este mecanismo pode atuar como inibidor de perdas, uma vez que os volumes brutos captados nos diferentes tipos de mananciais passam a ser contabilizados como despesas pelas empresas de abastecimento de água.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo desta pesquisa é desenvolver e avaliar um conjunto de indicadores de eficiência hidráulica e energética para SAAs, que permita comparar a situação atual de um sistema com a sua condição tecnicamente ótima, referente aos fatores e componentes, físicos e operacionais, mais relevantes no contexto hidráulico e energético. Esta condição ótima,

¹ Segundo Barret e Wallace (2011), a privatização e aumento da participação da iniciativa privada nos SAAs são tendências mundiais, voltadas à melhoria dos baixos níveis de desempenho e eficiência desses sistemas. Essa tendência se baseia na teoria econômica, que sugere que empresas privadas são mais eficientes que aquelas de propriedade pública (RENZETTI; DUPONT, 2010), apesar de a literatura empírica não apresentar evidências que suportem essa hipótese no contexto dos sistemas de abastecimento de água (ANWANDTER; OZUNA, 2002; RENZETTI; DUPONT, 2010).

² PERARD, E. Private sector participation and regulatory reform in water supply in the Southern Mediterranean region. **Water Policy**, Londres, v. 12, p. 41-65, 2010 *apud* ARARAL, E. Improving effectiveness and efficiency in the water sector: institutions, infrastructure and indicators. **Water Policy**, Londres, v. 12, p. 1-7, 2010.

³ ROGERS, J. W. **Standardized performance assessment and evaluation model for community water systems**. 2005. 431 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas) – Escola de Engenharia e Ciências Aplicadas, Universidade da Virgínia, Charlottesville, 2005 *apud* ROGERS, J. W.; LOUIS, G. E. Conceptualization of a robust performance assessment and evaluation model for consolidating community water systems. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 90, p. 786-797, 2009.

representada por um valor-alvo, corresponde ao valor da variável analisada que propicia o menor consumo de água e/ou energia elétrica na unidade considerada, atendendo, simultaneamente, aos limites e requisitos operacionais do sistema (demandas de água e pressões de serviço, variáveis em termos espaciais e temporais).

Prioriza-se na pesquisa um sistema de medição de eficiência absoluta, ou seja, a máxima eficiência de um sistema, individualmente. A abordagem de eficiência relativa (comparação da eficiência de vários sistemas) é utilizada somente em situações nas quais a análise de eficiência absoluta é inviável ou inadequada.

1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

São objetivos específicos da pesquisa:

- Identificar, através de uma extensiva revisão da literatura, o estado da arte sobre medição de eficiência hidráulica e energética em sistemas de abastecimento de água;
- Desenvolver uma análise crítica – sob o ponto de vista da eficiência hidráulica e energética – sobre os métodos, indicadores e práticas de medição de eficiência e desempenho tradicionalmente utilizadas em SAAs;
- Identificar os principais fluxos hidráulicos – de massa (vazão) e carga hidráulica – e de energia elétrica existentes em SAAs;
- Modelar matematicamente as relações entre estes fluxos hidráulicos e energéticos;
- Identificar, com base neste modelo matemático, os principais fatores que influenciam o consumo de água e energia elétrica em SAAs;
- Propor, a partir dos principais fatores identificados, indicadores de eficiência e métodos de análise que permitam comparar o atual nível de consumo de água e energia elétrica de um SAA com o nível ótimo tecnicamente atingível;
- Avaliar o conjunto de indicadores e métodos propostos através de estudos de caso em SAAs reais.

1.2 JUSTIFICATIVAS E MOTIVAÇÃO

Durante a revisão da literatura desenvolvida para a elaboração do projeto de pesquisa, verificou-se uma lacuna referente à formalização de métodos e ferramentas para medição de

eficiência hidráulica e energética específicas para SAAs. Trabalhos sobre medição de eficiência e desempenho de SAAs focam-se, em geral, em conjuntos de indicadores operacionais, infraestruturais e financeiros, direcionados à medição da produtividade, desempenho global e econômico, nos quais a energia elétrica é abordada de forma superficial.

Em termos hidráulicos, a eficiência é muitas vezes associada à produtividade, o que, num cenário comparativo, pode induzir os gestores a uma visão errônea sobre o desempenho do sistema. Isso se deve ao fato de que, na maioria das vezes, a medição de eficiência e desempenho em SAAs se pauta em medidas de eficiência relativa (comparação entre produtividades ou eficiências de diferentes sistemas). Dessa forma, não é considerado o aporte ótimo de insumos (no caso, água e energia elétrica) que conduziria o SAA ao seu nível máximo de eficiência em termos individuais (eficiência absoluta). Desconsideram-se, também, as características individuais dos SAAs, necessárias para a compatibilização dos processos de produção e uso de recursos de diferentes sistemas. Ao se desconsiderar tais características individuais, técnicas de medição de eficiência relativa podem conduzir a resultados errôneos – como, por exemplo, durante a comparação da intensidade energética de dois SAAs localizados em regiões com topografias distintas, nos quais diferentes alturas de elevação de bombeamento são, naturalmente, exigidas.

A medição de eficiência e desempenho é uma área do conhecimento em desenvolvimento e com aplicação em diversos setores, sobretudo nas ciências da engenharia de produção, administração e economia. Os métodos e ferramentas associadas à área são comumente voltados à aplicação nas esferas gerenciais, empresariais e industriais. Por outro lado, publicações, ferramentas e métodos formais para medição de eficiência hidráulica e energética, com base em processos e estruturas consolidadas, passíveis de replicação e utilização prática, são ainda escassas, o que corrobora a relevância desta pesquisa.

1.3 HIPÓTESES E CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO

A hipótese avaliada na tese é a de que *é possível desenvolver um sistema de indicadores que permita determinar o nível de eficiência hidráulica e energética de sistemas de abastecimento de água, além de estabelecer metas de eficiência que conduzam os sistemas a uma condição próxima à ideal (ótima) do ponto de vista hidráulico e energético.*

As contribuições da pesquisa residem em alguns aspectos fundamentais:

- os indicadores de eficiência/desempenho utilizados em sistemas de abastecimento de água (SAA) e presentes na literatura contemplam de forma superficial o uso da energia elétrica, geralmente através do cálculo de consumos específicos (intensidades energéticas) globais. Nessa abordagem tradicional, a unidade de análise hidráulica/energética é o próprio sistema, e seus indicadores constituem, na verdade, índices resultantes de inúmeros processos intermediários. Ao mesmo tempo em que esses índices possuem grande quantidade de informações agregadas, adequados para comunicação de resultados e acompanhamento geral do sistema, fornecem poucos subsídios para o gerenciamento, uma vez que as variáveis associadas ao uso da energia elétrica e da água não são discretizadas. Os indicadores/sistemas de medição de eficiência propostos pretendem quantificar as repercussões energéticas dos mais relevantes componentes hidráulicos do sistema, levando em conta suas especificidades, o que permite aos gestores mapear e atuar sobre os processos e componentes responsáveis pelas ineficiências;
- ao contrário dos métodos de avaliação de eficiência e desempenho empregados nacional e internacionalmente no setor de abastecimento de água, em sua maioria utilizando dados em painel⁴ e análises comparativas relacionadas ao *benchmarking*⁵, a metodologia proposta prioriza medição de eficiência individual de cada sistema de abastecimento de água, através do seu desmembramento em unidades estruturais de análise. Análise de eficiência relativa foi utilizada na pesquisa no caso específico das perdas de água. Nesse caso, a condição ótima (índice de perdas de água igual a 0%) não pode ser obtida analiticamente, uma vez que o valor-alvo teórico é inviável e pouco provável em termos práticos;
- nos indicadores clássicos, a terminologia “desempenho” é comumente associada à produtividade do sistema; num cenário comparativo (análise de eficiência relativa), um SAA que consome menos energia elétrica para produzir e fornecer o mesmo volume de água tratada que outros é considerado o mais eficiente em termos energéticos. Essa visão difere daquela pautada na eficiência absoluta, ou seja, o desempenho individual do sistema, uma vez que, apesar dos processos de captação,

⁴ Um conjunto de dados em painel (ou longitudinal, ou temporal transversal) é um conjunto de dados que acompanha um número de indivíduos ao longo do tempo, e, portanto, fornece múltiplas observações de cada indivíduo na amostra (SMELSER; BALTES, 2001).

⁵ *Benchmarking* é uma medida de desempenho obtida através da comparação entre produtos e serviços de modo a estabelecer as condições nas quais os mesmos são produzidos com desempenho superior.

tratamento e distribuição serem em geral muito semelhantes no contexto nacional, cada SAA está sujeito a condições e agentes (topográficos, hidráulicos, hidrológicos, antrópicos) distintos, que influenciam de forma direta os padrões de consumo de água e energia elétrica. Um SAA tido como *benchmark* numa análise relativa de eficiência hidráulica e energética pode, na verdade, ser um sistema ineficiente quando avaliado individualmente, em termos absolutos. Em outras palavras, os indicadores clássicos são calculados sem considerar as condições ótimas ou as metas de eficiência (valores-alvo), sendo considerados, aqui, indicadores de situação; o sistema proposto pretende desenvolver indicadores de eficiência e desempenho propriamente ditos, cujo cálculo se faz mediante a determinação dos valores-alvo de cada item analisado, e sua posterior comparação com as condições atuais. Conforme mencionado anteriormente, a abordagem relativa/comparativa é utilizada na tese para a análise específica da questão das perdas de água, na qual o valor-alvo teórico é inviável em termos práticos (no exemplo citado, o valor-alvo teórico de perdas de água é igual a 0%, situação não documentada na literatura, mesmo em SAAs considerados *benchmarks*).

O sistema de indicadores proposto é dinâmico e não exaustivo, podendo ser expandido e aperfeiçoado com base em novas pesquisas. Além disso, poderá também ser adaptado para o uso em outros tipos de atividade – por exemplo, irrigação e indústria – nas quais haja predominância no uso de sistemas hidráulicos baseados em redes de distribuição e conjuntos moto-bomba.

Outra característica da proposta é a possibilidade de um SAA ser analisado através de sua segmentação em unidades de análise específicas, conferindo maior flexibilidade à aplicação da técnica, sobretudo em sistemas com carência ou inexistência de dados – realidade típica no Brasil.

Pretende-se que os resultados do estudo forneçam bases técnicas para o desenvolvimento e implantação de sistemas de medição de desempenho hidráulico e energético em empresas do setor de abastecimento de água, conferindo um caráter aplicado à pesquisa. Dentre as aplicações práticas dos indicadores e metodologias propostas, destacam-se:

- otimização da operação de sistemas de abastecimento de água existente;
- apoio ao planejamento e projeto de novos sistemas de abastecimento, ou expansão de sistemas existentes, sob o viés da eficiência hidráulica e energética;

- suporte à tomada de decisões no que se refere à substituição de equipamentos por outros mais eficientes (por exemplo, conjuntos moto-bomba) e à manutenção de equipamentos antigos ou danificados (tubulações com incrustações, válvulas e outros componentes hidromecânicos com vazamentos, dentre outros);
- aperfeiçoamento e expansão dos sistemas de indicadores já existentes e aplicados ao setor.

1.4 DELIMITAÇÃO E LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Esta pesquisa considera sistemas de abastecimento de água convencionais, nos quais o consumo majoritário de energia elétrica é atribuído, normalmente, ao bombeamento de água nas fases de captação, tratamento e distribuição. Sistemas de abastecimento alternativos, que utilizam, por exemplo, processos de reciclagem de água ou dessalinização, estão fora do escopo da pesquisa.

O trabalho se limita à análise de eficiência técnica de SAAs, e não considera componentes econômicos e financeiros, apesar destes se vincularem à viabilidade e ao retorno do investimento em medidas de eficiência hidráulica e energética, que podem ser prospectadas a partir do sistema de medição e dos indicadores de performance propostos. Esta opção advém da visão do autor de que a consideração de fatores econômicos na definição de valores-alvo pode inibir a determinação do “ótimo técnico” (condição de menor consumo de água e/ou energia elétrica), uma vez que o “ótimo econômico” pode não convergir para este primeiro.

A agregação de módulos de análise econômica ao modelo, de forma a se definirem prioridades de investimento para otimização hidráulica e energética dos SAAs, constitui uma oportunidade para continuidade e desenvolvimento de novas pesquisas associadas à tese, podendo considerar os recursos disponíveis, tarifas praticadas de água e energia elétrica e os diferentes retornos financeiros dos investimentos. Nesse caso, pode-se inclusive considerar a receita adicional proporcionada pela comercialização de créditos de carbono resultantes do aumento da eficiência energética dos sistemas.

Em termos energéticos, o sistema de indicadores proposto considera os usos diretos de energia elétrica em SAAs. Não é considerado o uso indireto de energia elétrica, como por exemplo, o consumo associado à produção de produtos químicos utilizados no tratamento de água e materiais (por exemplo, tubulações). Estes usos indiretos da energia elétrica em SAAs

são abordados na literatura através de análises de ciclo de vida, estando fora do escopo da pesquisa. Desconsideram-se também fluxos energéticos de outras naturezas além da elétrica e hidráulica, como por exemplo, as cargas térmicas contidas nas massas de água fluentes no processo de abastecimento.

Para aplicação e validação do sistema de medição de desempenho proposto, foram desenvolvidos estudos de caso em dois sistemas de abastecimento de água reais, com base em dados coletados pelo autor e fornecidos pelos gestores dos sistemas, sendo estes:

- a unidade de Itajubá da Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA);
- o Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) de Passos/MG.

Para aplicação e validação da análise de eficiência relativa, conduzida no âmbito das perdas de água em SAAs, foi realizado um estudo em sistemas de abastecimento de água do Estado de São Paulo, utilizando dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os assuntos de maior relevância para o trabalho, fornecendo subsídios teóricos para o seu desenvolvimento e permitindo identificar o estado da arte.

Apesar de o foco da pesquisa remeter às engenharias mecânica, hídrica e energética, verificou-se que grande parte da literatura e do ferramental teórico disponível sobre medição e indicadores de eficiência e desempenho é oriunda das áreas de engenharia de produção, administração e economia, voltadas, em geral, ao estudo de organizações. Esta afirmação é confirmada, dentre outros, pelo trabalho de Tezza *et al.* (2010). Neste, 67,1% das 140 publicações consideradas relevantes pelos autores acerca de medição de desempenho, entre 1980 e 2007, apresentavam abordagens estritamente corporativas. A identificação destes métodos e a adequação de ferramentas úteis para o contexto da pesquisa – avaliação de eficiência hidráulica e energética de sistemas de abastecimento de água – é uma das contribuições esperadas do trabalho.

Metodologicamente, a revisão da literatura iniciou-se com a definição de termos de busca, por exemplo: distribuição de água, abastecimento de água, indicadores de desempenho, eficiência energética, conservação de energia, conservação de água, eficiência hidráulica, *benchmarking*, vazamentos, perdas de água, bombeamento. Definiram-se, então, as bases de dados para obtenção de referências, priorizando-se periódicos de alta qualificação no sistema Qualis/CAPES, revisados por pares, sendo esta uma medida para garantia de qualidade da informação. De forma secundária, foram avaliadas teses de doutorado nacionais e estrangeiras, consideradas no estudo somente quando julgadas relevantes.

As principais bases de dados consultadas foram: ISI Web of Knowledge, Sciencedirect, *American Society of Civil Engineers* (ASCE), *American Society of Mechanical Engineers* (ASME), *Networked Digital Library of Theses and Dissertations* (NDLTD), Scielo, World Scientific, Scopus, Scirus, Wiley InterScience, *International Water Association* (IWA) Publishing, Emerald, SpringerLink. Definidos os termos de busca e as bases de dados, efetuou-se a pesquisa bibliográfica utilizando termos de busca individuais e combinados. A classificação das buscas se fez inicialmente pelo critério de relevância dos trabalhos, seguido por data de publicação para determinação do estado da arte e tendências na área de pesquisa. As publicações selecionadas e utilizadas na revisão retroalimentaram a pesquisa bibliográfica na medida em que permitiram identificar trabalhos de referência no contexto da tese.

2.1 O SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

Em 2010, a capacidade instalada elétrica do Brasil superou os 111 GW (potência fiscalizada), sendo essa potência majoritariamente proveniente de centrais hidrelétricas (BRASIL, 2010b), cuja participação se aproxima de 80% (considerando grandes, pequenas, micro e minicentraís). No restante do mundo, a energia hidráulica é responsável por apenas 19% da oferta de eletricidade (BRASIL, 2007c).

A Figura 1 apresenta a composição da matriz elétrica nacional, na qual são consideradas as seguintes categorias: usina hidrelétrica (UHE), usina termelétrica (UTE), pequena central hidrelétrica (PCH), central geradora eolielétrica (EOL), central geradora solar fotovoltaica (SOL), central geradora hidrelétrica (CGH), usina termonuclear (UTN).

Composição da matriz elétrica brasileira, em 25/11/2010 [kW; %]

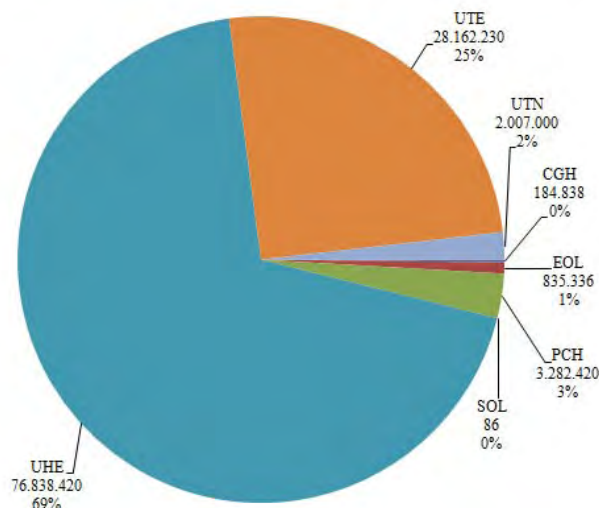


Figura 1 – Matriz elétrica brasileira, em 25/11/2010 (BRASIL, 2010b)

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (BRASIL, 2008a), a maior parcela da capacidade hidrelétrica instalada no Brasil encontra-se nas regiões Sudeste e Sul, enquanto os maiores potenciais ainda não explorados se localizam na região Norte, sujeitos a grandes restrições ambientais e distantes dos maiores centros consumidores nacionais.

Além da predominância hidrelétrica, percebe-se na Figura 1 que as centrais térmicas, incluindo as termonucleares, respondem por 27% da capacidade instalada no país, sendo utilizadas como fonte complementar à hidrelétrica durante picos de demanda no Sistema Interligado Nacional (SIN), ou em períodos hidrológicamente desfavoráveis, evitando o deplecionamento excessivo dos reservatórios hidrelétricos. Embora as fontes alternativas de

base eólica e solar ainda tenham participação pouco significativa, a capacidade hidráulica do Brasil confere à sua matriz elétrica o *status* de uma das mais renováveis do mundo.

Em 2008, 95% da população brasileira possuía acesso à rede elétrica, em 99% dos municípios, num total de 61,5 milhões de unidades consumidoras (BRASIL, 2008a). A Figura 2 ilustra os principais setores consumidores de eletricidade no Brasil, no ano de 2009, tendo sido adaptada do Balanço Energético Nacional (BEN) de 2010 (BRASIL, 2010c).

Composição do consumo de energia elétrica no Brasil em 2009, por setor [%]

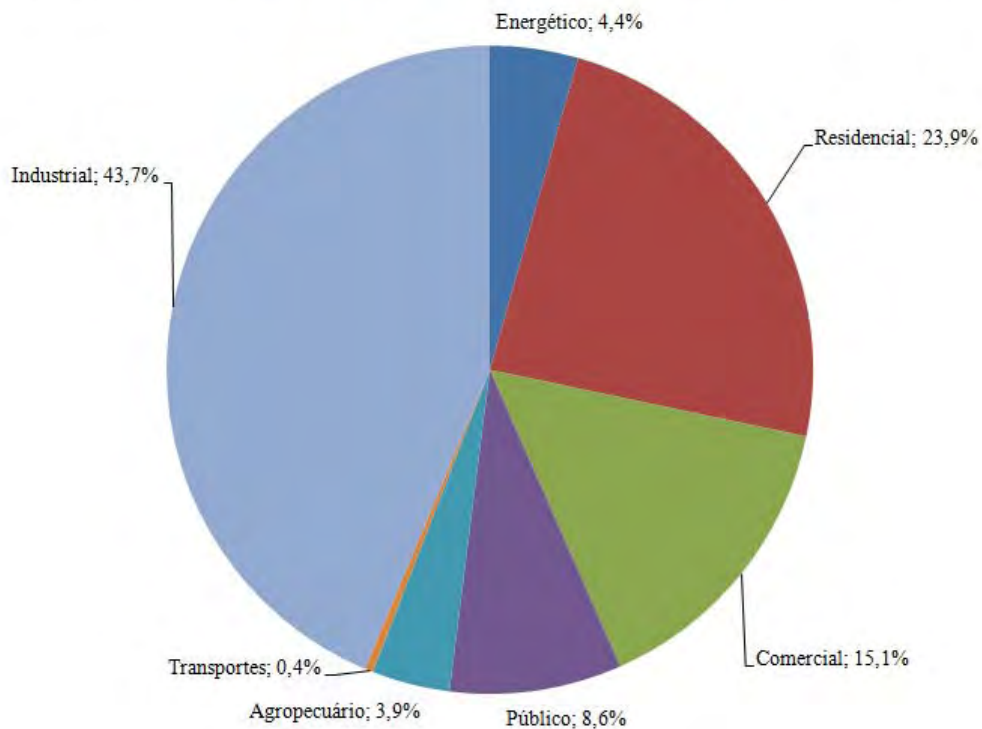


Figura 2 – Composição do consumo de energia elétrica no Brasil em 2009, por setor (BRASIL, 2010c)

Percebe-se na Figura 2 que os setores industrial, residencial e comercial são os principais consumidores de energia elétrica no país. O setor público, no qual se insere de forma geral o objeto de estudo da tese (sistemas de abastecimento de água), foi responsável por 8,6% do consumo de energia elétrica no Brasil em 2009.

2.1.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

Patterson (1996) apresenta uma definição generalizada para o termo eficiência energética, como segue:

A eficiência energética é um termo genérico, e não há uma única medida quantitativa inequívoca de "eficiência energética". Em vez disso, deve-se contar com uma série de indicadores que permitam quantificar alterações na eficiência energética. Em geral, a eficiência energética se refere à utilização de menos energia para produzir a mesma quantidade de serviços ou saídas (produtos) úteis. Por exemplo, no setor industrial, a eficiência energética pode ser medida pela quantidade de energia necessária para produzir uma tonelada de produto⁶.

No Plano Nacional de Energia 2030 (BRASIL, 2007c), eficiência energética é entendida como o conjunto de medidas “[...] de redução de energia consumida, sem perda na qualidade, e substituição de fontes de energia, com ganhos sistêmicos de eficiência.”. Enquanto a eficiência energética corresponde à redução da energia necessária para a obtenção de um mesmo efeito útil, a conservação de energia diz respeito à redução do consumo associado a um estilo de vida e usos finais moderados, incluindo regulação (por exemplo, redução dos níveis de refrigeração e aquecimento de ambientes) ou mudanças espontâneas nas preferências dos consumidores, resultando em mudanças de comportamento (OIKONOMOU *et al.*, 2009).

Herring (2006) afirma que os conceitos de eficiência energética e conservação de energia são, geralmente, utilizados como sinônimos (principalmente em discussões políticas), tendo, porém, significados diferentes. Confirmando as definições de Patterson (1996) e Oikonomou *et al.* (2009), Herring (2006) indica que a conservação de energia é a redução do consumo através da redução da qualidade do serviço de energia, remetendo a situações e ações de racionamento – como por exemplo, a imposição de limites de temperatura para sistemas de ar condicionados através de termostatos –, sendo fortemente influenciada pela regulação, hábitos de consumo e estilos de vida. O mesmo autor reafirma que eficiência energética corresponde à relação entre entradas energéticas e a produção de efeitos ou produtos úteis.

Uma abordagem mais geral sobre conservação de energia é feita por Linares e Labandeira (2010), que a definem como sendo “[...] uma redução absoluta na demanda de energia, comparada com uma linha de base, medida em unidades de energia [...]”.

A eficiência energética, associada ao uso de fontes renováveis, vem sendo tratada como uma das principais formas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas, como demonstram os trabalhos de Meyers e Kromer (2008), Hopper *et al.* (2009), Ürge-Vorsatz e

⁶ Nesse caso, o conceito de eficiência energética assume a mesma dimensão de consumo específico de energia ou intensidade energética.

Metz (2009) e Palm e Thollander (2010).

O seguinte parágrafo, extraído do Plano Nacional de Energia 2030 (BRASIL, 2007c), resume o panorama brasileira de eficiência energética e conservação de energia:

O Brasil possui longo histórico de implantação de mecanismos de eficiência energética, com destaques às ações do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), Programa Nacional da Racionalização do Uso de Derivados do Petróleo e do Gás Natural (CONPET), Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), Lei de Eficiência Energética (nº 10.295/01) e a Lei nº 9.991/00. Dentro de um processo de evolução natural, os atuais estudos energéticos do Governo Brasileiro tomam em conta uma estratégia de eficiência energética, objetivando definir metas, prazos e a perpetuação da energia conservada, embora existam dificuldades com levantamento de dados e com as atividades de monitoramento e verificação, com as quais se vem trabalhando no sentido de minimizá-las.

As dificuldades anteriormente mencionadas acerca de levantamento de dados, monitoramento e verificação refletem o cenário típico dos sistemas de abastecimento de água nacionais, e corroboram a percepção obtida durante o desenvolvimento da pesquisa, uma vez que estes dados e monitoramento são fundamentais para o desenvolvimento de sistemas de medição de eficiência e desempenho, objeto principal do presente estudo.

A publicação em 2011 da norma ISO 5001 (ISO, 2011), que define requisitos para a implantação de sistemas de gestão da energia voltados para a melhoria contínua do desempenho energético de organizações, e de sua versão brasileira, é fato emblemático da necessidade de se desenvolverem ferramentas específicas para análise de eficiência e desempenho energético, como proposto pelo presente trabalho.

2.2 PANORAMA DOS RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL

As bases institucionais para o gerenciamento de recursos hídricos no Brasil têm seus primórdios estabelecidos na Constituição Federal de 1988, que caracterizou as águas como um bem constitucionalmente protegido (BRASIL, 2006b), de uso comum. Com isso, alterou-se o domínio antes estabelecido pelo Código das Águas de 1934, atribuindo à União a responsabilidade de instituir um sistema nacional de gerenciamento de recursos hídricos e definir critérios de outorga de direitos de uso (PORTO; PORTO, 2008).

A consolidação da Política Nacional de Recursos Hídricos e do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos ocorreu por meio da Lei nº 9.433 (BRASIL, 1997). A Lei estabeleceu uma série de instrumentos de gestão, necessários à efetivação das ações

propostas, sendo eles (BRASIL 2006b):

- Planos de recursos hídricos;
- Enquadramento dos corpos d'água;
- Outorga de direito de uso de recursos hídricos;
- Cobrança pelo uso de recursos hídricos;
- Sistema de informações sobre recursos hídricos;
- Compensação a municípios.

Tendo 2009 como ano base, a vazão total de água retirada no Brasil para usos consuntivos, de mananciais superficiais e subterrâneos, atingiu a marca de $1.841,6 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (BRASIL, 2011a), sendo os principais setores usuários os de irrigação (47%), abastecimento urbano (26%) e consumo industrial (17%). Verifica-se que o abastecimento urbano, objeto desta pesquisa, é o segundo maior utilizador de água no Brasil.

A grande disponibilidade hídrica do país é reconhecida mundialmente, o que resulta na falsa impressão de que não ocorrem problemas de escassez no território nacional, do ponto de vista quantitativo e qualitativo. Em termos de quantidade, deve-se considerar o fato de que 80% da disponibilidade hídrica nacional localiza-se na Região Norte, na Bacia Amazônica, onde, inversamente, verifica-se a menor concentração populacional e as menores demandas consuntivas do país (BRASIL, 2011a). Esta condição pode ser visualizada na Figura 3, que ilustra as demandas em diversas sub-bacias nacionais, e também destaca oito áreas de elevada demanda. A Figura 4, por sua vez, caracteriza diversas sub-bacias do Brasil em termos de disponibilidade e estresse quantitativo/qualitativo de recursos hídricos.

No contexto desta tese, um dos destaques nas Figuras 3 e 4 é a Bacia do Rio Paraíba do Sul, localizada entre duas áreas de altíssima demanda para abastecimento urbano, as regiões metropolitanas de São Paulo e Rio de Janeiro. Essa bacia constitui um dos exemplos mais emblemáticos de pressão sobre os recursos hídricos em território nacional devido à urbanização, tanto em termos quantitativos quanto qualitativos. O Rio Paraíba do Sul fornece água para aproximadamente 14 milhões de pessoas, sendo que destes, 8 milhões são atendidos por meio da transposição de suas águas⁷ para consumo na região metropolitana do Rio de Janeiro, por meio do complexo hidrelétrico Lajes, que restitui a vazão captada na bacia do Rio Guandú, principal manancial do Rio de Janeiro (BRAGA *et al.*, 2008).

⁷ Segundo Braga *et al.* (2008), a referida transposição retira aproximadamente dois terços da vazão média mensal do Rio Paraíba do Sul, no seu trecho médio.

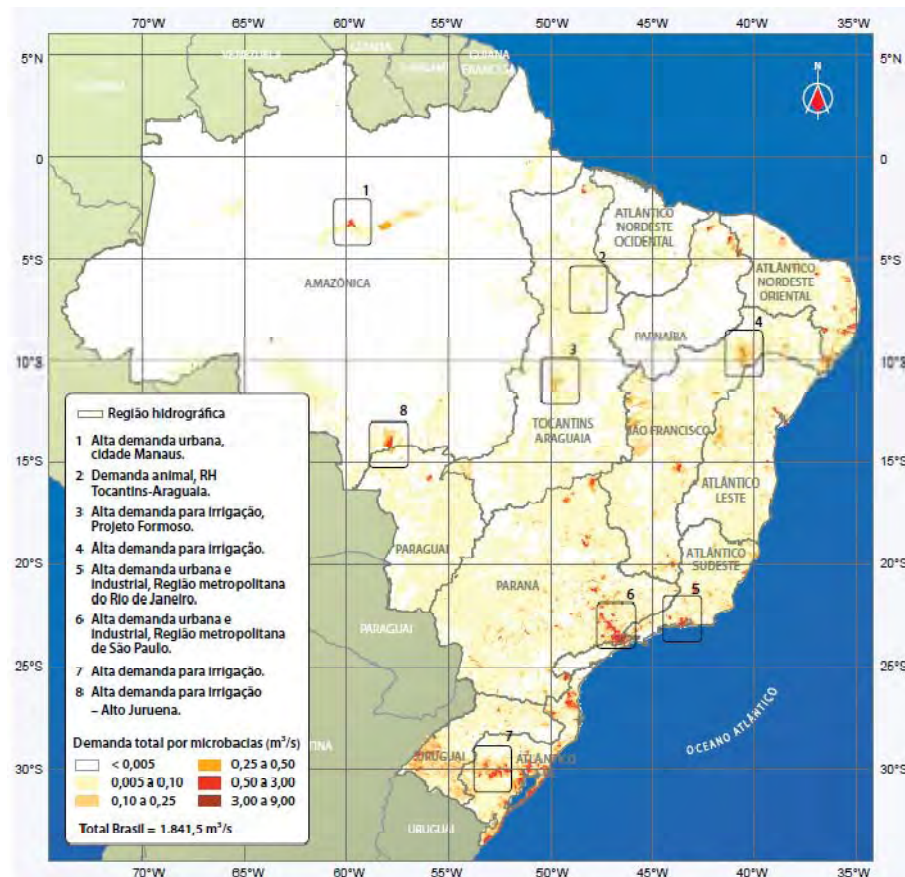


Figura 3 – Vazões de retirada de sub-bacias brasileiras, e zonas de demanda – ano base 2009 (BRASIL, 2011a)

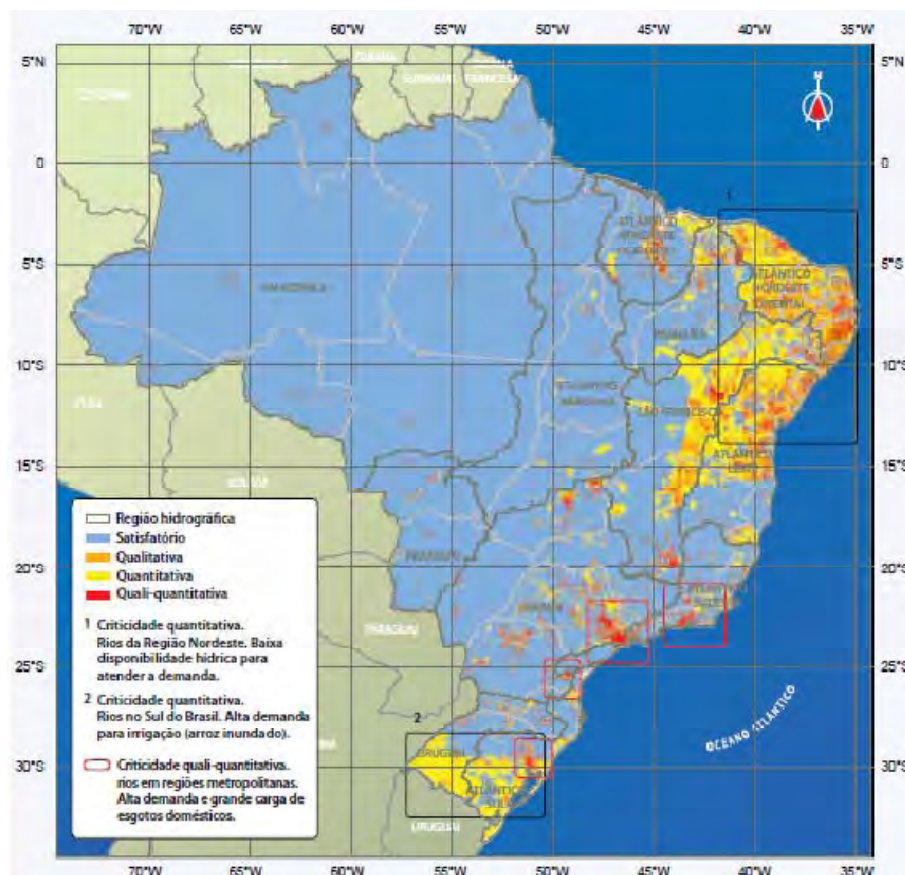


Figura 4 – Disponibilidade e estresse quantitativo/qualitativo no Brasil – ano base 2009 (BRASIL, 2011a)

Em 2008, o Governo do Estado de São Paulo criou, através do Decreto nº 52.748 (SÃO PAULO, 2008), um grupo de trabalho para propor alternativas de aproveitamento dos recursos hídricos da macro-metrópole de São Paulo, de forma a se definirem possíveis novos mananciais para o abastecimento da região. O Decreto nº 52.748, no seu artigo primeiro, parágrafo terceiro, inclui a Bacia do Rio Paraíba do Sul no âmbito regional da área metropolitana de São Paulo, considerando-a um potencial manancial para atendimento dessa área. A intenção de transposição de águas da Bacia do Rio Paraíba do Sul para a região metropolitana de São Paulo, além de enfatizar a crescente pressão sobre os recursos hídricos da bacia, sinaliza futuros cenários de escassez, inclusive, com o estabelecimento de conflitos de interesse sobre a água, já manifestados pelos Governos dos Estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro⁸, integrantes da bacia.

Apesar de os problemas relacionados à quantidade e qualidade dos recursos hídricos no Brasil atingirem áreas territoriais ainda reduzidas (na Figura 4, percebe-se que a maior parte do território nacional enquadra-se na categoria de disponibilidade satisfatória), é possível inferir que estes já atingem expressiva parcela da população e dos setores produtivos, uma vez que tais áreas correspondem, geograficamente, aos maiores aglomerados urbanos e regiões agropecuárias brasileiras. As mudanças climáticas globais, associadas ao uso desordenado do solo em bacias hidrográficas e demais pressões antrópicas sobre os recursos hídricos, tendem a intensificar os problemas quantitativos/qualitativos já enfrentados, caso a gestão integrada da água não seja assumida pelas camadas políticas, sociais e econômicas do país.

2.2.1 CONJUNTURA NACIONAL DO SETOR DE SANEAMENTO BÁSICO/AMBIENTAL – ABASTECIMENTO DE ÁGUA

De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (BRASIL, 2011b), para o ano base 2009, os índices médios de atendimento (referentes à população total, urbana e rural) são de 81,7% para abastecimento de água e 44,5% para coleta de esgotos, subindo para 95,2% e 52,0%, respectivamente, quando considerada somente a população urbana. Vale salientar que nem todo esgoto captado no país é tratado, sendo o índice total de tratamento desse efluente de 37,9%. As Figuras 5 e 6 apresentam a situação e distribuição

⁸ Durante a pesquisa bibliográfica, não foi localizado o projeto de transposição elaborado pelo Governo do Estado de São Paulo. A contrariedade dos Governos de Minas Gerais e Rio de Janeiro foi verificada através da mídia, por exemplo, nas páginas da Imprensa Oficial do Governo do Estado de Minas Gerais (<http://www.iof.mg.gov.br/legislativo/legislativo/Projeto-de-transposicao-do-Paraiba-do-Sul-pode-afetar-abastecimento-na-Zona-da-Mata.html>) e do Instituto Estadual do Ambiente do Estado do Rio de Janeiro (http://www.inea.rj.gov.br/noticias/noticia_dinamica1.asp?id_noticia=819).

espacial dos sistemas de abastecimento de água brasileiros, considerando como horizonte de análise o ano de 2015.

Percebe-se nas Figuras 5 e 6 que o maior déficit nacional no abastecimento de água projetado para 2015 localizar-se-á nas Regiões Norte e Nordeste. Apesar de englobar grande parte do território nacional, a contribuição ponderada da Região Norte para o cálculo do índice global de atendimento no Brasil é reduzida, devido à menor densidade demográfica da região. Já na Região Nordeste, um dos principais problemas para a expansão da oferta de água tratada recai sobre a baixa disponibilidade hídrica, verificada na Figura 4 (seção 2.2).

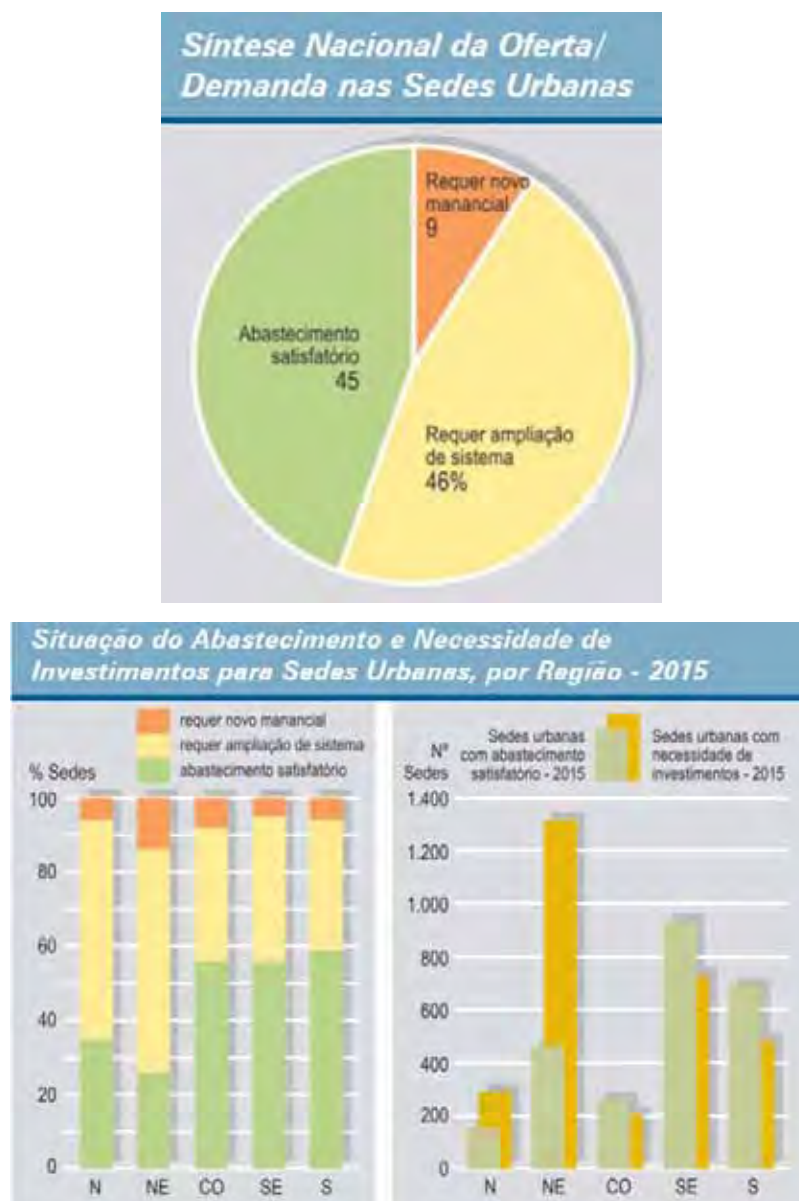


Figura 5 – Projeção da situação dos sistemas de abastecimento de água brasileiros para 2015 (adaptado de BRASIL, 2010a)



Figura 6 – Mapa com a projeção da situação dos sistemas de abastecimento de água brasileiros para 2015
(adaptado de BRASIL, 2010a)

O consumo médio *per capita* de água no Brasil, em 2009, foi de 148,5 l.(habitante.dia)⁻¹, o que representou uma redução de 1,8% em relação ao ano anterior (BRASIL, 2011b). Retomando a questão da eficiência dos serviços, no mesmo ano, o índice de perdas de faturamento médio do país foi de 37,1% (BRASIL, 2011b). Dentre os grandes prestadores de serviços de água regionais, destacam-se, positivamente, a SANEPAR (PR), com o menor índice nacional de perdas (19,8%) e, negativamente, a COSAMA (AM), com alarmantes 79,6% (BRASIL, 2011b).

É relevante salientar que grande parte do Estado do Amazonas não integra o Sistema Interligado Nacional, operando de forma isolada por meio de sistemas de geração térmicos.

Em função de tal característica, pode-se concluir que as perdas de energia associadas às perdas de água no Estado têm consequências tanto de ordem ambiental quanto de ordem econômica⁹, mais acentuadas do que nas demais regiões do Brasil, sendo possível inferir, por exemplo, que os volumes de água perdidos são responsáveis pela emissão de grandes quantidades de gases de efeito estufa.

Diante dos desafios para universalização e sustentabilidade dos serviços de saneamento básico no Brasil, foi sancionada em 2007 a Lei nº 11.445 (BRASIL, 2007a), que estabeleceu as diretrizes nacionais para o setor, prevendo, dentre outras medidas, o desenvolvimento do Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANASAB) pelo Ministério das Cidades, atualmente em fase de consolidação¹⁰. O horizonte de planejamento do PLANASAB é de vinte anos, com revisões quadrienais, sendo o monitoramento e a promoção da eficiência dos serviços pontos básicos da Política Federal de Saneamento Básico. Mais especificamente, no contexto dessa pesquisa, a Lei nº 11.445 (BRASIL, 2007a) define como condição de validade de contratos de prestação de serviços de saneamento básico, em seu artigo 11, a inclusão de metas progressivas e graduais de eficiência e uso racional de água, energia e outros recursos naturais.

2.2.2 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Segundo a Fundação Nacional de Saúde (BRASIL, 2006a), um sistema de abastecimento público de água (SAA) pode ser definido como:

[...] conjunto de obras, instalações e serviços, destinados a produzir e distribuir água a uma comunidade, em quantidade e qualidade compatíveis com as necessidades da população, para fins de consumo doméstico, serviços públicos, consumo industrial e outros.

Abbott e Cohen (2009) descrevem as atividades chaves da indústria de abastecimento de água – a estrutura de serviços apresentada por tais autores na Figura 7 assemelha-se, no Brasil, àquela denominada de saneamento ambiental, que engloba não somente o fornecimento de água em si, mas também serviços correlatos como tratamento de esgoto e gestão de resíduos.

⁹ Em termos econômicos, cabe ressaltar, também, que a geração térmica nos sistemas isolados do Brasil é subsidiada pela Conta de Consumo de Combustível (CCC), de forma que as perdas de energia – incluindo aquelas associadas às perdas de água – nestes sistemas oneram todo o restante do país.

¹⁰ BRASIL. Ministério das Cidades. **Proposta de Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANASAB)**. Brasília: MCIDADES, 2011.

A implantação de infraestruturas de água distribuídas é uma opção tecnológica recente, ainda não testada e não provada quando comparada àquelas voltadas ao gerenciamento de águas urbanas em grande escala (regional) – incluindo abastecimento de água, tratamento de esgoto e drenagem (MAKROPOULOS; BUTLER, 2010). Esse tipo de tecnologia reflete uma tendência global de descentralização da gestão de recursos e administração ambiental local, verificada em diversos setores como a geração de energia (através da microgeração) e decisões ambientais em nível comunitário (MAKROPOULOS; BUTLER, 2010).

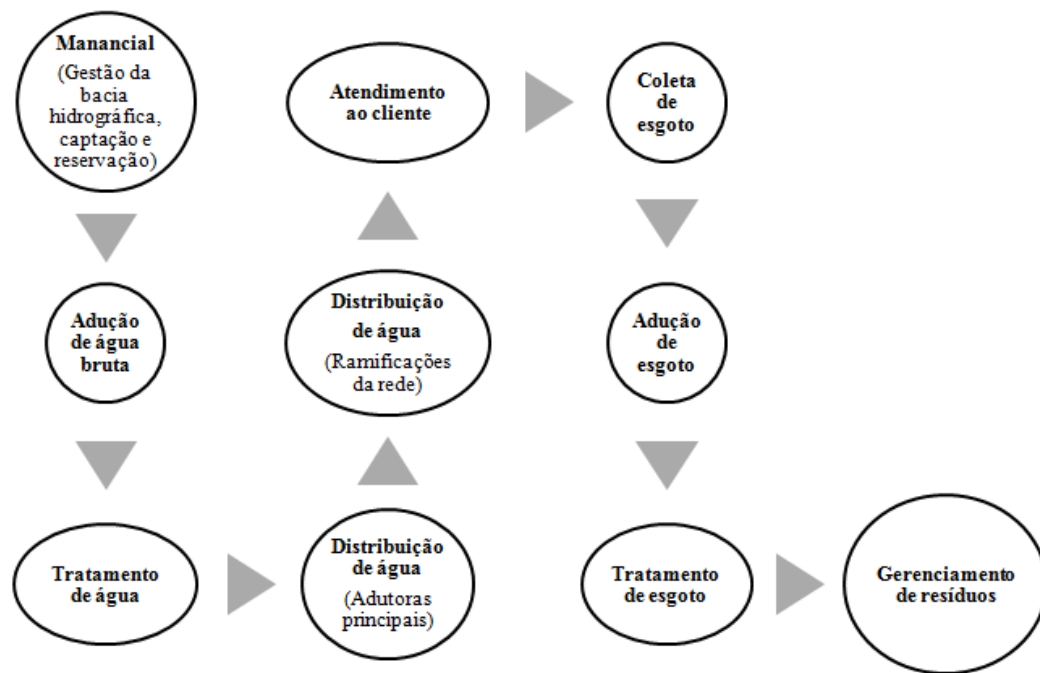


Figura 7 – Atividades-chave (cadeia de suprimentos) de indústrias de abastecimento de água e águas residuais (adaptado de Abbott e Cohen, 2009)

Para Makropoulos e Butler (2010), opções tecnológicas descentralizadas são aquelas aplicáveis em nível de desenvolvimento (para até cinco mil domicílios), incluindo tecnologias residenciais com potencial de aplicação em massa e com impacto significativo na infraestrutura, como por exemplo, dispositivos economizadores de água. A Tabela 1 apresenta a descrição de tecnologias para abastecimento de água convencionais e descentralizadas, associando-as ao seu nível tecnológico.

Tabela 1 – Tecnologias para sistemas de abastecimento de água convencionais e descentralizadas

Tecnologia	Nível tecnológico	Descrição
Reservatórios para abastecimento	Convencional	Armazenamento em grande escala de água de chuva, de boa qualidade, em áreas elevadas.
Exploração de águas subterrâneas	Convencional	Extração de água de boa qualidade, em grande escala, de aquíferos.
Captação de águas superficiais (reuso indireto de efluentes).	Convencional	Uso em grande escala de água de rios (tipicamente) de qualidade variável. A água captada pode conter efluentes tratados provenientes de áreas urbanas à montante da captação.
Transferência de recursos	Convencional	Grandes obras de engenharia para transferência de água de locais com fartura para outros com escassez.
Dessalinização	Novo, mas já utilizado	Tratamento de água do mar ou salobra para obtenção de padrões de potabilidade. Grande consumo de energia e geração de salmoura residual.
Sistemas de abastecimento duais/duplos.	Novo, mas já utilizado	Dois sistemas de tubulações paralelos, um para água potável e outro para água não potável. Há risco de ligações cruzadas.
Reuso direto de efluentes	Novo	O tratamento de esgoto para obtenção de água potável já é tecnicamente possível, porém, extremamente raro mesmo em áreas com grande estresse hídrico.
Containeres de água	Novo, mas já utilizado	O consumo desse tipo de água vem crescendo rapidamente. O uso de água engarrafada tem grande aceitação por parte dos consumidores.
Dispositivos economizadores de água	Convencional	Utilização de dispositivos indutores de eficiência hidráulica (desempenham a mesma função consumindo menos água), em casas novas ou submetidas a melhoramentos.
Extração local	Novo, mas já utilizado	Semelhante à exploração de água subterrânea, porém em escala local e tipicamente para fins não potáveis.
Abastecimento ajustado ao propósito	Novo	Análise detalhada dos padrões de qualidade requeridos para cada uso em particular, adaptado ao tipo de água disponível no local.
Tratamento no ponto de uso	Novo	Uso de uma variedade de equipamentos (filtros, desinfecção ultra-violeta, dentre outros) para tratamento residencial da água.
Captação de água de chuva	Novo, mas já utilizado	Captação e armazenamento de água de chuva precipitada em telhados e reuso para fins não potáveis.
Sistemas de água cinza ¹¹	Novo, mas já utilizado	Captação, armazenamento e tratamento de águas cinzas para fins não potáveis.
Casas autônomas	Novo	Residências quase totalmente autossuficientes em termos de água.
Sistemas de água fechados	Novo	Todos os efluentes domésticos são coletados e tratados para uso potável. Não há casos práticos conhecidos.
Sistemas de água e energia	Novo	Conjunto de tecnologias e práticas para aproveitamento de energia de diversos fluxos hidráulicos, proporcionando eficiência energética e possibilitando sistemas de tratamento.

Fonte: adaptado de Makropoulos e Butler (2010)

¹¹ Águas cinzas são aquelas provenientes de processos de lavagem domésticos (LIU *et al.*, 2010), como por exemplo, lavatórios, chuveiros, tanques e máquinas de lavar roupas e louças (FIORI *et al.*, 2006).

2.2.3 EFICIÊNCIA HIDRÁULICA, CONSERVAÇÃO E USO RACIONAL DE ÁGUA

Enquanto a maioria dos velhos desafios de abastecimento de água, saneamento e sustentabilidade ambiental permanecem, novos desafios como a adaptação às mudanças climáticas, aumento dos custos de alimentos e energia e envelhecimento da infra-estrutura estão aumentando a complexidade e os encargos financeiros da gestão da água. (UNESCO, 2009)

A citação anterior, extraída do documento *The United Nations world water development report 3: Water in a changing world* (UNESCO, 2009) traz à tona o cenário global envolvendo o gerenciamento sustentável da água, cada vez mais desafiador em função da intensificação das pressões já existentes sobre os recursos hídricos, das mais variadas naturezas (demográficas, econômicas, tecnológicas), bem como o surgimento de novas, como as mudanças climáticas globais.

Traçando-se um paralelo entre os recursos hídricos e energéticos, a eficiência, conservação e uso racional da água desempenham, também, um papel fundamental para o desenvolvimento sustentável das nações. Hespanhol (2008) propõe um novo paradigma para a gestão de recursos hídricos, baseado nos conceitos de conservação e reuso de água, que visa minimizar os custos financeiros e ambientais associados ao velho paradigma, direcionado à expansão da oferta de água, por meio da implantação de novos sistemas de abastecimento e transporte de grandes volumes de água de mananciais cada vez mais distantes.

Retomando o paralelo entre água e energia, percebe-se que o velho paradigma hídrico citado por Hespanhol (2008) é análogo ao antigo modelo do setor elétrico brasileiro, durante o qual o atendimento à crescente demanda era feito através da construção de novas usinas, com grande impacto ambiental associado. A atual exploração hidrelétrica da Bacia Amazônica exemplifica essa analogia, quando comparada, por exemplo, com os sistemas de transposição de água para atendimento das regiões metropolitanas de São Paulo e Rio de Janeiro, mencionados na seção 2.2. Por outro lado, a crescente promoção de ações e programas de conservação de energia – tanto por iniciativas públicas quanto privadas – se compatibiliza com ações semelhantes direcionadas ao uso racional da água, de acordo com o novo paradigma proposto por Hespanhol (2008).

Um das primeiras e, teoricamente¹², mais relevantes ações governamentais voltadas à promoção da conservação e eficiência no uso da água em sistemas de abastecimento público teve início em 1997, com a criação do Programa Nacional de Combate ao Desperdício de

¹² Não foram identificadas durante a revisão bibliográfica publicações que demonstrassem a eficácia e resultados, ou pelo menos a situação, do PNCDA, ao contrário do que ocorre, por exemplo, com o PROCEL, que divulga anualmente um relatório de resultados do Programa.

Água (PNCDA) (BRASIL, 1998). O programa pretende promover o uso racional da água para abastecimento público, de forma a se produzirem repercussões positivas no tocante à saúde pública, saneamento ambiental e da eficiência dos serviços (BRASIL, 1998). O gerenciamento do uso da água e diminuição do seu desperdício é um objetivo também do SANEAR, subprograma do PROCEL voltado ao setor de saneamento ambiental (ELETROBRAS, 2011), o que demonstra novamente o indissociável elo entre eficiência hídrica e energética.

Almeida *et al.* (2006) sugerem que o uso eficiente da água no setor de abastecimento pode ser equacionado através de três linhas fundamentais:

- Gerenciamento da oferta: estratégias voltadas à eficiência dos investimentos e expansão dos sistemas, aliadas a opções técnicas de exploração também eficientes;
- Gerenciamento da demanda: aumento da eficiência do uso por parte dos diferentes usuários;
- Controle integrado de perdas: atuação proativa visando à redução das perdas de água.

Uma interessante análise sobre conservação e uso racional de água em sistemas de abastecimento é realizada por Niccolucci *et al.* (2011). Utilizando o conceito de pegada hídrica¹³, estes autores comparam o comprometimento¹⁴ de água necessária para o fornecimento de um litro de água potável, seja na forma engarrafada ou proveniente de SAAs, tendo como caso de estudo a cidade de Siena (segundo os autores, representativa da realidade italiana). Niccolucci *et al.* (2011) concluíram que a pegada hídrica da água potável, entregue nas torneiras residenciais, é de 2,42 litros, sendo as perdas de água por vazamento nos SAAs o componente que mais contribui com o desperdício.

Um maior detalhamento, em termos técnicos, das principais fontes de desperdício de água em SAAs e alternativas para seu uso mais eficiente é apresentado na seção 2.4.

2.3 INTER-RELAÇÕES ENTRE ENERGIA ELÉTRICA E ÁGUA

A geração de energia e a produção de combustíveis requerem água, e o suprimento de água doce com qualidade elevada é de alta intensidade energética (KING *et al.*, 2008). O

¹³ Pegada d'água ou pegada hídrica (*water footprint*) é o volume total de água doce utilizado para se produzir determinado produto, no local onde ele é produzido (HOEKSTRA; CHAPAGAIN, 2007).

¹⁴ Comprometimento de água refere-se à soma dos volumes utilizados e/ou poluídos.

crescimento populacional e as mudanças climáticas geram pressões sobre ambos os recursos, sendo a água utilizada em vários estágios do ciclo de produção de energia, incluindo a obtenção de combustíveis (extração e refino de petróleo, processamento de gás, urânio e carvão, gaseificação e liquefação de carvão e gás, sequestro de carbono) e geração de energia (centrais a carvão, gás, óleo, nucleares, a biomassa e hidrelétricas) (USDOE, 2006).

Além das aplicações tradicionais, o crescente interesse pelos biocombustíveis deve ser considerado de forma destacada, segundo King *et al.* (2008), pois a produção (culturas energéticas) e processamento de biomassa (cogeração e produção de etanol) também demandam grandes volumes hídricos. Gerbens-Leenes *et al.* (2009) apresentam os consumos de água de diversas fontes energéticas, através do conceito de pegadas d'água, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Pegadas d'água de variados combustíveis e fontes energéticas

Fonte energética	Pegada d'água [m³/GJ]
Energia eólica	0,0
Energia nuclear	0,1
Gás natural	0,1
Carvão	0,2
Energia solar térmica	0,3
Petróleo	1,1
Hidrelétricas ¹⁵	22,00
Biomassa (Holanda)	24,00
Biomassa (EUA)	58,00
Biomassa (Brasil)	61,00
Biomassa (Zimbábue)	143,00

Fonte: adaptado de Gerbens-Leenes *et al.* (2009)

A energia também desempenha papel fundamental na produção e distribuição de água de qualidade, em diversos setores. Segundo a Aliança para Conservação de Energia (ALLIANCE, 2002), entre 2% e 3% da energia elétrica consumida no mundo é empregada para o bombeamento de água em sistemas de abastecimento, sendo estimado em 25% o potencial de redução de consumo destes através de medidas de eficiência energética e conservação de energia. Enquanto em décadas passadas a geração de energia através de hidrelétricas era a mais evidente forma de relação entre água e energia, recentemente, o foco na água como agente consumidor de energia tem atraído a atenção em instâncias políticas, ambientais e acadêmicas (CABRERA *et al.*, 2010).

A necessidade de se garantir a segurança alimentar mundial é, atualmente, uma das

¹⁵ A elevada pegada hídrica atribuída às hidrelétricas é decorrente do seu método de cálculo, que considera, para essa fonte, os volumes de água perdidos por evaporação em grandes reservatórios.

principais forças a exercer pressão sobre o uso conjunto da água e energia (MUSHTAQ *et al.*, 2009). As mudanças climáticas globais interferem diretamente nos ciclos hidrológicos regionais; quando tais mudanças ocorrem em áreas agrícolas, reduzindo a precipitação média e/ou aumentando a evapotranspiração, é necessário incrementar os níveis de complementação hídrica através da irrigação. De acordo com Jackson *et al.* (2010), a mudança de um sistema de irrigação por inundação para outro pressurizado resulta numa redução de 10% a 66% no consumo da água; por outro lado, o consumo de energia associado é aumentado em até 163%.

Em ambos os casos, o consumo de energia elétrica que é atribuído à movimentação de água se dá pelo uso de conjuntos moto-bomba. Tais equipamentos, associados a instalações hidráulicas (tubulações, componentes hidromecânicos, dentre outros) e operação pouco eficiente, devem ser o principal foco de medidas de eficiência hidráulica e energética nesse tipo de sistema (MORENO *et al.*, 2007).

Em se confirmando as previsões do Painel Intergovernamental para Mudanças Climáticas (IPCC), a dessalinização será uma tecnologia fundamental para a adaptação às consequências do aquecimento global (IPCC, 2008), principalmente em regiões litorâneas. Prevê-se, novamente, um aumento do consumo de energia para produção de água em cenários futuros, tendo em vista que a dessalinização, em seus variados métodos, é energeticamente intensiva (BUI *et al.*, 2010; GUDE; NIRMALAKHANDAN, 2010; NAFEYA *et al.*, 2010).

A Figura 8 resume as principais inter-relações entre usos de água para produção de energia e usos de energia para produção e disponibilização de água.

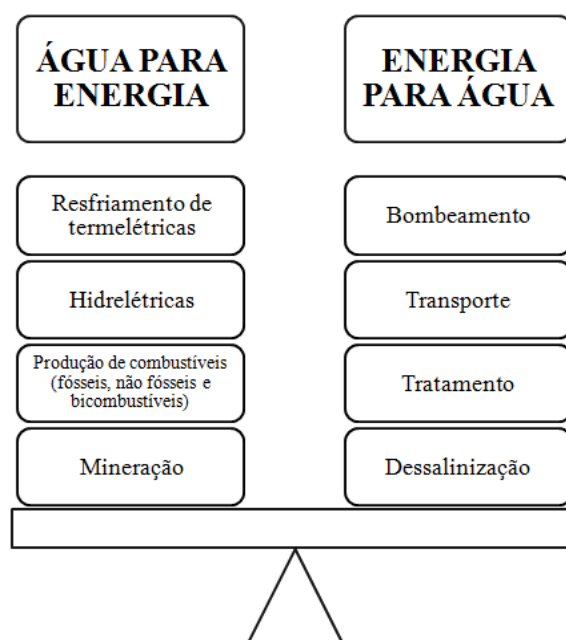


Figura 8 – Inter-relações entre usos de água e energia (adaptado de UNESCO, 2009)

2.4 EFICIÊNCIA E CONSERVAÇÃO HIDRÁULICA E ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Segundo Frijns *et al.* (2012), o alto consumo de energia afetará a indústria da água ao redor do mundo, sendo inevitavelmente associado à questão das mudanças climáticas. Nesse sentido, Carrijo e Reis (2006) afirmam que o custo da energia elétrica é o parâmetro mais relevante em termos de otimização operativa de sistemas de abastecimento de água, no tocante à minimização dos custos operativos. Apesar disso, as “[...] regras operacionais utilizadas visam à garantia da continuidade do abastecimento público, sem a preocupação com a economia de energia elétrica dos motores em funcionamento” (COSTA *et al.*, 2010a,b).

Segundo Colombo e Karney (2002), em muitas comunidades o consumo energético resultante do bombeamento¹⁶ de água é o maior componente dos custos operacionais do abastecimento, e a energia desperdiçada para a compensação de vazamentos está associada a diversos impactos ambientais, como a emissão de gases estufa, chuva ácida e depleção de recursos. Considerando sistemas de bombeamento de água para aplicações industriais, a XENERGY (1998¹⁷ *apud* BRASIL, 2007d), elenca um rol de medidas de eficiência energética aplicáveis a esse tipo de sistema, conforme Tabela 3.

O trabalho de Frijns *et al.* (2012) relata diversas ações de eficiência e conservação de energia na indústria da água desenvolvidas na Europa, e concluem que ganhos de eficiência energética entre 5% e 25% são realistas para estes sistemas, dependendo da criação de novos conceitos e tecnologias para tal. A Figura 9 (KINGDOM, 1998) demonstra o aumento na dificuldade de se incrementar o desempenho de empresas de abastecimento de água, de acordo com o nível do serviço.

Verifica-se na Figura 9 que, à medida que os níveis operacionais avançam subsequentemente ao nível de distribuição de água, maior é a dificuldade de se promover um aumento do desempenho do sistema. Isso pode ser explicado, primeiramente, pela dispersão geográfica verificada nesses níveis subsequentes, diferentemente do que ocorre nos níveis de produção e tratamento, normalmente desenvolvidos dentro das plantas das empresas. Essa

¹⁶ Alguns autores mencionam a porcentagem do consumo/demanda de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água atribuída ao bombeamento: Brandt *et al.* (2011) – 80%; RECESA (2008) e Gomes (2009b) – 90%. Barry (2007) afirma que ao longo da vida útil de uma bomba, considerando-se todos os custos de operação e manutenção, o custo de aquisição da máquina corresponde a 3% desse valor, enquanto o custo de compra da energia responde por 74% deste.

¹⁷ XENERGY. **United States industrial motor systems market opportunities assessment**. Burlington: XENERGY, 1998 *apud* BRASIL. Ministério de Minas e Energia; Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2030**. v. 12. Brasília: MME; EPE, 2007d.

dispersão acarreta uma maior influência de fatores externos, como por exemplo, as ligações prediais dos consumidores e a interação das redes de distribuição com outros componentes da infra-estrutura urbana, como as malhas viárias, o que implica numa maior dificuldade de se controlar e gerenciar os processos no nível de distribuição.

Tabela 3 – Medidas de eficiência energética aplicáveis a sistemas de bombeamento

Reduzir a energia requerida	
MEE	Comentário
Usar tanque de armazenamento intermediário, equalizando o fluxo no tempo	Economias de 10% a 20%
Eliminar malhas de <i>by-pass</i> e outros fluxos desnecessários	Economias de 10% a 20%
Aumentar o diâmetro da tubulação	Economias de 5% a 20%, porém com investimento alto
Reduzir as margens de segurança no projeto da capacidade do sistema	Economias de 5% a 10%, aplicáveis a todas as bombas
Adequar a bomba à carga	
MEE	Comentário
Adequar o tamanho da bomba à carga	Há um sobredimensionamento médio de 15% a 25% nas bombas em operação
Reduzir ou controlar a velocidade	
MEE	Comentário
Trocar válvula de controle por controles de velocidade	Economias de 30% a 80%, aplicáveis a sistemas com altura manométrica variável (circulação)
Melhorar os equipamentos	
MEE	Comentário
Trocar por modelo de bomba mais eficiente, ou com ponto de rendimento máximo mais próximo do de operação	16% das bombas têm mais de 20 anos – o problema maior é que o sistema mudou em relação ao ponto de rendimento máximo. O rendimento pode decair de 10 a 25%; bombas mais modernas são 2 a 5% mais eficientes; economias de 2 a 10%
Operação e manutenção	
MEE	Comentário
Trocar rotores desgastados. Verificar rolamentos, selos mecânicos e outros selos	Economias de 1% a 6%

Fonte: adaptado de XENERGY (1998) *apud* BRASIL (2007c)

Filion (2008) avaliou a influência da forma de cidades e redes de distribuição sobre o consumo energético em SAAs, sendo esta forma correspondente ao traçado da rede e à distribuição espacial dos consumidores. Tal análise se torna relevante em termos de planejamento urbano, no que se refere principalmente à expansão de cidades e elaboração de planos diretores, agregando a estes uma nova condicionante para a definição das melhores estratégias de urbanização e zoneamento. Ainda assim, Filion (2008) afirma não ser realista assumir que as decisões sobre a forma de uma cidade serão tomadas para conformá-la em função das redes de distribuição de água, visando reduzir seu consumo energético. Isso ocorre pelo fato do planejamento urbano envolver diversos níveis e infraestruturas, sendo a de

transportes a de maior influência sobre o traçado de redes e distribuição de água. A Figura 10 ilustra os arranjos de rede avaliados por Filion (2008).

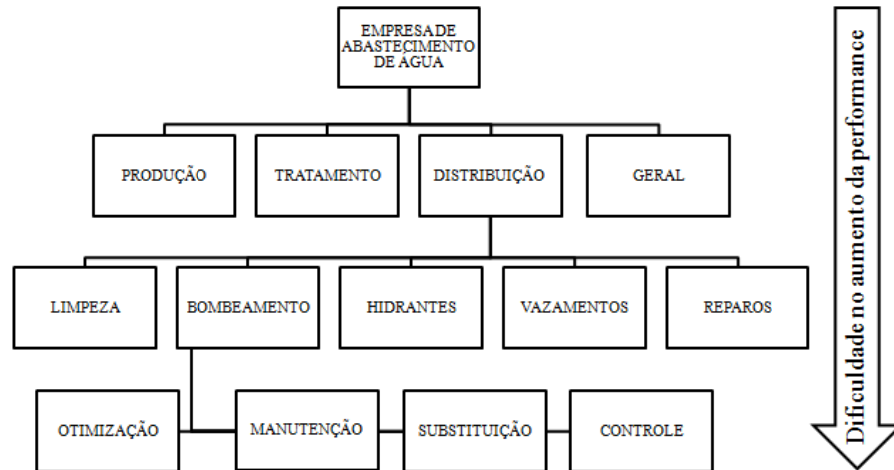


Figura 9 – Dificuldade de melhoria da performance de sistemas de abastecimento de água, em função do nível de serviço (adaptado de KINGDOM, 1998)

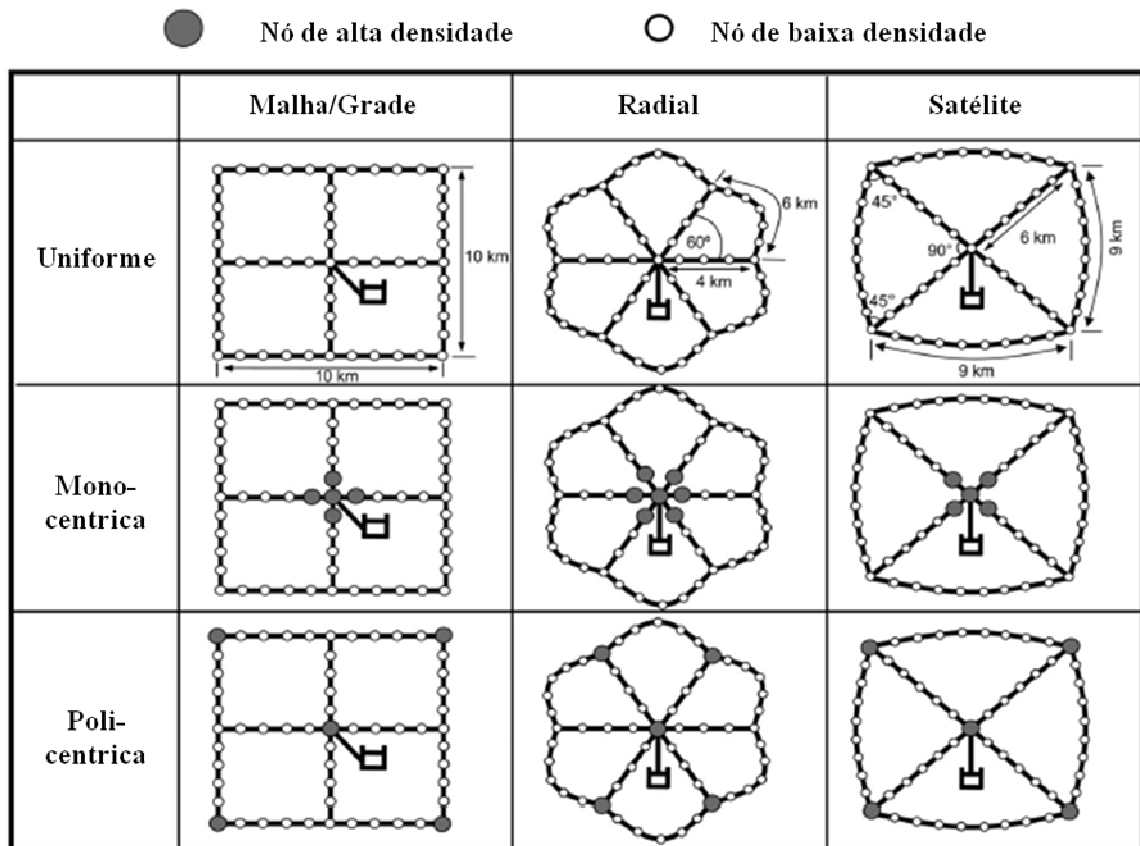


Figura 10 – Configurações de redes de distribuição de água e localizações populacionais avaliadas energeticamente (adaptado de Filion, 2008)

Após simulações hidráulicas e energéticas desenvolvidas no modelo EPANET (ROSSMAN, 2000), Fillion (2008) apresenta as seguintes conclusões associadas à Figura 9:

- o consumo energético anual *per capita* (excluindo aquele referente ao bombeamento) na configuração radial é de 34% a 47% inferior ao de sistemas gradeados ou em forma de satélite, em função de sua compacidade e quantidade de tubos curtos, acarretando menores perdas de carga e redução do diâmetro das tubulações exigidas para atender aos critérios de velocidade máxima e pressão mínima;
- em termos de distribuição da população, aquela com menor consumo energético (ainda sem considerar a energia de bombeamento) foi a monocêntrica, 26% a 53% inferior ao das redes uniformes ou policêntricas. Isso se deve ao fato da maioria das demandas se localizar até 1 km de distância do centro até os nós de maior densidade, em decorrência dos mesmos resultados citados no item anterior;
- ao se somarem os critérios de forma da rede e distribuição populacional, redes radiais e monocêntricas se mostraram as de menor consumo energético per capita.

2.4.1 PRINCIPAIS FONTES DE DESPERDÍCIO DE ÁGUA E ENERGIA EM SISTEMAS DE ABATECIMENTO

Caracterizam-se a seguir os principais causadores de perdas de água e energia elétrica em SAAs, documentados na literatura.

2.4.1.1 A questão das perdas de água

Araujo *et al.* (2006) e Fontana *et al.* (2012) indicam que, em termos mundiais, as taxas de perda de água em SAAs variam de 30% a 40%, enquanto Colombo e Karney (2002), citando outros autores, quantificam os volumes de água não contabilizados na Europa entre 9% e 30%. Além da questão quantitativa, vazamentos em redes de distribuição de água podem comprometer a qualidade do produto, através da intrusão de micro-organismos patogênicos, sobretudo mediante a ocorrência de transitórios hidráulicos, durante os quais as pressões se tornam baixas e até mesmo negativas (COLOMBO; KARNEY, 2002; MCINNIS, 2004; BESNER *et al.*, 2011).

Vazamentos aumentam os custos operacionais referentes à perda de água e consumo extra de energia, resultando, também, em perdas econômicas (COLOMBO; KARNEY, 2005).

Esse consumo extra refere-se não somente ao conteúdo energético implícito nos volumes de água perdidos, mas também, à energia que deve ser fornecida através de bombeamento para se manter o mesmo nível de serviço de um sistema sem perdas; ou seja, vazamentos desperdiçam energia devido ao conteúdo agregado na água perdida, e também pela necessidade de um aumento de potência para que tais volumes não comprometam o atendimento à demanda.

A partir desta abordagem, Colombo e Karney (2005) avaliaram a influência das perdas de água sobre o desempenho hidráulico e energético de bombas centrífugas, conforme Figura 11; as curvas verdes (tanto da bomba quanto do sistema) representam a situação de ausência de vazamentos. Q_d corresponde à vazão original teoricamente demandada pelo sistema, associada a uma altura total de elevação de $H_d + H_a$ (no qual H_d é a parcela estática e H_a a parcela dinâmica – no caso, representando as perdas de carga do sistema). A curva do sistema em amarelo representa a existência de vazamentos.

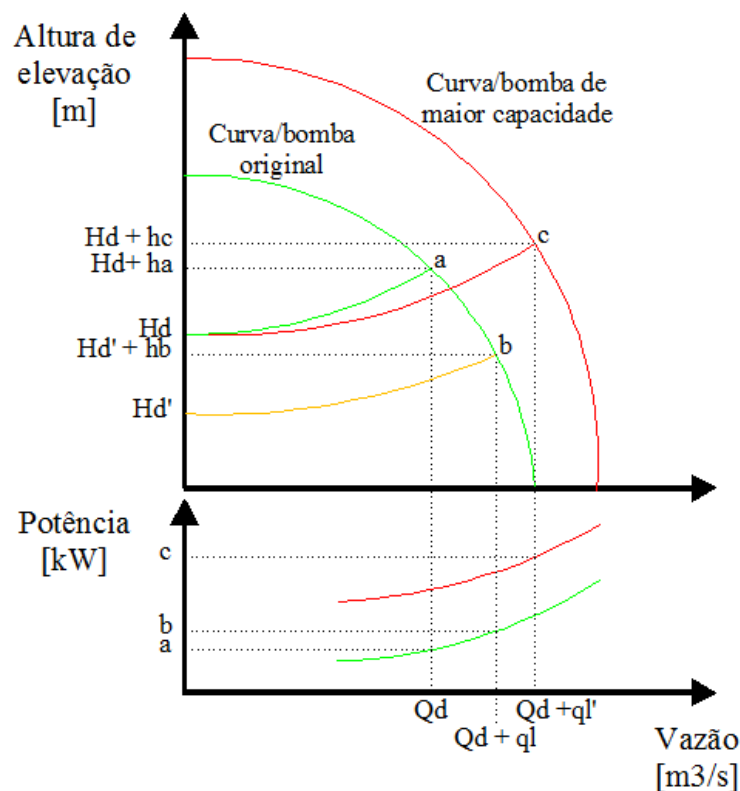


Figura 11 – Influência de vazamentos sobre sistemas de bombeamento (adaptado de COLOMBO; KARNEY, 2005)

Na Figura 11, para que a demanda do sistema (Q_d) seja mantida, é necessário fornecer uma vazão suplementar, referente às perdas por vazamento (q_l). O aumento da vazão da

bomba ocasiona uma redução na sua altura fornecida, e também uma redução na pressão do sistema (cuja carga estática é reduzida para H_d' , enquanto a perda de carga aumenta para h_b). As curvas em vermelho, por sua vez, caracterizam o comportamento do sistema e da bomba, após um aumento da sua capacidade (vazão e pressão) visando compensar as perdas de carga decorrentes do vazamento, evidenciando os desperdícios de água e energia decorrentes de vazamentos em sistemas de abastecimento de água que operam estações de bombeamento.

Após simulação de diferentes cenários hipotéticos, Colombo e Karney (2005) concluem que os principais fatores a influenciar o consumo/custo energético de um sistema de bombeamento sujeito a vazamentos são: distribuição espacial dos componentes do sistema, mais especificamente a posição relativa das bombas, reservatórios, vazamentos, além da demanda. As perdas por efeito hidrodinâmico são, segundo os autores, o fator mais importante relacionado a essa influência. Ainda segundo Colombo e Karney (2005), as alternativas para o aumento da capacidade de vazão e pressão da bomba, para compensação dos efeitos dos vazamentos, decorrem da substituição de bombas por outras de maiores dimensões, instalação de bombas suplementares, ou ainda pela variação da velocidade/rotação da máquina, alternativa essa mais viável em se tratando de sistemas já existentes.

A contabilização das perdas de água em SAAs ocorre, geralmente, por meio de balanços hídricos, através dos quais são definidos os volumes de entrada e saída em diversos níveis do sistema. Um dos métodos clássicos de balanço hídrico, baseado em indicadores e amplamente aceito no Brasil, é o da *International Water Association* (IWA), baseado no documento “*The Blue Pages*” (LAMBERT; HIRNER, 2000) e descrito em detalhes por Alegre *et al.* (2004). A Figura 12 apresenta um esquema resumindo este método.

Na Figura 12, as setas indicam a direção dos fluxos hidráulicos (entrada ou saída do sistema), enquanto os blocos com prefixo “M” correspondem aos pontos de medição e controle de vazão que possibilitam o balanço hídrico, sendo que cada um deles é responsável pela quantificação de volumes de referência (normalmente, integralizados num período de 12 meses), descritos a seguir a partir de adaptação de Alegre *et al.* (2004):

- M1: água bruta captada – volume de água captado no manancial do sistema;
- M2: água bruta exportada – volume de água bruta fornecido para outro sistema, em qualquer ponto entre a captação e a ETA;
- M3: água bruta importada – volume de água bruta recebido de outro sistema, em qualquer ponto entre a captação e a ETA;

- M4: água bruta disponibilizada para tratamento – volume de água bruta que efetivamente chega à ETA;

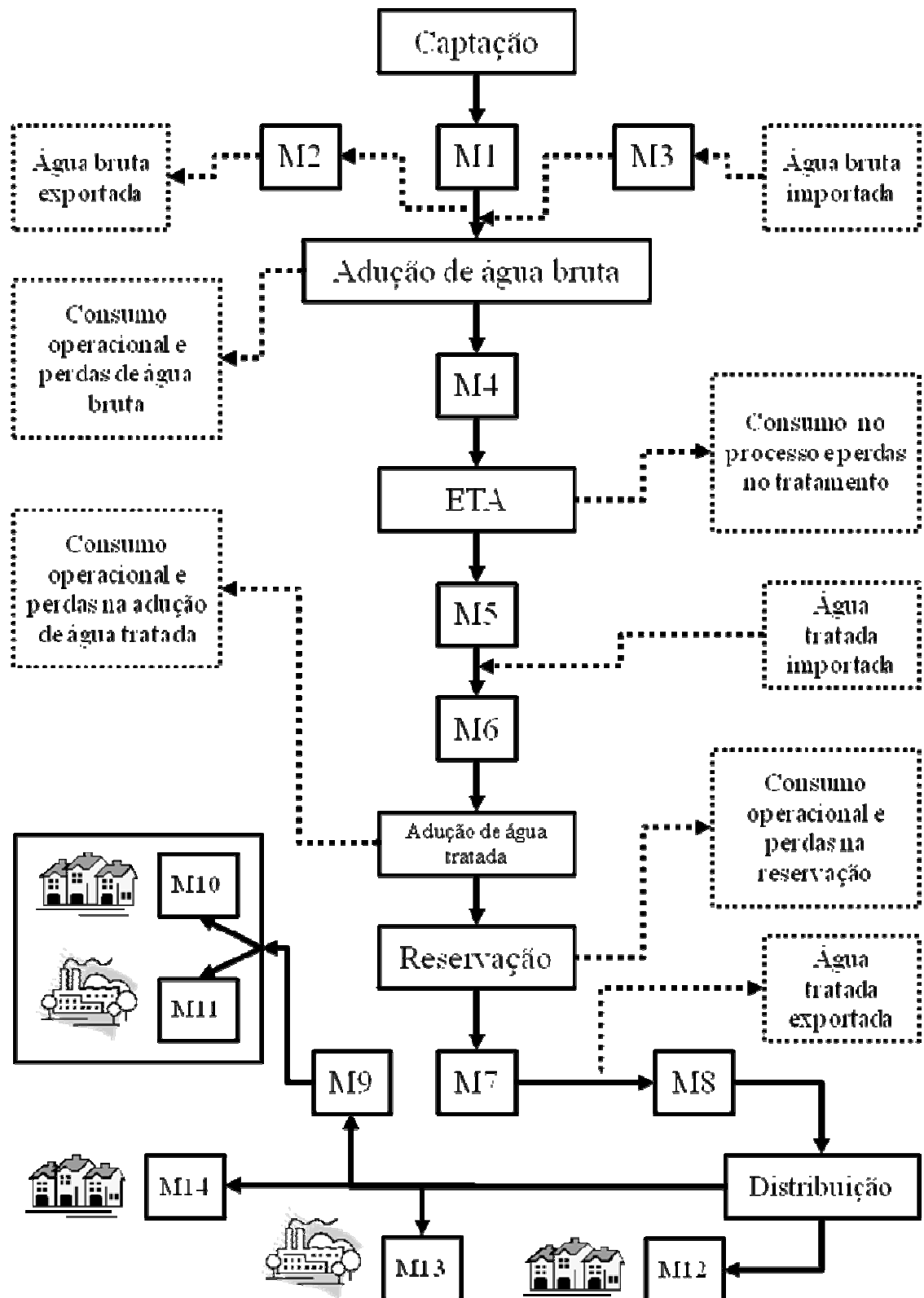


Figura 12 – Componentes do balanço hídrico e localização dos pontos de medição de vazão, segundo a IWA (adaptado de Alegre *et al.*, 2004)

- M5: água produzida – volume de água que é fornecido às adutoras ou rede de distribuição imediatamente após a ETA. Engloba, também, água não tratada disponibilizada no mesmo ponto;
- M6: água disponibilizada para adução – volume total de água (incluindo o volume importado) disponibilizado ao sistema de adução;
- M7: água disponibilizada para distribuição – volume de água que chega até à rede de distribuição;
- M8: água disponibilizada para distribuição direta – diferença entre o volume disponibilizado para distribuição e o volume de água tratada exportado;
- M9: água tratada medida em uma zona de medição e controle – volume de água medido na entrada de um trecho isolado da rede, com condições hidráulicas homogêneas e ou de fácil monitoramento;
- M10 a M14: água tratada micromedida nos ramais consumidores – volume de água que efetivamente chega aos consumidores finais.

A partir do esquema ilustrado na Figura 12, são quantificados os consumos e perdas no SAA, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Decomposição do balanço hídrico e perdas de água, segundo IWA
(unidade típica: $\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$)

VOLUME DE ENTRADA NO SISTEMA	CONSUMO AUTORIZADO	Consumo autorizado faturado	Consumo faturado medido (incluindo água exportada)	Água faturada
			Consumo faturado não medido	
		Consumo autorizado não faturado	Consumo não faturado medido	Água não faturada (perdas comerciais ou de faturamento)
			Consumo não faturado não medido	
	PERDAS DE ÁGUA	Perdas aparentes	Consumo não autorizado	
			Perdas de água por erros de medição	
		Perdas reais	Perdas por vazamento em adutoras e rede de distribuição	
			Perdas por vazamento e/ou extravasamento de reservatórios de adução e distribuição	
			Vazamentos nos ramais, a montante dos hidrômetros	

Fonte: Alegre *et al.*, 2004

Os componentes da Tabela 4 podem ser definidos como segue (ALEGRE *et al.*, 2004):

- Consumo autorizado: volumes, medidos ou não, fornecidos a consumidores registrados, à própria entidade gestora e a outros usuários que sejam implícita ou explicitamente autorizados. Incluem-se nessa categoria de consumo: volumes exportados, utilizados em hidrantes para combate de incêndios, lavagem de ruas e galerias de esgoto, irrigação de praças e áreas públicas e obras públicas. Ainda, são contabilizados como consumo autorizado os vazamentos e desperdícios de água de responsabilidade dos consumidores;
- Perdas de água: correspondem às diferenças entre o volume de entrada e o consumo autorizado entre dois pontos do sistema, de acordo com a Figura 12. Por exemplo: as perdas de água no tratamento correspondem à diferença entre a água bruta disponibilizada para tratamento (M4) e o consumo (autorizado) de água no processo. Apesar de não constituir uma perda no sentido estrito da palavra, o consumo de água no processo pode ser classificado como um tipo “virtual” de perda, a chamada perda comercial ou de faturamento. Segundo a metodologia IWA, as perdas de água propriamente ditas podem ser divididas em dois tipos: perdas reais (ou físicas) e perdas aparentes;
- Perdas reais ou físicas: correspondem aos volumes de água reais perdidos no sistema, seja por vazamentos, ruptura de tubulações, extravazamento de reservatórios, dentre outros;
- Perdas aparentes: correspondem às perdas devido a erros na medição (macro e micro) – seja por defeito de medidores ou fraudes - e ao consumo não autorizado (furtos de água através de ligações clandestinas ou usos ilícitos).

2.4.1.2 Uso de equipamentos pouco eficientes, em más condições de manutenção ou mal dimensionados

Conforme mencionado em seções anteriores, bombas hidráulicas associadas a motores elétricos são os componentes responsáveis pelo maior consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água convencionais. As principais oportunidades para promoção de eficiência energética em sistemas de bombeamento, segundo Kaya *et al.* (2008) são: substituição de bombas e motores com baixa eficiência por outros de alto rendimento, manutenção de bombas cuja eficiência esteja declinando, eliminação de problemas com cavitação.

O desenvolvimento tecnológico e a evolução da indústria nacional permitiram a otimização projetiva de bombas e motores, atualmente com eficiências significativamente superiores aquelas verificadas nos modelos antigos, normalmente presentes nos SAAs brasileiros. A instituição do Programa Brasileiro de Etiquetagem¹⁸ é um marco importante no que se refere ao uso de conjuntos moto-bomba eficientes, uma vez que fornece aos projetistas a oportunidade de selecionar equipamentos de melhor rendimento, com base na classificação definida pela Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE).

Savar *et al.* (2009) descrevem de forma precisa a problemática do uso de bombas sobredimensionadas:

Apesar de uma vasta gama de tipos e tamanhos de bombas centrífugas, a escolha de um modelo adequado para uma determinada aplicação parece ser um problema sério. Como resultado de práticas de engenharia conservadoras, as bombas são muitas vezes substancialmente maiores do que o necessário para os requisitos de uma planta [...]. Bombas centrífugas podem frequentemente ser superdimensionadas por causa do "arredondamento para cima", na tentativa dos projetistas de absorver aumentos graduais na rugosidade da superfície do tubo e na resistência ao fluxo ao longo do tempo, ou antecipando futuras expansões de capacidade da planta. Além disso, os requisitos de bombeamento da planta pode não ter sido claramente definidos durante a fase de projeto. Como resultado dessa abordagem conservadora, bombas geralmente têm pontos operacionais completamente diferentes de seus pontos de projeto. A pressão da bomba é muitas vezes menor do que o esperado, enquanto vazão é maior. Do ponto de vista do ponto operacional ótimo (ponto no qual a eficiência da bomba é maior), isso faz com que o funcionamento da bomba se torne ineficiente energeticamente, uma vez que a vazão é normalmente regulada por meio de *by pass* ou válvulas. (SAVAR *et al.*, 2009)

Gomes (2009b) apresenta diversos problemas de manutenção e operação de conjuntos moto-bomba, responsáveis pela ineficiência energética em SAAs: vibrações excessivas relacionadas a eixos e carcaças, sobreaquecimento de mancais e enrolamentos de motores, cavitação e vazamentos generalizados em bombas, desgaste e corrosão de rotores e carcaças.

2.4.1.3 Projeto inadequado de adutoras e redes de distribuição

O projeto de sistemas de distribuição de água é um problema de engenharia hidráulica amplo e aberto, que envolve a inserção de novos elementos no sistema, a reabilitação ou substituição de elementos existentes, e a tomada de decisões sobre a operação, confiabilidade e segurança do sistema (MONTALVO *et al.*, 2010). Os métodos clássicos para projeto de redes de distribuição de água baseiam-se em processo iterativos, de tentativa e erro, visando

¹⁸ O Programa Brasileiro de Etiquetagem é descrito na seguinte página oficial: <http://www.inmetro.gov.br/qualidade/eficiencia.asp>.

determinar os diâmetros de cada trecho de forma a se atenderem os diferentes níveis de pressão e vazão requeridos (GOMES; SILVA, 2006). Tais métodos, porém, não consideram o dimensionamento ótimo do conjunto rede/bombeamento, visando à minimização dos custos de investimento (implantação da estrutura e equipamentos) e de operação (energia consumida por bombeamento) (GOMES; SILVA, 2006). Com isso, explorar os diâmetros de tubulações que satisfaçam às cargas hidráulicas necessárias, com os menores custos, assume um papel primordial no projeto de redes de distribuição de água (MOHAN; BABU, 2010).

Tendo em vista que as normas técnicas brasileiras para dimensionamento de sistemas e redes de distribuição de água buscam, na sua essência, apenas a adequação hidráulica das redes, para o atendimento das demandas hídricas (pressões e vazões), sem considerar os processos de otimização (p.ex., aqueles relacionados à obtenção da eficiência hidráulica e energética) na busca de uma condição operativa ótima ao longo da vida útil do sistema, pode-se inferir que a grande maioria dos SAAs nacionais encontra-se aquém dessa condição ótima, possuindo grande potencial para melhorias do ponto de vista hidráulico e energético.

2.4.1.4 Operação ineficiente do sistema

Burgschweiger *et al.* (2009) descrevem, de forma resumida, o problema da otimização operativa de SAAs:

Sistemas de abastecimento de água constituem um elemento central da infraestrutura pública e causam custos substanciais, tanto em termos financeiros quanto energéticos. Evitar o consumo desnecessário de recursos é desejável por razões econômicas, bem como ecológicas. Para atingir este objetivo, ferramentas de suporte baseadas em modelos de decisão são cada vez mais importantes. As principais tarefas de planejamento incluem o projeto ótimo da rede para reduzir os custos de investimento e a operação ótima da rede, para minimizar os custos de operação. [...] O problema matemático de planejamento operativo é árduo, pois envolve tanto decisões discretas quanto contínuas, além da complexidade causada por redes de malha fechada e acoplamento temporal ao longo de todo horizonte de planejamento. Do ponto de vista prático, isso dificulta a geração de soluções suficientemente precisas e confiáveis, em tempo aceitável. Para se obter um ajuste razoável entre a precisão do modelo e os tempos computacionais, o desenvolvimento de modelos apropriados para métodos de otimização avançada é fundamental. (BURGSCHWEIGER *et al.*, 2009)

Uma das vantagens da otimização operativa em relação a outras medidas de eficiência hidráulica e energética em SAAs é o fato dela não ser estrutural, podendo ser implantada, em geral, sem a necessidade de investimentos de grande porte; além disso, os benefícios econômicos provenientes da otimização operativa ocorrem em curto prazo (COSTA *et al.*, 2010a,b).

2.4.2 METODOLOGIAS, TECNOLOGIAS E EQUIPAMENTOS PARA OTIMIZAÇÃO HIDRÁULICA E ENERGÉTICA DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Segundo a *New York State Energy Research & Development Authority* (NYSERDA, 2010), um programa de gerenciamento energético voltado a sistemas de abastecimento de água deve incluir: (1) coleta e organização de dados hidráulicos, de equipamentos e usos da energia; (2) desenvolvimento e entendimento de onde, porque e quando a energia é utilizada; (3) criação de uma linha de base de uso de energia, e medidas de performance para serem utilizadas com propósitos de avaliação e comparação; (4) entendimento das tarifas de energia e estrutura tarifárias para se adequar o uso da energia a estas.

Para Moreno *et al.* (2010a), medidas para economia de energia aplicáveis a sistemas de bombeamento para irrigação (análogos a sistemas de abastecimento de água) – podem ser classificadas em duas categorias:

- Melhoria do projeto e gerenciamento da infraestrutura;
- Melhoria dos equipamentos, principalmente bombas e motores.

Detalham-se a seguir as principais medidas de eficiência energética e conservação de energia aplicáveis a sistemas de abastecimento de água.

2.4.2.1 Utilização de fontes renováveis de energia para bombeamento

O uso de fontes renováveis para bombeamento de água, em especial eólica e solar, tem sido objeto de estudo de diversos trabalhos (HAMMAD, 1995; VELASCO *et al.*, 2004; PUROHIT; KANDPAL, 2005; KUMAR; KANDPAL, 2007; PUROHIT, 2007; RAMOS; RAMOS, 2009; GRANICH; ELMORE, 2010; LARA *et al.*, 2011).

Sistemas eólicos mecânicos, cujas turbinas fornecem potência de eixo diretamente para bombas, tem sido usados há tempos para bombeamento de água em pequena escala, sobretudo em áreas agrícolas ou remotas (KUMAR; KANDPAL, 2007); trabalhos como o de Velasco *et al.* (2004) e Lara *et al.* (2011) descrevem o uso de sistemas eólicos associados a geradores elétricos para fornecimento de energia a conjuntos moto-bomba convencionais, sendo esta alternativa interessante para grandes sistemas de bombeamento, nos quais o arranjo físico das estações impede o acoplamento direto entre turbinas e bombas. Bueno e Carta (2006) e

Ramos e Ramos (2009) indicam a expansão do uso de sistemas eólicos para bombeamento em grande escala, o que torna a tecnologia passível de utilização em SAAs. Purohit (2007) faz menção ao custo unitário da água bombeada por sistemas eólicos, altamente variável em função do potencial eólico local e dos parâmetros de projeto do sistema.

De forma análoga, Vilela e Fraidenraich (2001), Mahmoud e el Nather (2003), Ghoneim (2006), Odeh *et al.* (2005), Glasnovic e Margeta (2007) e Ould-Amrouche *et al.* (2010) avaliaram a utilização de sistemas fotovoltaicos (SFV) para bombeamento de água, em especial para abastecimento urbano e irrigação. Assim como no caso dos sistemas eólicos, os SFVs são estudados, principalmente, para aplicações em regiões rurais e remotas, com bombeamento em pequena escala. Segundo a ANEEL (BRASIL, 2008a), a tendência de expansão do uso de SFVs de pequenas escala no Brasil remete, justamente, ao atendimento de localidades localizadas em regiões dessa natureza.

Ould-Amrouche *et al.* (2010) afirmam que o uso de 1.000 SFVs associados a bombas de 1 kW podem evitar a emissão de 4,2 toneladas de CO₂ por ano quando comparados a sistemas diesel; além disso, os autores consideram tais sistemas mais onerosos em termos de investimento para instalação, porém, com menores custos por volume de água bombeado em relação aos baseados em diesel, conclusão obtida também por Mahmoud e el Nather (2003). Em função deste alto custo inicial, Odeh *et al.* (2005) mencionam que os SFVs para bombeamento de água têm se limitado a sistemas de média escala, de até 11 kW. Para taxas de atratividade de até 20%, os autores consideram os SFVs vantajosos em relação aos sistemas que utilizam diesel; além disso, a altura de elevação das bombas é diretamente proporcional ao custo do m³ bombeado, sendo este parâmetro destacado, também, por Ghoneim (2006).

A redução dos custos de equipamentos eólicos e fotovoltaicos em função do avanço tecnológico, do surgimento de empresas nacionais para a produção de equipamentos e do aumento da sua demanda indica que tais alternativas baseadas em fontes renováveis serão, a médio e longo prazo, viáveis para o bombeamento de água em sistemas de abastecimento, conforme sugere Ghoneim (2006) referindo-se a SFVs. Esta perspectiva é ainda mais promissora em termos nacionais, dados os potenciais eólicos e solares brasileiros. A presença de ventos no país é duas vezes superior à média mundial e de baixa volatilidade (oscilação das velocidades na faixa de 5%), conferindo maior precisão na determinação dos montantes energéticos disponíveis (BRASIL, 2008a). O potencial eólico brasileiro estimado é apresentado na Figura 13.

Em termos solares, o Brasil é igualmente favorecido, sendo que algumas áreas

localizadas da região Nordeste do país recebem radiações solares médias de intensidade comparável às dos maiores potenciais solares do mundo (BRASIL, 2008a). A Figura 14 ilustra a variação espacial da radiação solar média no território brasileiro.

Com base nas Figuras 13 e 14, verifica-se que a região Nordeste do Brasil é a de maior potencial para a implantação de sistemas de bombeamento solares e eólicos. Esse fato é de grande relevância para a região, tendo em vista a escassez hídrica enfrentada em seu semiárido; a disponibilidade de fontes energéticas renováveis, que permitam a utilização localizada de conjuntos moto-bomba, favorece a exploração dos mananciais subterrâneos, muitas vezes os únicos disponíveis para a população local. Já a região Norte, que poderia se beneficiar de forma especial com o uso desses sistemas, em função de sua alta dependência de combustíveis para a geração termelétrica, não possui potenciais eólicos e solares destacados, mas, ainda assim, passíveis de aproveitamento mediante estudos detalhados.

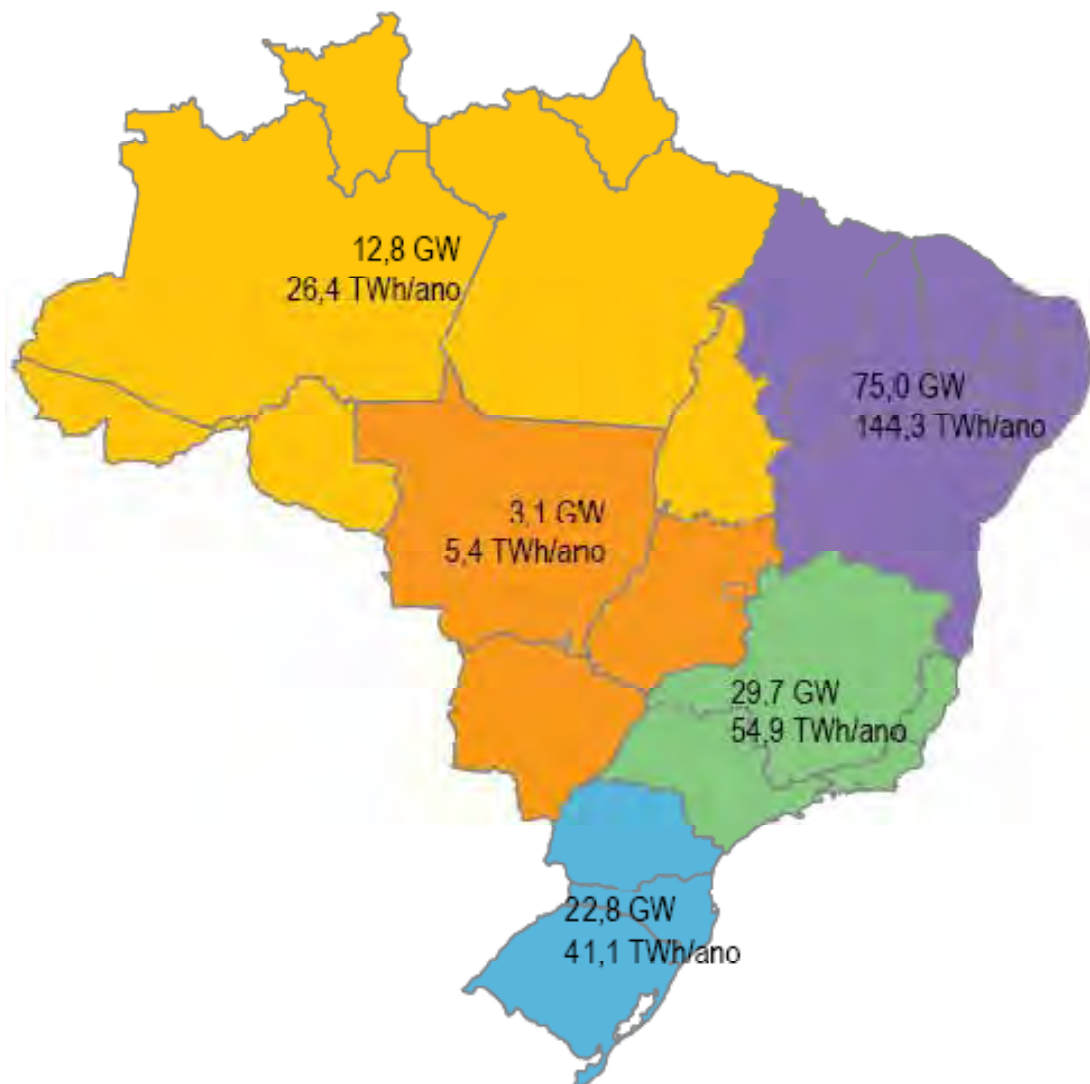


Figura 13 – Potencial eólico brasileiro, por região (BRASIL, 2008a)

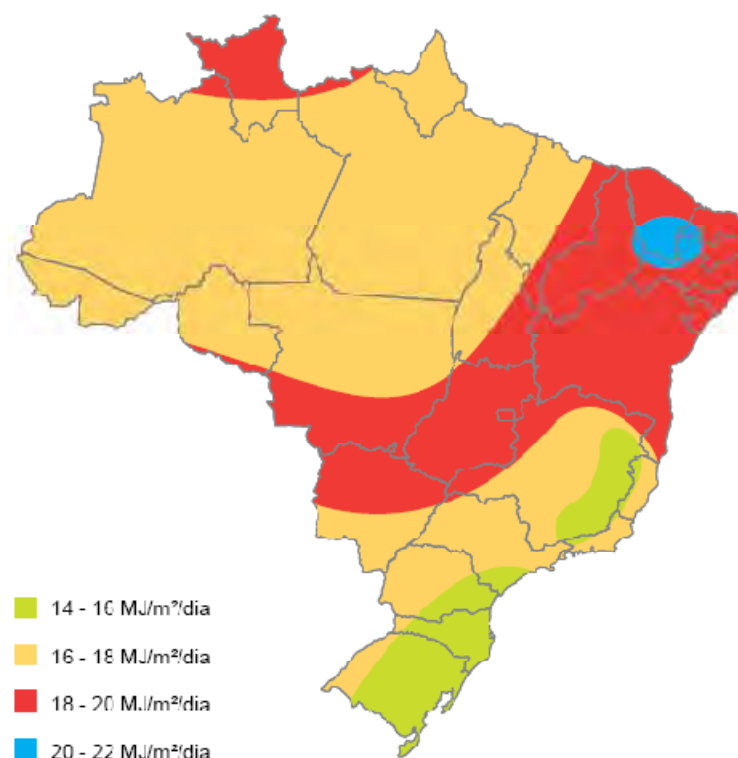


Figura 14 – Radiação solar média no Brasil (BRASIL, 2008a)

O uso de sistemas híbridos, associando fontes eólicas, solares e hidráulicas – a partir de reservação por bombeamento¹⁹ – é descrito por Vieira e Ramos (2008) e Ramos e Ramos (2009) como uma das principais alternativas tecnológicas para reduzir a incerteza inerente aos sistemas de bombeamento puramente eólicos e/ou solares.

2.4.2.2 Recuperação de energia através de turbinas hidráulicas

O potencial hidroenergético de sistemas de abastecimento de água é conhecido há tempos, porém, pouco explorado mundialmente. Casos de uso de microturbinas hidráulicas para produção de energia em sistemas de abastecimento de água são relatos na literatura, por exemplo, por Frijns *et al.* (2012). Sistemas instalados em regiões com altos gradientes topográficos, nas quais o escoamento ocorre por gravidade, tendem a oferecer altas pressões em adutoras e redes de distribuição, passíveis de utilização para geração de energia hidrelétrica.

Ao mesmo tempo em que permitem gerar eletricidade, turbinas hidráulicas instaladas

¹⁹ Os sistemas de reservação por bombeamento são análogos às centrais hidrelétricas reversíveis. Tais sistemas são constituídos por dois reservatórios (um de montante e um de jusante), interligados por sistemas hidrelétricos e de bombeamento. Água é bombeada para o reservatório superior nos horários fora da ponta, e turbinada para o inferior durante o horário de pico (VIEIRA; RAMOS, 2008).

em redes de distribuição de água podem atuar como sistemas de controle de pressão, em substituição às válvulas redutoras de pressão (VRPs) (RAMOS; RAMOS, 2009; FONTANA *et al.*, 2012), sendo esta uma importante ferramenta para o gerenciamento de perdas de água por vazamento. Enquanto as VRPs reduzem a pressão através da dissipação de energia, turbinas hidráulicas podem converter o excesso de pressão na rede em energia elétrica útil (RAMOS *et al.*, 2011; FONTANA *et al.*, 2012).

Dentre os benefícios da recuperação de energia hidráulica em SAAs, citados por Vieira e Ramos (2008), destacam-se: aumento da eficiência energética do sistema através do aproveitamento de fontes locais, diminuição da dependência externa de energia elétrica e redução dos custos de operação. Vieira e Ramos (2008) destacam, ainda, que a implantação de hidrelétricas de pequeno porte em SAAs apresenta a conveniência de grande parte de seus componentes já existirem, reduzindo consideravelmente o custo de implantação.

2.4.2.3 Gerenciamento de perdas de água e pressões

Segundo Ulanicki *et al.* (2000), o controle de pressão é uma medida economicamente eficaz para reduzir vazamentos em sistemas de distribuição de água. Segundo os autores, além de reduzir vazamentos existentes e evitar o surgimento de novos, o gerenciamento de pressão reduz a incidência de rupturas em tubulações, evitando os custos de reparo, além de evitar a interrupção do tráfego em vias públicas e no abastecimento dos clientes.

No que se refere à análise e modelagem hidráulica de perdas de água, vazamentos são considerados nós de demanda regida pela pressão (GIUSTOLISI *et al.*, 2008; CABRERA *et al.*, 2010). No modelo proposto por Cabrera *et al.* (2010), os vazamentos são modelados com energia saindo do volume de controle, análogos à energia hidráulica fornecida aos consumidores. O gerenciamento eficiente da pressão é quase sempre parte integrante da estratégia para gestão de perdas de água: ao mesmo tempo em que se pode reduzir a pressão na rede para reduzirem-se os vazamentos, a estratégia para seu controle deve considerar a manutenção de pressões suficientes nos nós – uma carga hidráulica ótima –, de forma a atender, também, as suas demandas reais (FONTANA *et al.*, 2012).

Citando trabalhos presentes na literatura, Araujo *et al.* (2006) e Nicolini *et al.* (2011) sugerem que o uso de dispositivos para inserção de perdas de carga na rede, em especial válvulas redutoras de pressão (VRPs), é a opção tecnológica mais utilizada para o gerenciamento de pressão e redução de vazamentos. Num primeiro momento, tais métodos podem parecer contraditórios em relação à eficiência energética do sistema, uma vez que

devem-se buscar menores perdas de carga durante o projeto de redes e adutoras. Para que tais dispositivos atuem de forma efetiva são necessários estudos quanto à sua localização, quantidade e operação, geralmente desenvolvidos através de modelagem hidráulica em associação com técnicas de programação matemática, tais como algoritmos genéticos, sendo objeto de diversos trabalhos científicos (NICOLINI *et al.*, 2011).

2.4.2.4 Otimização operativa de SAAs

Diversas publicações consideram a redução do custo associado ao uso de energia elétrica como a principal meta operativa de SAAs por sua relevância na contabilidade das empresas. A otimização operativa de SAAs pode ser realizada em quatro etapas, a saber: 1) estabelecimento e definição do problema de otimização pela definição de uma função objetivo, 2) modelagem computacional do sistema, 3) calibração e validação do modelo hidráulico e 4) simulação e otimização.

A função objetivo de problemas de otimização operativa de SAAs pode assumir várias formas, a saber: manutenção de pressões mínimas na rede para minimizar o custo de bombeamento através de bombas com rotação variável (LINGIREDDY; WOOD, 1998), minimizar vazamentos através do controle ótimo de válvulas redutoras de pressão (JOWITT; XU, 1990; VAIRAVAMOORTHY; LUMBERS, 1998), ajustar vazões e pressões fornecidas aos consumidores através da operação de bombas (EKER; KARA, 2003), controle da pressão na rede através da otimização de níveis de reservatórios para minimizar perdas de água (NAZIF *et al.* 2010), minimizar os custos de energia de bombeamento através da operação otimizada de múltiplos conjuntos moto-bomba (COSTA *et al.*, 2010a,b) e maximizar a eficiência energética do sistema através do uso de sistemas de geração eólicos (VIEIRA; RAMOS, 2009a,b).

Burrows *et al.* (2000) focam seu estudo na otimização operativa visando o controle ativo de perdas de água, associando um modelo hidráulico a um sistema de informações geográficas (SIG) para a análise de distritos de medição no Reino Unido. Um diferencial proposto pelos autores é o uso de uma matriz de influência, obtida por meio de regressão. O objetivo da matriz de influência é reduzir a necessidade de simulações completas do sistema em modelos como o EPANET (ROSSMAN, 2000), poupando trabalho computacional, sintetizando a carga hidráulica total em qualquer instante, em pontos selecionados – sendo estes pontos representativos do distrito de medição selecionado, através do monitoramento de vazões e cargas em suas fronteiras.

O conhecimento das demandas hídricas na rede (geralmente em base horária) é considerado por Herrera *et al.* (2010) um fator chave para a aplicação de modelos hidráulicos direcionados ao aumento da eficiência de SAAs através da otimização operativa. Uma abordagem diferente considera a otimização operativa em tempo real, através do uso de sistemas de monitoramento hidráulico e energético associados a sistemas de supervisão e controle. Essa abordagem é considerada por Campisano *et al.* (2010) para redução de vazamentos através da operação de válvulas em tempo-real.

2.4.2.5 Uso de equipamentos eficientes

Kaya *et al.* (2008) afirmam que 30% do consumo energético proveniente de bombas hidráulicas pode, em termos gerais, ser evitado mediante melhores projetos e seleção adequada de equipamentos. Segundo os autores, para uma bomba trabalhar no seu ponto de máxima eficiência é necessário não somente sua correta seleção/projeto, mas também, um bom projeto do sistema no qual ela se insere e das condições de trabalho. Os programas de etiquetagem, que fornecem bases para comparação de eficiência energética aos compradores, são iniciativas fundamentais no tocante ao incremento do desempenho hidráulico e energético em sistemas de bombeamento.

Associada ao uso de bombas, a utilização de motores superdimensionados para atendimento a situações críticas de carga é outra fonte significativa de desperdício, uma vez que essa situação, em geral, desloca a operação da máquina para pontos de menor eficiência (KAYA *et al.*, 2008). Em geral, os pontos de melhor rendimento de motores se localizam na região da curva de eficiência superior a 75% da carga máxima; o rendimento de motores, por sua vez, varia de 70% a 96%, segundo Kaya *et al.* (2008), devendo-se, no momento da seleção e aquisição, priorizar motores de alto rendimento.

Para de la Torre (2008), parâmetros como a velocidade específica, velocidade específica da sucção e NPSH influem não somente na seleção de bombas centrífugas mais eficientes, mas também na manutenção desses níveis de eficiência e redução dos períodos de manutenção durante a vida útil do equipamento. Outra observação relevante apresentada pelo autor diz respeito ao uso de bombas de maior capacidade em relação a equipamentos de menor porte. Sabe-se que o rendimento de uma bomba centrífuga tende a aumentar de forma direta com o seu tamanho/capacidade, o que constitui uma vantagem energética em relação ao uso de várias bombas de menores dimensões. Por outro lado, o uso de vários conjuntos moto-bomba menores confere maior flexibilidade operativa a uma estação, principalmente quando

há grande variação de vazão nesta. Portanto, ambos os casos devem ser considerados para a seleção de bombas com vistas à eficiência energética, e até mesmo utilizados em conjunto.

Kaya *et al.* (2008) sugere que bombas operando com vazões inferiores a 40% da nominal tem aumentados seus níveis de vibração, cargas radiais e ruídos, além do decréscimo acentuado do rendimento. Dentro da vida útil da bomba, pode-se conseguir um incremento da eficiência por meio da eliminação de incrustações e rugosidades decorrentes do envelhecimento do material (KAYA *et al.*, 2008).

2.4.2.6 Uso de bombas com rotação variável

Há várias formas de se operar um sistema de bombeamento em situações nas quais é necessária a variação da vazão, a saber (KAYA *et al.*, 2008): acionar bombas somente no momento requerido (operação com carga parcial), utilização de *by-pass* para retornar parte da vazão bombeada ao tanque de sucção, utilização de um reservatório de sucção com nível variado, inserção de perdas de carga no sistema através do estrangulamento de válvulas de controle, alteração da rotação da bomba através de acoplamentos hidráulicos ou elétricos entre bomba e motor, utilização de bombas operando em paralelo e, finalmente, utilização de inversores de frequência nos motores.

Para Gibson (1994), dispositivos para variação de velocidade são alternativas energeticamente eficientes para controlar a vazão de bombas e podem ser utilizados de forma similar às alternativas tradicionais, como o estrangulamento de válvulas. Segundo o autor, a efetividade de dispositivos de controle de velocidade no controle da vazão depende da interação entre a curva característica da bomba (relação entre altura de elevação e vazão) e a curva do sistema ou processo. Essa interação inclui a magnitude da variação de velocidade necessária para que sejam obtidas as vazões máximas e mínimas requeridas, e sua relação com as regiões instáveis da curva da bomba, geralmente localizada na faixa de vazão inferior a 35% da nominal. Dessa forma, deve-se selecionar bombas com curvas adequadas ao controle de velocidade por ocasião de projetos de otimização energética (GIBSON, 1994).

2.4.2.7 Otimização da capacidade de armazenamento e operação de reservatórios

O uso da capacidade de armazenamento em SAAs pode minimizar a necessidade de bombeamento durante períodos de pico de demanda (hídrica e elétrica) (NYSERDA, 2010), e essa alternativa constitui uma prática comum em sistemas sujeitos a tarifação de energia horo-

sazonal. Apesar da importância de reservatórios para a operação eficiente de SAAs, incluindo seu impacto positivo sobre a eficiência dos sistemas, existem poucos modelos direcionados especificamente para o projeto otimizado de redes de distribuição considerando reservatórios (BATCHABANI; FUAMBA, no prelo).

De acordo com Batchabani e Fuamba (No prelo), algoritmos genéticos são a técnica preferida na atualidade para modelagem e otimização desse tipo de problema. Vamvakeridou-Lyroudia *et al.* (2007) utilizou algoritmos genéticos para investigar o projeto de redes de distribuição nas quais reservatórios, e suas características físicas e operacionais, foram considerados variáveis de decisão no problema de otimização.

Valer-se da capacidade de armazenamento de reservatórios, juntamente ao controle ótimo de estações de bombeamento com tarifas de energia elétrica variáveis, pode proporcionar significativas reduções de custos em sistemas de abastecimento de água; para Fang *et al.* (2010), a operação ótima de sistemas de distribuição de água com múltiplos reservatórios de armazenamento, e múltiplas fontes, é um problema de otimização não linear de grande escala, com variáveis contínuas e discretas, de difícil resolução. O modelo de regras operativas para reservatórios proposto por Fang *et al.* (2010) consiste em manter o nível do reservatório o mais elevado possível durante o período fora da ponta, anular a vazão afluente ao reservatório durante o período de ponta e, em caso de deplecionamento até o nível mínimo operativo, fornecer água para a manutenção deste nível, até o final da ponta.

2.5 DISTINÇÃO E COMPLEMENTARIEDADE ENTRE OS CONCEITOS DE PRODUTIVIDADE, EFICIÊNCIA E DESEMPENHO

As primeiras noções formais de produtividade foram elaboradas a partir da Revolução Industrial, momento no qual o mundo presenciou uma ampla transição entre o modo de produção baseado na força e habilidade humana, para outro no qual o emprego de máquinas permitia a produção em massa de bens de consumo. Esse período marcou, também, a mudança do paradigma referente à eficiência. Antes da Revolução, eficiência correspondia à produção de bens com alta qualidade, feitos sob medida para as necessidades dos consumidores; por outro lado, a mecanização ocorrida durante a Revolução Industrial exigiu grandes investimentos por parte dos proprietários das fábricas. Com isso, foi agregada a componente quantitativa à noção de eficiência, uma vez que o aumento da produção se tornou fundamental para cobrir os investimentos realizados e produzir lucro.

A valoração da produtividade foi, inicialmente, definida como uma relação percentual entre insumos (*inputs*) e produtos (*outputs*) de natureza monetária, expressa na equação (1), conforme Andersen e Fagerhaug (2002):

$$P = \frac{O}{In} \quad (1)$$

sendo:

- P produtividade [%];
- O produtos [unidade monetária];
- In insumos [unidade monetária].

Ainda segundo Andersen e Fagerhaug (2002), a equação (1) pode ser adaptada de acordo com o nível de agregação desejado dentro das organizações, e para diferentes tipos de insumos e produtos. Abbott e Cohen (2009) afirmam que a produtividade pode ser avaliada em termos parciais ou totais. A produtividade parcial pode ser calculada relacionando-se determinados produtos e insumos, isoladamente, enquanto a produtividade total corresponde à taxa entre produtos totais e insumos totais agregados no negócio/sistema. Ainda segundo Abbott e Cohen (2009), os indicadores de produtividade parcial apresentam a vantagem de requererem menores massas de dados, além de serem mais facilmente calculados e interpretados quando comparados aos indicadores de produção total. Estes, por sua vez fornecem uma visão da evolução do sistema como um todo, exigindo maior trabalho para o cálculo e interpretação, além de não permitirem a identificação dos agentes individuais responsáveis pelas mudanças na produtividade.

Depois da II Guerra Mundial, a retomada do crescimento industrial intensificou a competitividade entre as empresas, uma vez que os consumidores passaram a dispor de uma maior variedade de produtos, o que lhes conferiu poder de escolha. Foi quando o conceito de produtividade começou a ser substituído pelo de desempenho (ANDERSEN; FAGERHAUG, 2002). Desempenho, como proposto por Sink e Tuttle (1989²⁰ *apud* ANDERSEN; FAGERHAUG, 2002), é um conjunto de sete componentes inter-relacionados, voltados ao aumento da competitividade e desenvolvimento organizacional, conforme Figura 15.

²⁰ SINK, D. S.; TUTTLE, T. C. **Planning and measurement in your organization of the future**: Industrial Engineering and Management Press. Norcross: Institute of Industrial Engineering, 1989 *apud* ANDERSEN, B.; FAGERHAUG, T. **Performance measurement explained**: designing and implementing your state-of-art system. Winsconsin: ASQ, 2002.

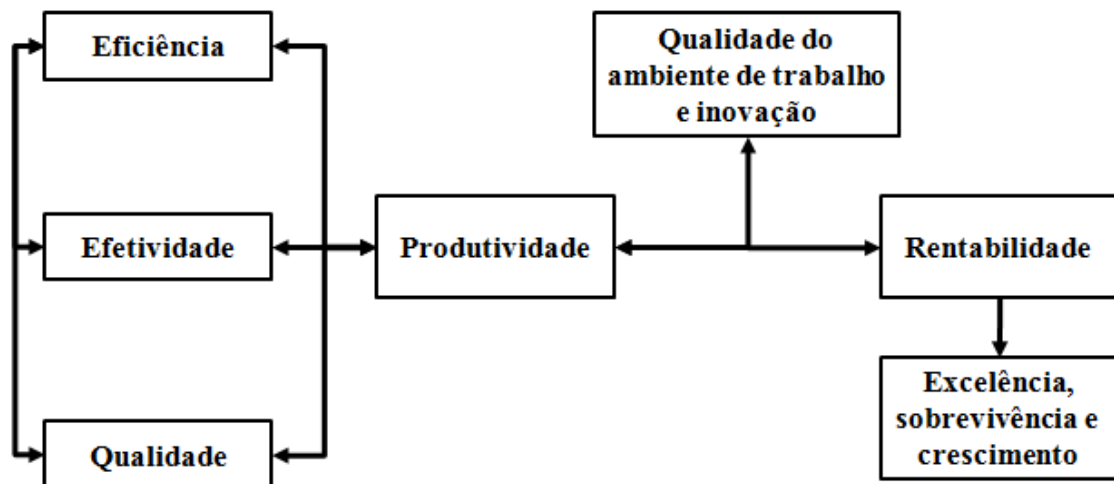


Figura 15 – Dimensões do desempenho, segundo Sink e Tuttle (1989, adaptado de ANDERSEN; FAGERHAUG, 2002)

A partir de uma extensiva revisão da literatura, voltada à identificação do estado da arte sobre medição de desempenho, Nudurupati *et al.* (2011), baseado no trabalho de Neely *et al.* (1995), definiu medição de desempenho como o "[...] processo de quantificação da efetividade e eficiência das ações". Um sistema de medição de desempenho foi definido pelos mesmos autores como um conjunto de medidas usadas para quantificar a efetividade e eficiência destas ações. Em uma perspectiva corporativa, efetividade é entendida como o nível de serviço atingido em relação às necessidades dos consumidores, enquanto eficiência se refere ao uso econômico dos recursos da companhia para fornecer determinado nível de satisfação a esses consumidores (Neely *et al.*, 2005).

Tendo em vista o panorama geral dos sistemas de abastecimento de água no Brasil, em grande parte públicos e dispostos em ambiente sem competição, identifica-se uma barreira inicial referente à análise e melhoria de desempenho, uma vez que o setor público²¹, na maioria das vezes, não fornece incentivos para a implantação de programas de melhoria de desempenho (EHRHARDT; JANSON, 2010; PERARD, 2010²² *apud* ARARAL, 2010). Lundberg *et al.* (2009), referindo-se a sistemas de medição de desempenho ambiental, acrescentam outro agravante a essa barreira, afirmando que faltam ferramentas e métodos de medição de performance desenvolvidos especificamente para a realidade do setor público, uma vez que a maioria destas é direcionada para o contexto corporativo.

²¹ Há controvérsias em relação à maior ou menor propensão de empresas e sistemas públicos serem mais ou menos eficientes que aqueles de propriedade privada. Essa questão foi discutida na nota de rodapé número 1.

²² PERARD, E. Private sector participation and regulatory reform in water supply in the Southern Mediterranean region. **Water Policy**, Londres, v. 12, p. 41-65, 2010 *apud* ARARAL, E. Improving effectiveness and efficiency in the water sector: institutions, infrastructure and indicators. **Water Policy**, Londres, v. 12, p. 1-7, 2010.

Abbott e Cohen (2009) apresentam uma revisão sobre metodologias e respectivas variáveis utilizadas para medição de eficiência e produtividade em SAAs, a partir de 69 trabalhos publicados entre 1978 e 2007. As metodologias mais relevantes identificadas são sumarizadas Tabela 5.

Tabela 5 – Metodologias de análise de eficiência e produtividade utilizadas em SAAs

METODOLOGIA	TRABALHOS ANALISADOS*	EXEMPLOS DE VARIÁVEIS CONSIDERADAS
Análise envoltória de dados	12	Volume distribuído, pessoal, energia, produtos químicos, capacidade de armazenamento, comprimento de tubulações, altura manométrica
Função variável de custo translog	4	Número de conexões, pessoal, volume de água, preço
Função de custo simples	10	Número de conexões, pessoal, custo de tratamento, área geográfica coberta, volume distribuído, energia
Função de custo estocástica	3	Volume de água vendido, energia, serviços ambientais, pessoal
Fronteira estocástica de custo	4	Volume de água distribuído, energia, pessoal, comprimento de tubulações
Função de custo multi-produto translog	5	Volumes vendidos no atacado e varejo, pessoal, energia, materiais, comprimento de tubulações, capacidade de bombeamento, perdas de água
Função de custo multi-produto	4	Custos de produção e operação, volumes disponibilizados, comprimento da rede

Fonte: adaptado de Abbott e Cohen (2009)

* Alguns trabalhos utilizam mais de uma metodologia simultaneamente.

2.6 INDICADORES DE EFICIÊNCIA, DESEMPENHO OU PERFORMANCE

Antes de se abordar a questão dos indicadores de eficiência e desempenho, faz-se necessária a definição de alguns conceitos a partir dos quais tais indicadores são estabelecidos, de forma a permitir melhor entendimento do conceito e evitar inconsistências conceituais. São esses: indicadores, índices, eficiência, rendimento e desempenho.

A definição de indicador, segundo Franceschini *et al.* (2006), está intimamente ligada à noção de *representation-target* (representação-alvo), que é “[...] a operação destinada a tornar um contexto, ou parte dele, tangível, a fim de realizar avaliações, fazer comparações, formular previsões, tomar decisões, etc.”. Indicadores (ou conjuntos de indicadores) seriam, então, ferramentas que operacionalizam o conceito de representação-alvo para um contexto específico (FRANCESCHINI *et al.*, 2006²³ *apud* CECCONI *et al.*, 2007).

²³ FRANCESCHINI, M.; GALETTO, M.; MAISANO, D.; VITICCHIÈ, L. The condition of uniqueness in manufacturing process representation by performance/quality indicators. **Quality and Reliability Engineering**

Obter uma definição consolidada de indicador não é uma tarefa simples, uma vez que este pode ser aplicado a diversos contextos. Algumas definições fornecidas por Perroto *et al.* (2008), citando outros autores, são sumarizadas a seguir:

- “Medida do comportamento de um sistema em termos de atributos significativos e perceptivos.” (BAKKES *et al.*, 1994²⁴ *apud* PERROTO *et al.*, 2008);
- “Variável que descreve um sistema, no qual a variável é uma representação operacional de um atributo do sistema e que representa uma imagem do atributo definida em termos de um processo específico de medição e observação.” (WALZ, 2000²⁵ *apud* PERROTO *et al.*, 2008).

Para Franceschini *et al.* (2007), indicadores são ferramentas de representação de sistemas complexos, que permitem a coleta de informações e sua análise, visando à análise da evolução do sistema. Não há uma distinção clara entre os conceitos de indicador e índice (PERROTO *et al.*, 2008; SICHE *et al.*, 2007), sendo encontrados, inclusive na literatura científica, casos em que ambos são utilizados como sinônimos.

Shields *et al.* (2002) e Siche *et al.* (2007) apresentaram uma abordagem hierárquica para distinguir índices de indicadores, baseada no nível de processamento de dados brutos para a geração de informações. Nessa escala hierárquica, índices ocupam a posição mais elevada, com informações prontas para a comunicação – portanto, mais simples. Já os indicadores apresentam informações mais complexas, obtidas através de dados brutos e sistemas de medição. Nesse sentido, índice é “[...] o valor agregado final de todo um procedimento de cálculo [...]” (SICHE *et al.*, 2007), que pode ser gerado a partir de indicadores ou conjuntos destes (KHANNA, 2000). Shields *et al.* (2002) resumem na Figura 16 as relações entre índices e indicadores, e sugerem o nível ideal de utilização destes em função do público-alvo.

O termo eficiência remete ao melhor uso de recursos (matérias primas, capital, mão-de-obra, energia, água, dentre outros) definindo a relação entre o desempenho de um processo e

International, Malden, v. 22, p. 567-580, 2006 *apud* CECCONI, P.; FRANCESCHINI, F.; GALETTO, M. The conceptual link between measurements, evaluations, preferences and indicators, according to the representational theory. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 179, p. 174-185, 2007.

²⁴ BAKKES, J. A.; VAN DEN BORN, G. J.; HELDER, J. C.; SWART, R. J. HOPE, C.W. **An overview of environmental indicators: State of the art**. Nairobi: UNEP, 1994 *apud* PERROTTO, E.; CANZIANI, R.; MARCHESI, R.; BUTELLI, P. Environmental performance, indicators and measurement uncertainty in EMS context: a case study. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 16, p. 517-530, 2008.

²⁵ WALZ, R. Development of environmental indicators system: Experience from Germany. **Environmental Management**, [S.l.], v. 25, p. 613-623, 2000 *apud* PERROTTO, E.; CANZIANI, R.; MARCHESI, R.; BUTELLI, P. Environmental performance, indicators and measurement uncertainty in EMS context: a case study. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 16, p. 517-530, 2008.

os recursos por ele utilizados (FRANCESCHINI *et al.*, 2007). Segundo uma visão empresarial, Neely *et al.* (2005) definiram eficiência como uma medida de como, economicamente, os recursos de uma empresa são utilizados para fornecer determinado nível de satisfação a seus consumidores. Geralmente, a eficiência é expressa pela relação entre um efeito (ou produto) útil desejado (*output*) e a quantidade do recurso necessária para sua produção (*input*) (HU *et al.*, 2006; CASTRO *et al.*, 2007; ABBOTT; COHEN, 2009; PRABHAKAR; ELDER, 2009; BIAN; YANG, 2010). Expressa dessa forma, a eficiência é análoga à produtividade, na sua definição clássica, estendida a unidades além das monetárias.

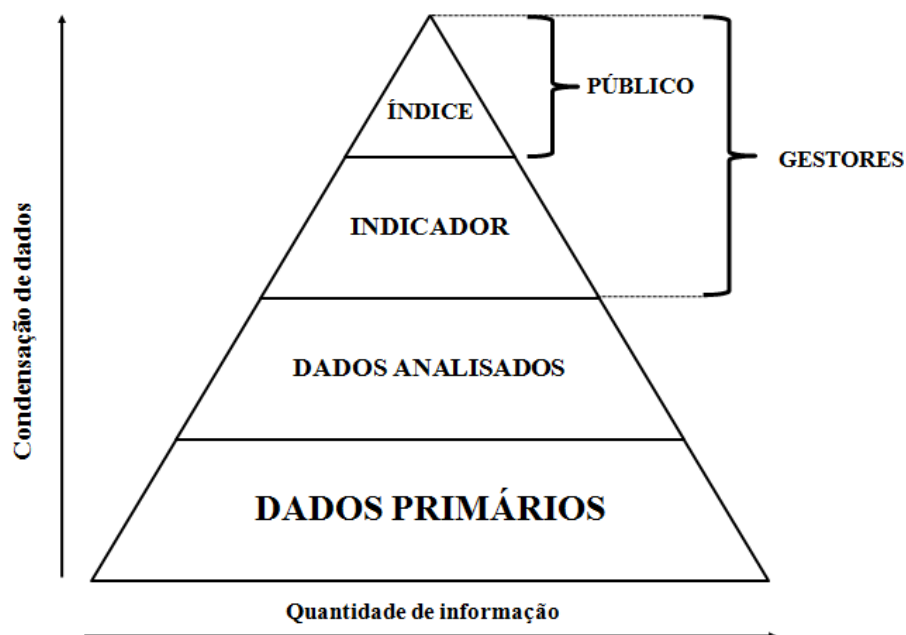


Figura 16 - Relação entre índices e indicadores, e público alvo (adaptado de Shields *et al.*, 2002)

Bases teóricas para a formalização de técnicas de medição de eficiência através de relações entre insumos e produtos foram propostas originalmente por Debreu (1951), Farrel (1957) e Koopmans (1965). A generalização das propostas de Farrel (1957) para aplicações com múltiplos insumos e produtos, desenvolvida por Charnes, Cooper, e Rhodes (1978), deu origem ao método denominado análise envoltória de dados (DEA). A DEA é utilizada nesta pesquisa para a proposição de um indicador e metas de redução de perdas de água, sendo descrita em detalhes no apêndice G.

No contexto da engenharia, principalmente no que se refere a análises energéticas e hidráulicas, eficiência e rendimento podem ser considerados sinônimos; em termos práticos, percebe-se uma utilização mais frequente do termo “rendimento” quando se deseja expressar a eficiência de máquinas, sistemas energéticos e termodinâmicos.

Peña (2008) classifica a eficiência em técnica e econômica. A eficiência técnica corresponde à maximização da produção mantendo-se a taxa de utilização de insumos, ou a minimização do uso de insumos mantendo-se a taxa de produção. A eficiência econômica, que depende da técnica, refere-se ao menor custo monetário possível para gerar determinado produto, ou à maior produção atingível com o mesmo nível de investimento (PEÑA, 2008).

Todas as organizações ou empresas possuem metas, variáveis de acordo com o setor produtivo no qual estas se inserem. Para assegurar o sucesso contínuo, uma organização deve monitorar seu desempenho em relação ao cumprimento destas metas (POPOVA; SHARPANSKYKH, 2010). Estabelecendo-se ligações entre indicadores de desempenho e metas, mecanismos de medição de desempenho podem ser implantados, permitindo identificar pontos falhos e tomar decisões visando atingir os objetivos organizacionais.

As definições de Cave²⁶ *et al.* (1997 *apud* BARNETSON; CUTRIGHT, 2000) fornecem uma visão inicial sobre a composição de indicadores de performance: indicadores são simples (descrições neutras) e gerais (dados não relacionados a metas), enquanto o desempenho atribui ao indicador um ponto de referência ou meta ao qual este é comparado. Essa meta de eficiência atribuída a um indicador é denominada valor-alvo, devendo ser estabelecida e avaliada com base em prazos exequíveis (ANDERSEN; FAGERHAUG, 2002).

Indicadores de desempenho são apresentados por Popova e Sharpanskykh (2010) como indicadores quantitativos ou qualitativos, que refletem o estado e o progresso de uma companhia, unidade ou indivíduo, enquanto Alegre *et al.* (2004) define indicador de desempenho como “[...] uma medida quantitativa de um aspecto particular do desempenho da entidade gestora ou do seu nível de serviço”. Os mesmos autores qualificam tais indicadores como instrumentos de auxílio ao monitoramento da eficiência da entidade gestora, tornando mais simples análises que, de outra maneira, seriam complexas e subjetivas.

Parmenter (2007) sugere três tipos de medida de performance:

- Indicadores-chaves de resultado (*key result indicators – KRIs*): informam o que foi feito em relação a uma perspectiva;
- Indicadores de desempenho (*performance indicators – PIs*): informam o que deve ser feito;
- Indicadores-chave de desempenho (*key performance indicators – KPIs*): informam o

²⁶ CAVE, M.; HANNEY, S.; HENKEL, M.; KOGAN, M. **The use of performance indicators in higher education**: The challenges of the quality movement. 3. ed. Londres: Jessica Kingsely, 1997 *apud* BARNETSON, B.; CUTRIGHT, M. Performance indicators as conceptual technologies. **Higher Education**, [S. l.], v. 40, p. 277-292, 2000.

que deve ser feito para se obter um aumento drástico no desempenho.

Ainda segundo essa classificação, Parmenter (2007) define indicador-chave de desempenho como “[...] um conjunto de medidas focadas naqueles aspectos organizacionais mais críticos para seu sucesso atual e futuro”. O ponto fundamental para a elaboração de indicadores-chave de desempenho é a definição dos objetivos da organização, que devem ser classificados segundo uma escala de importância (KINGDOM, 1998).

Na presente tese, são propostos indicadores de eficiência associados a valores-meta relacionados à condição energética e ótima de determinados processos envolvidos no abastecimento de água. Nesse sentido, os indicadores propostos assemelham-se ao conceito de indicador-chave de performance, uma vez que definem os níveis de uso de energia e água que conduzem as unidades de análise consideradas ao seu máximo desempenho energético e hidráulico, mantendo-se os níveis de serviço adequados.

Hamilton²⁷ (1996 *apud* MAGALHÃES JÚNIOR *et al.*, 2003) sugere que indicadores devem ser escolhidos, num processo de gestão, com base na sua relevância, condições analíticas (embasamento técnico-científico), mensurabilidade (disponibilidade e custos de dados), qualidade de dados e comparabilidade, enquanto Lambert *et al.* (1999) afirma que a seleção deve se pautar na qualidade do indicador em oferecer a mais racional base técnica para comparações. “O desenvolvimento de indicadores de desempenho é um processo altamente criativo e, normalmente, o resultado final é extremamente adaptado às necessidades específicas da organização.” (ANDERSEN; FAGERHAUG, 2002).

De acordo com Franceschini *et al.* (2007), indicadores possuem três funções básicas:

- Controle: permitem avaliar e controlar o desempenho dos recursos disponíveis;
- Comunicação: permitem demonstrar o desempenho da organização, interna e externamente;
- Melhoria: elucidam falhas entre desempenho e metas, apontando formas adequadas de intervenção e melhoria.

²⁷ HAMILTON, K. Policy-driven indicators for sustainable development. In: MEDITERRANEAN BLUE PLAN ENVIRONMENTAL PERFORMANCE INDICATORS WORKSHOP, 1996, Damasco. **Anais...** Damasco: The World Bank, 1996 *apud* MAGALHÃES JÚNIOR, A. P.; CORDEIRO NETTO, O. M.; NASCIMENTO, N. O. Os indicadores como instrumentos potenciais de gesto das águas no atual contexto legal-institucional do Brasil: Resultados de um painel de especialistas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, p. 49-67, out. 2003.

2.6.1 SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE DESEMPENHO (SMDS)

Nudurupati *et al.* (2011) definiram que o período entre 1994 e 1996 pode ser considerado revolucionário em termos de produção científica sobre medição de desempenho, durante o qual foram identificadas mais de 3.600 publicações sobre o tema nesse período. Nesse período, a visão financeira de eficiência (referente ao desempenho passado da organização), sobretudo utilizada por empresas do ocidente, foi transcendida pela agregação de componentes voltados ao planejamento estratégico e visão de futuro, como a satisfação de clientes, processos internos, aprendizado e crescimento.

Segundo Tezza *et al.* (2010), a transição da abordagem puramente financeira para a não-financeira teve início no ano de 1980. Um exemplo de metodologia clássica, desenvolvida com base nessa nova abordagem, é o *balanced scorecard*²⁸ (BOURGUIGNON *et al.*, 2004). Alguns dos primeiros trabalhos sobre medição de eficiência na indústria da água, desenvolvidos entre as décadas de 1960 e 1970, tinham caráter econométrico e o desempenho era quantificado por meio de funções custo e produção (ABBOTT; COHEN, 2009).

No Brasil, as políticas estabelecidas pelo Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANASA), de 1971, visavam principalmente à sustentabilidade financeira do setor; suas metas de universalização deram origem a um sistema de subsídios cruzados entre diferentes classes de consumidores – grandes consumidores pagavam valores superiores aos dos custos de produção para cobrir os déficits provenientes de consumidores de baixa renda - favorável ao estabelecimento de ineficiências no setor de abastecimento de água nacional (TUPPER; RESENDE, 2004). Walter *et al.* (2009) afirmam que a análise de eficiência, na forma de *benchmarking*, tem sido utilizada no setor de abastecimento de água primordialmente para a definição de políticas e preços.

Segundo Abbott e Cohen (2009), até a década de 1990, o foco da medição de performance em sistemas de abastecimento de água residia na identificação de economias de escala²⁹ e na diferença de desempenho entre sistemas públicos e privados. Nauges e van den

²⁸ O *balanced scorecard* é uma ferramenta de medição de desempenho desenvolvida pelos professores de Harvard Robert Kaplan e David Norton, que traduz a visão e a estratégia de uma unidade de análise em objetivos e medidas de desempenho, em quatro áreas: financeira, cliente, processos internos, aprendizado e crescimento (BOURGUIGNON *et al.*, 2004).

²⁹ Economia de escala é aquela resultante do aumento do tamanho de uma unidade de produção ou distribuição de determinado produto. Esse aumento de tamanho (escala) é responsável pela redução do custo de produção ou distribuição (VINHOLIS; BRANDÃO, 2009). Abbott e Cohen (2009), citando 26 autores, demonstram não haver consenso sobre a existência de economias de escala no setor de abastecimento de água; a heterogeneidade das conclusões destes trabalhos pode ser atribuída à grande diversidade de características apresentadas por SAAs, influenciadas por questões hidráulicas/hidrológicas, topográficas, geográficas, mercadológicas e de regulação, bem como aos segmentos dos sistemas analisados (tratamento, distribuição, dentre outros). Walter *et*

Berg (2008) sugerem que os retornos de escala em serviços de água e esgoto no Brasil são constantes, variando de forma proporcional ao aumento ou diminuição da produção. De forma complementar, Nauges e van den Berg (2008), Abbott e Cohen (2009) e Walter *et al.* (2009) apresentaram trabalhos confirmando a existência de economias de escopo³⁰ no setor de abastecimento de água, sobretudo no fornecimento conjunto de serviços de água e esgoto, condição típica da maioria dos SAAs brasileiros; além disso, empresas que operam conjuntamente a produção/tratamento e a distribuição de água tendem a apresentar economias de escopo no tocante à redução das perdas de água nas redes.

Uma terceira categoria de economia abordada por Nauges e van den Berg (2008) e Walter *et al.* (2009) é a de densidade, que pode ser de produção (redução dos custos mediante aumento dos volumes de água produzidos e/ou de esgoto tratado, mantendo constantes o número de conexões e comprimento da rede) ou de consumidores (considera as economias provenientes do aumento simultâneo do volume produzido/tratado e do número de ligações/consumidores).

A análise de economias de densidade de consumidores é importante em países com déficit de fornecimento de serviços de saneamento, nos quais existe um grande contingente populacional a ser contemplado com estes serviços, paralelamente ao crescimento econômico. A literatura (NAUGES; VAN DEN BERG, 2008; WALTER *et al.*, 2009; BYRNES *et al.*, 2010) sugere que economias de densidade ocorrem em grande parte dos SAAs mundiais, apesar de casos estudados no Brasil por Nauges e van den Berg (2008) demonstrarem o oposto, no que se refere a economia de densidade de consumidores. Através de um estudo de caso, Fillion (2008) indica que uma redução de 10% no consumo energético *per capita* em SAAs (incluindo a energia consumida para fabricar e reparar tubulações, bombear água e instalar adutoras) pode ser atingida ao se aumentar a densidade populacional de 10 habitantes.ha⁻¹ para 275 habitantes.ha⁻¹. Tezza *et al.* (2010) apresentaram uma proposta de classificação de SMDs, a partir da qual estes são avaliados em cinco critérios (categorias) e enquadrados em subcategorias para cada critério, conforme Tabela 6.

A medição de desempenho realiza funções que extrapolam a quantificação da produtividade e lucro. Folan e Browne (2005) recomendam, inclusive, que a conexão entre contabilidade e medição de desempenho seja eliminada durante o projeto e desenvolvimento de sistemas de medição de desempenho. Informações sobre o desempenho de uma empresa ou

al. (2009) corrobora com essa conclusão, afirmando haver evidências da presença de economias de escala no setor, porém, variáveis em função das características dos sistemas analisados.

³⁰ Economia de escopo é aquela obtida pela combinação de processos para produção simultânea de mais de um produto (ABBOTT; COHEN, 2009).

sistema devem ser integradas, dinâmicas, acessíveis e visíveis, de forma a subsidiar a rápida tomada de decisões, promovendo um gerenciamento proativo (NUDURUPATI *et al.*, 2011). O dinamismo citado se refere à capacidade do SMD acompanhar a evolução do ambiente externo e interno da empresa; no mesmo sentido, o SMD será integrado à medida que for capaz de gerenciar e produzir dados, manter e reportar resultados.

Tabela 6 – Critérios de classificação de SMDs

CRITÉRIO (CATEGORIA)	SUBCATEGORIA	DESCRIÇÃO E ASPECTOS CONSIDERADOS
Abrangência	Coorporativo	Estrutura geral da empresa/sistema, produção e trabalho.
	Cadeia de suprimentos	Relacionamento da empresa/sistema com outra(o)s integrantes de sua cadeia de produção (fornecedores, consumidores, dentre outros).
	Serviços	Voltado para o setor terciário.
	Indivíduo	Recursos humanos, evolução profissional, dentre outros.
Abordagem	Teórico	Estudos puramente teóricos.
	Prático	Possuem componentes experimentais para validação conceitual.
Foco	Financeiro	Considera medidas puramente financeiras na análise de eficiência.
	Não-financeiro	Inclui fatores como qualidade, produtividade, inovação.
Nível de medição	Operacional	Oferecem respostas imediatas ao comportamento diário do sistema.
	Tático	Monitoramento da evolução do desempenho e tomada de decisões sobre a operação do sistema
	Estratégico	Voltado ao alcance de objetivos – visão futura -, geralmente a longo prazo.
Grau de complexidade	Baixo	Proporcional ao uso de recursos, necessidade de mão-de-obra, generalidade e tecnologias empregadas no SMD.
	Médio	
	Alto	

Fonte: adaptado de Tezza *et al.* (2010).

Uma ferramenta voltada à avaliação da evolução temporal da eficiência e desempenho, comumente associada à análise envoltória de dados, e apresenta na literatura empírica no contexto da eficiência energética e sistemas de abastecimento de água, é o Índice de Malmquist. Exemplos de autores que consideraram este índice nos contextos de abastecimento de água e energia são Marques e Silva (2006), Wei *et al.* (2007) e Corton e Berg (2009). Andersen e Fagerhaug (2002) apresentam um sumário dos principais objetivos da medição de performance:

- Suporte à tomada de decisões: apesar dos sistemas de medição de performance utilizarem dados que representam a situação da organização, a análise destes dados é voltada ao planejamento estratégico, com vistas à criação de ambientes futuros mais

eficientes; com base nessa característica, os sistemas de medição de performance permitem planejar ações com base numa interpretação das tendências e previsões sobre o meio/mercado no qual a organização se insere;

- Alteração de comportamento e aumento da motivação: na medida em que permite a exposição embasada do desempenho da empresa, um sistema de medição de performance fornece subsídios para a implantação de objetivos de melhoria e gratificação de funcionários mediante aumento da performance;
- Acompanhamento de tendências de desempenho: uma análise temporal da evolução da performance permite estabelecer relações de causa e efeito mais reais, bem como acompanhar os resultados de medidas de otimização implementadas;
- Priorização e ações: um SMD consistente permite inferir a sensibilidade do desempenho organizacional a diversas medidas de melhoria viáveis, e com isso, elaborar listas de prioridade de implantação;
- Verificação: SMDs fornecem ferramentas para verificar a efetividade de medidas de otimização já implementadas;
- *Marketing*: indicadores e índices de desempenho podem ser utilizados em ações de *marketing* e divulgação de organizações;
- Auxílio a processos de *benchmarking*: o desempenho interno de uma organização pode ser comparado ao de outras empresas, extrapolando a fronteira de medição de desempenho para o mercado como um todo. Dessa forma, políticas e planos de melhoria de desempenho podem buscar, também, o alcance de posições de destaque no cenário competitivo.

Attadia e Martins (2003) destacam a importância dos SMDs como ferramenta de suporte para o processo de melhoria contínua³¹ e para gestão de qualidade, de acordo com as normas da série ISO 9000. A Tabela 7 sumariza as principais características e condições necessárias para a efetividade e sucesso de SMDs, sugeridas por diversos autores.

Folan e Browne (2005) acrescentam aos fatores de sucesso de um SMD a necessidade destes possuírem escopos processuais e estruturais bem definidas, como será abordado a seguir. No que se refere aos indicadores utilizados em um SMD, Francechini *et al.* (2007) descrevem algumas características fundamentais, conforme Tabela 8.

³¹ Melhoria contínua pode ser definida como o processo de inovação gradual, focado e contínuo, que envolve a organização como um todo, no qual são utilizadas ações de pequena magnitude e alta frequência que, no seu conjunto, resultam em significativa melhoria de desempenho da empresa (ATTADIA; MARTINS, 2003; GONZALEZ; MARTINS, 2007).

Tabela 7 – Características e condições necessárias à efetividade de SMDs

Autores	Características e condições necessárias à efetividade de um SMD
American Water Works Association Research Foundation (AWWARF, 1996)	• Possuir um conjunto de indicadores de performance que capturem a maioria ou todas as características fundamentais do processo em questão; • Deve haver o entendimento dos fatores explanatórios, que não podem ser controlados pelo gestor do sistema, mas que influenciam seu desempenho de forma direta; • Geração de dados internos, precisos, consistentes e temporais, que quantifiquem todos os fatores que influenciam o processo e, ao mesmo tempo, permitam a identificação de tendências em sua variabilidade; • Existência de dados externos que permitam comparar o desempenho da organização o de outras semelhantes; • Disponibilidade de técnicas para análise dos dados.
Helland e Adamson (1999)	Indicadores de desempenho deve incluir descrições de tendência em períodos de cinco a 10 anos para o monitoramento da evolução da companhia.
Bourne <i>et al.</i> (2002)	O autor elenca quatro fatores chave ao sucesso da implantação de projetos de medição de desempenho: a magnitude dos esforços necessários à implantação, a facilidade de acesso a dados através de sistemas de tecnologia da informação, as consequências (resultados da medição de desempenho e da influência da empresa matriz sobre o projeto).
Andersen e Fagerhaug (2002)	Os autores relacionam o sucesso de SMDs aos seguintes fatores: • Estar diretamente atrelado à estratégia da empresa/sistema, de forma a criar sinergia entre a medição de performance e o planejamento do sistema; • Considerar todas as variáveis necessárias para a definição do desempenho do sistema; • Utilizar, inicialmente, medidas não-monetárias³²; • Permitir adaptações de acordo com os vários componentes do sistema a serem analisados; • Ser constantemente atualizado; • Ser simples e de fácil utilização; • Disponibilizar informações de forma rápida aos gerenciadores e operadores do sistema; • Ser preciso e consistente, resultando em erros dentro de faixas aceitáveis; • Ser voltado à implantação de melhorias, ao invés de simplesmente diagnosticar a situação do sistema; • Ser capaz de explicar a diferença entre o desempenho atual e o desempenho desejável, permitindo localizar as causas de ineficiências; • Fornecer informações suficientemente detalhadas para a identificação dos locais/componentes nos quais ações de melhoria devem ser implementadas; • Atribuir responsabilidades por maus ou bons resultados, evitando omissão por parte daqueles que devem agir para melhorar o desempenho do sistema.

³² Esta condição é sinérgica à visão do autor da tese, tendo em vista que a condição ótima de um SAA, sob o ponto de vista econômico, pode não convergir para o ótimo técnico – maior eficiência hidráulica e energética. Dessa forma, a consideração de medidas monetárias pode inibir a determinação do ótimo técnico.

Tabela 7 – Características e condições necessárias à efetividade de SMDs (continuação)

Autores	Características e condições necessárias à efetividade de um SMD
Folan e Browne (2005)	As mais relevantes recomendações destes autores para o projeto e desenvolvendo de SMDs efetivos são: • Devem-se basear nos objetivos estratégicos da empresa e em múltiplos critérios (atividades críticas); • Metas específicas devem ser estabelecidas, e revisadas quando atingidas; • As medições devem ser de fácil compreensão para aqueles que estão sendo avaliados; • A coleta de dados deve ser feita, sempre que possível, pelos responsáveis pela medição de desempenho; • Gráficos devem ser a forma primária de divulgação de dados de desempenho; • Dados devem estar constantemente disponíveis para revisão; • O desempenho deve ser divulgado periodicamente; • Ênfase deve ser dada à evolução, melhoria contínua e dinâmica de aprendizagem na concepção do sistema de medição de performance; • A medição de desempenho deve ser compatível e fornecer suporte para o alcance de metas, objetivos, fatores críticos de sucesso e programas da empresa; • Devem transmitir informações através do menor e mais simples conjunto de medidas possível; • O sistema deve ser composto por critérios bem definidos e mensuráveis para a organização; • Devem-se estabelecer rotinas que possibilitem a realização de medições; • Devem permitir que os gestores visualizem o desempenho de diversas áreas; • Devem ser facilitadores de processos de auditoria.

Tabela 8 – Características fundamentais de indicadores inseridos em SMD

Categoria	Propriedades	Descrição resumida
Propriedades gerais	Consistência com a representação-alvo	O indicador deve representar adequadamente a representação alvo
	Nível de detalhamento	O indicador não deve fornecer informações além daquelas requeridas
	Não ser contra-produtivo	O indicador não deve incentivar ações contra-produtivas
	Impacto econômico	Cada indicador deve ser definido considerando o custo de coleta das informações necessárias
	Simplicidade de uso	O indicador deve ser fácil de entender e usar
Propriedades de conjuntos de indicadores ou indicadores derivados	Exaustividade	Indicadores devem representar de forma apropriada todas as dimensões do sistema, sem omissões
	Não redundância	O conjunto de indicadores não deve incluir indicadores redundantes
	Monotonia	Ou aumento ou redução de um dos indicadores agregados deve ser associado a um aumento ou redução correspondente nos indicadores derivados
	Compensação	Mudanças de indicadores agregados diferentes devem compensar uns aos outros, sem alterar os indicadores derivados
Propriedades acessórias	Metas de longo prazo	Indicadores devem encorajar o alcance de metas de processo de longo prazo
	Impacto sobre os tomadores de decisão	Para cada indicador, deve-se verificar cuidadosamente seu impacto sobre os tomadores de decisão.

Fonte: adaptado de Franceschini *et al.* (2007).

Há duas abordagens para o projeto de um sistema de medição de desempenho: abordagem *top-down* em cascata e a abordagem *bottom-up* (ANDERSEN; FAGERHAUG, 2002). A abordagem *top-down* em cascata assume que gestores posicionados em um nível hierárquico superior possuem uma melhor visão estratégica do sistema, relacionada aos objetivos desejáveis e aos aspectos do desempenho a serem medidos. Com isso, a abordagem implica na definição de indicadores de desempenho de alto nível que, posteriormente, são detalhados em cascata, através dos níveis hierárquicos inferiores do sistema/organização.

Considerando a pirâmide da informação ilustrada na Figura 16, o desenvolvimento de um sistema de indicadores de desempenho *top-down* teria início no estabelecimento de índices, por parte do alto escalão da empresa, que passariam a ser alimentados por informações provenientes de indicadores e medições oriundas de pessoal de setores mais operacionais. Tais índices seriam responsáveis pela conversão das metas de eficiência do sistema em valores numéricos, passíveis de medição e comparação, conforme indicam Rogers e Louis (2009), compatível com o conceito de representação-alvo (FRANCESCHINI *et al.*, 2006). Devido à delimitação da presente pesquisa (medição de desempenho em termos hidráulicos e energéticos) e à proporcionalidade direta entre consumo/conservação de água e energia elétrica em SAAs (relações não conflitantes), pode-se considerar que os objetivos de eficiência constituintes do modelo proposto são discretas e conhecidas (aumento, simultâneo, da eficiência de uso da água e da energia elétrica), eliminando a subjetividade que a tradução das metas de eficiência definidas pelos tomadores de decisão pode acarretar.

Em oposição ao sistema *top-down*, apesar de muitas vezes complementá-lo, tem-se a abordagem *bottom-up*, na qual indicadores de desempenho são propostos em instâncias hierárquicas inferiores, refletindo a visão dos funcionários em relação à performance, o que implicitamente produz um efeito psicológico de estímulo à eficiência em todos os níveis. Esta abordagem possui o inconveniente de a visão dos funcionários nem sempre estar alinhada às metas e estratégias vislumbradas pela direção do sistema/empresa. A literatura indica que uma abordagem mista, mesclando aspectos da abordagem *top-down* and *bottom-up*, é benéfica.

Andersen e Fagerhaug (2002) agrupam a medição de performance nas seguintes classes:

- Rígida (*hard*) ou flexível (*soft*);
- Financeira ou não financeira;
- De resultados ou de processos;
- Propósito (resultado, diagnóstico e competência);

- Eficiência, efetividade e mutabilidade.

As medidas rígidas e flexíveis se referem à possibilidade de medição direta da performance, sendo também denominadas, respectivamente, medidas quantitativas e qualitativas (ANDERSEN; FAGERHAUG, 2002). Medidas rígidas são objetivas, hierárquicas e com exatidão conhecida, enquanto as medidas flexíveis podem ser tendenciosas de acordo com o observador, sendo, de certa maneira, associadas a análises subjetivas/abstratas. Apesar disso, medições flexíveis são úteis para a análise de componentes de desempenho que não podem ser quantificados, ou nos quais a expressão numérica pode mascarar resultados. Nemetz (1990³³), Van Der Stede *et al.* (2006³⁴ *apud* NUDURUPATI *et al.*, 2011), confirmam que a mescla entre medições quantitativas (objetivas) e qualitativas (subjetivas), em geral, é necessária para a completa expressão da eficiência em um sistema, proporcionando resultados mais confiáveis.

Medições financeiras e não financeiras são aquelas que consideram ou não valores monetários na quantificação da eficiência (ANDERSEN; FAGERHAUG, 2002; TEZZA *et al.*, 2010). Por outro lado, Andersen e Fagerhaug (2002) afirmam que as medidas de resultado e de processo refletem as culturas gerenciais ocidentais e orientais. No ocidente, o foco gerencial está nos resultados alcançados, sendo os SMDs direcionados à quantificação destes resultados quando desenvolvidos sob essa ótica; por outro lado, no oriente, importância maior é dada ao processo envolvido na construção dos resultados. As duas abordagens não são excludentes, podendo ser utilizadas em paralelo.

A classificação de um SMD/indicador quanto ao seu propósito está relacionada ao horizonte de análise considerado. Medidas de resultado indicam o que foi alcançado pela empresa/sistema até o momento, sem considerar a maneira como este resultado foi alcançado. A medição na forma de diagnóstico analisa a situação atual do sistema, permitindo vislumbrar futuros resultados; permite a proposição de ações para melhoria dos processos. Medir a competência, por sua vez, significa avaliar o quão preparado a empresa/sistema está para solucionar desafios futuros.

³³ NEMETZ, P. L. Bridging the strategic outcome measurement gap in manufacturing organizations. In: ETTLIE, J. E.; BURSTEIN, M. C.; FIEGENBAUM, A. **Manufacturing strategy: The research agenda for the next decade**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1990. p. 63-74 *apud* NUDURUPATI, S. S.; BITITCI, U. S.; KUMAR, V.; CHAN, F.T.S. State of the art literature review on performance measurement. **Computer & Industrial Engineering**, Amsterdam, v. 60, n. 2, p. 279-290, 2011.

³⁴ VAN DER STEDE, W. A.; CHOW, C. W.; LIN, T. W. Strategy, choice of performance measures, and performance. **Behavioral Research in Accounting**, [S. l.], v. 18, p. 185-205, 2006 *apud* NUDURUPATI, S. S.; BITITCI, U. S.; KUMAR, V.; CHAN, F.T.S. State of the art literature review on performance measurement. **Computer & Industrial Engineering**, Amsterdam, v. 60, n. 2, p. 279-290, 2011.

Water Association (IWA) e da *The International Benchmarking Network for Water and Sanitation Utilities* (IBNET), dada sua relevância no contexto nacional e mundial.

2.6.1.1 O caso dos indicadores de performance para perdas reais de água

Lambert *et al.* (1999) apresenta em seu trabalho uma revisão sobre os métodos clássicos de geração de indicadores de desempenho para perdas de água reais, destacando a importância de se considerarem fatores chave de cada sistema (no caso, densidade de ligações, distância dos micromedidores até a ligação e pressões nas redes) no cálculo dos indicadores. Os autores fazem uma crítica à abordagem termodinâmica de eficiência (relação entre *inputs* e *outputs*), quando aplicada ao caso das perdas de água, uma vez que o nível de consumo (*input*) irá mascarar o índice percentual de perdas.

Para exemplificar tal crítica, podem-se considerar duas redes de distribuição hipotéticas, fisicamente idênticas (com mesmos níveis de pressão, traçado e comprimento das redes, e número de ligações e/ou habitantes) e mesma taxa de perdas de água por ligação – por exemplo, 50 litros/ligação.dia. Considerando que cada uma das redes abasteça um tipo diferente de público – por exemplo, um bairro de classe alta com consumo de 300 litros/ligação.dia e um bairro de classe baixa com consumo de 100 litros/ligação dia –, o índice clássico de perdas irá variar de 17% a 50%.

A proposta de Lambert *et al.* (1999) para o aperfeiçoamento dos indicadores de performance para perdas de água reais consiste na adoção de um índice de vazamentos infraestrutural (IVI), composto por dois indicadores conforme a equação (2).

$$IVI = \frac{ITPR}{PRAI} \quad (2)$$

sendo:

- IVI índice de vazamentos infraestruturais [%];
- ITPR indicador técnico de perdas reais [L.(ligação.dia)⁻¹];
- PRAI perdas reais anuais inevitáveis [L.(ligação.dia)⁻¹].

O ITPR corresponde ao indicador clássico de perdas de água, considerando o sistema pressurizado³⁵. Já o PRAI agrega ao IVI a componente da performance – comparação com

³⁵ No artigo, os autores citam a influência da operação do sistema sobre o índice de perdas, uma vez que estes podem operar de forma contínua – pressurizada – ou intermitente.

um valor ótimo ou desejável – , sendo definido como o índice de perdas reais, para qualquer sistema específico, cuja infra-estrutura se encontra em boas condições, no estado da arte em termos de controle ativo de perdas³⁶, e no qual todos os vazamentos ou rompimentos detectáveis são suprimidos rápida e efetivamente (LAMBERT *et al.*, 1999).

2.6.1.2 Os indicadores DRIVA-PI da Escandinávia

Em 1995, um grupo de cinco grandes cidades da Escandinávia (Copenhague, Oslo, Helsinki, Estocolmo, Gotemburgo e Malmo) desenvolveu um conjunto de indicadores denominado DRIVA-PI, baseados no modelo de gestão de sistemas de abastecimento de água da *Swedish Water and Wastewater Association* (HELLAND; ADAMSSON, 1999). O DRIVA-PI foi idealizado como um sistema de indicadores de desempenho que permitisse a comparação entre as cidades.

Exemplos de indicadores do modelo são: número de empregados por consumidores, consumo energético por consumidores, número de vazamentos por 100 km de rede, dentre outros.

Uma análise criteriosa demonstra que o DRIVA-PI é um exemplo de uso da terminologia “indicador de desempenho” para medição de eficiência relativa, sem a quantificação da condição ótima de cada sistema e sem a definição de valores-alvo.

2.6.1.3 Associação entre indicadores de performance e *benchmarking*

O *benchmarking* é uma metodologia voltada ao incremento do desempenho de processos em organizações, através do uso de experiências adquiridas em organizações e processos semelhantes. É uma forma de se identificar a lacuna entre o nível de performance atual e o possível, e se fazer mudanças para atingir o mais alto padrão de desempenho (MALANO *et al.*, 2004). Para Stapenhurst (2009), o *benchmarking* é um método de medição e melhoria da performance organizacional através da comparação de seu desempenho com o que há de melhor no mesmo ramo de atividade.

Há dois tipos de *benchmarking* (KINGDOM, 1998):

³⁶ Segundo Moraes *et al.* (2010), o controle ativo de perdas (ou vazamentos) consiste em identificar e reparar vazamentos antes que estes se tornem visíveis ou sejam comunicados (quando isso ocorre, têm-se o controle passivo); o principal método utilizado é o geofonamento, técnica baseada na captação e interpretação de ruídos em tubulações através de instrumentos específicos.

- *Benchmarking* métrico: é uma análise quantitativa comparativa que permite às empresas acompanhar sua performance interna ao longo do tempo e compará-la à de empresas semelhantes. Através destas comparações, níveis-meta de performance podem ser definidos;
- *Benchmarking* de processo: envolve a identificação de processos de trabalho específicos a serem melhorados, através de um mapeamento passo-a-passo, e posterior localização de exemplos externos de excelência no mesmo processo para a determinação do padrão a ser atingido.

Em geral, o *benchmarking* métrico é aplicado preliminarmente, fornecendo ao gestor uma indicação de onde estão os pontos falhos. Posteriormente, o *benchmarking* de processo irá informar o que deve ser feito para a melhoria destes pontos.

Kingdom (1998) ressalta a importância de se usar o processo de *benchmarking* métrico com parcimônia, sobretudo em sistemas de abastecimento de água, nos quais o ambiente operacional pode influenciar os valores dos indicadores. Vários fatores explanatórios – como a topografia local e a qualidade da água bruta –, que não podem ser alterados através do gerenciamento do sistema, irão influenciar diretamente os custos de produção e disponibilização.

Várias empresas e órgãos gestores de sistemas de abastecimento de água têm usado o *benchmarking* como ferramenta de análise de performance. A *American Water Works Association Research Foundation* (AWWARF) desenvolveu o projeto *Performance Benchmarking for Water Utilities* (AWWARF, 1996; KINGDOM, 1998; PARENA; SMEETS, 2001), no qual foram elaboradas diversas taxas de performance, além de modelos de custo uni e multivariados, através do *benchmarking* métrico e de processo. Já a *Water Environment Research Foundation* (WERF) coletou informações técnicas e gerenciais de 100 empresas de tratamento de esgoto e resíduos, que foram posteriormente analisados através de modelos multivariados de custo, resultando na publicação *Benchmarking Wastewater Operations – Collection, Treatment and Biosolids Management*.

Parena e Smeets (2001) apresentam um sumário de várias experiências internacionais em *benchmarking* na indústria de água, resumidas a seguir:

- New South Wales, Austrália: o *Benchmarking Syndicate* atuou por sete órgãos do governo municipal, destinado a avaliar os benefícios de um sindicato de *benchmarking* para os conselhos do governo local, na preparação de orientações e recomendações

sobre análise de eficiência;

- Reino Unido: a *Severn Trent Water* elaborou um estudo de *benchmarking* focado em avaliar as melhores oportunidades para maximizar os benefícios provenientes de um orçamento de 4,5 milhões de libras, num período de análise de dez anos e associados a um processo de privatização. O estudo foi direcionado para a aferição da eficiência em gestão de projetos, *know how*, recursos e retorno de investimentos;
- Inglaterra e País de Gales: a OFWAT, agência reguladora de serviços de água, realizou uma avaliação comparativa de eficiência para se determinar os valores das tarifas entre 2000 e 2005. Estudos comparativos internacionais também foram desenvolvidos permitindo a comparação independente de desempenho entre companhias de água privatizadas na Inglaterra e no País de Gales e empresas de Sydney e Perth que operavam sob diferentes regimes regulatórios;
- Holanda: o *New Benchmarking System* (anteriormente denominado COCLUWA) envolveu 85 % dos serviços de água holandeses. Este utilizou indicadores de desempenho para conferir transparência ao setor nos Países Baixos, a partir de uma solicitação governamental, e forneceu informações de gerenciamento para controle e definição dos preços da água;
- Polônia: o Banco Europeu de Reconstrução e Desenvolvimento nomeou o *Water Research Centre* do Reino Unido para realizar um estudo de *benchmarking* focado em investigar os níveis meta e medidas de desempenho em empresas de exploração de água selecionadas na Europa Ocidental, e compará-las com empresas de água e esgoto da Polônia. O estudo forneceu ao Banco dados de referência comparativa como base para determinar a eficiência operacional e desempenho relativo de potenciais mutuários do Banco, e para definir metas de desempenho para os mutuários através de melhores práticas nessa indústria;
- Estados Unidos, *American Water Works Association*: essa associação desenvolveu programa voluntário QualServe, destinado a auxiliar os serviços públicos norte-americanos a atingir os requisitos de qualidade total. Procedimentos de auto-avaliação e *peer review* foram utilizados para examinar 15 áreas de desempenho institucional, e desenvolver uma agenda de possibilidades de melhoria de qualidade, enquanto o *Benchmarking Clearinghouse* fornece informações, serviços e ferramentas específicas para sistemas de água e esgoto;
- Estados Unidos, *Regional Water Utilities Benchmarking Group*: criado no início de

1996 pelo agrupamento de 14 organizações de serviços de água, o grupo pesquisou estruturas e práticas que pudessem tornar o *benchmarking* significativo para si e para empresas outras utilidades. Usando a estrutura de *benchmarking* desenvolvida pelo Centro Americano de Produtividade e Qualidade (APQC), de Houston - Texas, 12 processos de negócio foram descritos para cada concessionária, dados foram coletados, as melhores práticas identificadas, indicadores de desempenho estabelecidos, a comparação feita e práticas documentadas de modo a identificar oportunidades de melhoria para cada um dos componentes ativos dos sistemas de distribuição;

- Itália, Federação Italiana de Serviços Públicos de Água: promovido em 1998, o projeto *Benchmarking* visava analisar o funcionamento dos processos e principais atividades, identificar padrões de referência de desempenho e, possivelmente, definir as melhores práticas. O *Benchmarking Club*, como foi chamada, foi executado por 14 companhias-membro e por um consultor independente para coleta de dados. Os principais resultados do projeto foram a identificação de áreas com maior potencial para a melhoria do desempenho, sugestão de estruturas organizacionais e sistemas de controle mais aptos a superar as limitações de desempenho e a validade do *benchmarking* em impulsionar a rediscussão de papéis, funções e procedimentos operacionais.

2.6.1.4 Indicadores de desempenho contratuais no setor de abastecimento de água e esgoto na República Checa

A União Européia (UE) mantém um Fundo de Coesão e um Fundo Europeu para Desenvolvimento Regional, que subsidiam ações voltadas à expansão de diversos setores estratégicos, sendo o abastecimento de água um dos principais contemplados. Na tentativa de obter recursos dos fundos para melhoria da estrutura de abastecimento de água do país, a República Checa submeteu uma proposta de projeto para análise da Comissão Européia (CE). Durante a revisão da proposta, a UE chegou à conclusão de que os contratos de exploração existentes não continham requisitos de desempenho específicos, o que levou o governo checo a elaborar o documento “Um manual prático de indicadores de desempenho contratuais no sector de abastecimento de água e esgoto na República Checa” (KOHUSOYÁ; SALAJ, 2010).

A CE exigiu que tal documento fosse compreensível não somente para os operadores do sistema, mas também para clientes e público em geral, permitindo que acionistas sem conhecimento técnico aprofundado pudessem acompanhar o desempenho do sistema. Tal

exigência acarreta uma inconsistência conceitual, quando considerada a pirâmide de informação proposta por Shields *et al.* (2002), Figura 16, na qual o produto exigido pela CE seria um conjunto de índices, e não de indicadores. Como o sistema checo de abastecimento de água se baseia no modelo de parcerias público-privadas³⁷, o sistema de medição de desempenho apresentado tinha como um dos principais objetivos estabelecer diretrizes para pagamento de multas pelo prestador, no caso de insuficiência ou problemas na qualidade do fornecimento dos serviços de água e esgoto (KOHUSOYÁ; SALAJ, 2010).

Os valores de referência propostos para o sistema de indicadores de performance se basearam em experiências práticas e na literatura internacional, como a ISO 24510 (ISO, 2007a), ISO 24511 (ISO, 2007b), ISO 24512 (ISO, 2007c) e Alegre *et al.* (2004).

Apesar de utilizar valores de referência no cálculo dos indicadores, nem sempre estes podem ser considerados valores-alvo, uma vez que não consideram as peculiaridades de cada sistema. Um importante quesito presente no manual prático é o monitoramento contínuo do sistema, com divulgação periódica dos resultados, o que implica na criação de uma base de dados importante para a análise e melhoria contínua.

2.6.1.5 O caso de Portugal

No estudo apresentado por Marques e Monteiro (2001), foram propostos 50 indicadores de performance divididos em 5 categorias, apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Categorias e exemplos de indicadores utilizados em Portugal

Categoria	Exemplos de indicadores
Estruturais	Cobertura do abastecimento [%], densidade de consumidores [consumidores/km], capacidade de armazenamento [dias], materiais, diâmetros e idade de tubos, volume por tipo de consumidor [%]
Operacionais	Frequência de leitura de medidores [leituras/ano], água faturada [%], eficiência da rede [m ³ /dia.km], substituição de medidores [%]
Qualidade da água e do serviço	Água desinfetada [%], água tratada [%], número de análises de qualidade [análises/ano], violações de qualidade de água [%]
Recursos humanos	Empregados por atividade [%], qualificação dos empregados [%], empregados por extensão da tubulação [empregados/100 km]
Econômicos	Tarifas médias de água [US\$/m ³], faturamento por tipo de consumidor [%], investimentos por comprimento de tubulação [US\$/km.ano]

Fonte: adaptado de Marques e Monteiro (2001)

³⁷ Parcerias público-privadas são “[...] contratos envolvendo pagamentos sistemáticos do setor público ao parceiro privado em contrapartida à oferta de serviços que, originalmente são ofertados pelo primeiro, devido, por exemplo, aos seus retornos sociais serem superiores aos retornos privados [...]”, tendo sido escolhidas nos últimos anos como uma das principais opções do governo federal e de alguns governos estaduais para elevar a precária oferta de infra-estrutura do Brasil (PEREIRA; FERREIRA, 2008).

2.6.1.6 Indicadores de performance de Quebec, Canadá

Coulibaly e Rodriguez (2004) relatam o processo de desenvolvimento de indicadores de desempenho para pequenos sistemas de abastecimento de água (atendimento máximo a 10.000 pessoas) na província de Quebec, no Canadá. O objetivo do estudo foi desenvolver indicadores capazes de explicar a evolução da qualidade da água distribuída. Tais indicadores foram baseados em características operacionais, infra-estruturais e de manutenção dos sistemas, sendo integrados através de um índice multivariado baseado em pesos.

As análises foram conduzidas considerando cinco grupos de variáveis: uso agrícola da terra, qualidade da água bruta, desinfecção da água infrestrutura e manutenção do sistema de distribuição e qualidade da água distribuída. Cada grupo produziu um sub-indicador de performance, com exceção do grupo “qualidade da água distribuída”. Cada subindicador foi obtido através da média não ponderada de alguns valores representativos para seu cálculo. O método de geração de indicadores apresentado por Coulibaly e Rodriguez (2004) pode ser resumido da seguinte maneira:

- Inicialmente, quatro subindicadores explanatórios (um para cada grupo) foram identificados, e posteriormente calculados para os 10 sistemas analisados;
- Posteriormente, foi calculado um indicador de performance global, para cada grupo, tendo estes sido estratificados em sistemas problemáticos e não-problemáticos, em termos de qualidade de água;
- Finalmente, os indicadores globais de sistemas problemáticos e não problemáticos foram comparados.

Após comparação e análise de resultados dos indicadores, concluiu-se que o sistema de indicadores retratou de forma satisfatória as diferenças de desempenho para os grupos problemáticos e não problemáticos, sendo a desinfecção e manutenção da rede os fatores que mais contribuem com o índice geral de qualidade de água.

2.6.1.7 Indicadores da IWA

A publicação “Indicadores de desempenho para serviços de abastecimento de água” da *International Water Association* (IWA) pode ser considerada a principal referência internacional em termos de medição de performance de SAAs, tendo nesta tese sido

considerada a sua versão em língua portuguesa (Alegre *et al.*, 2004). O sistema engloba seis grupos de indicadores, de base anual, a saber (Alegre *et al.*, 2004): indicadores de recursos hídricos, de recursos humanos, infra-estruturais, operacionais, de qualidade de serviço e econômico-financeiros.

O subgrupo “Bombeamento” do sistema IWA contempla indicadores energéticos, sendo eles (Alegre *et al.*, 2004):

- Ph4 - utilização da capacidade de bombeamento (%);
- Ph5 - Consumo de energia normalizado [kWh.(m³.100 m)⁻¹];
- Ph6 - Consumo de energia reativa [%];
- Ph7 - Recuperação de energia [%].

O subgrupo “Perdas de água” da categoria Indicadores operacionais quantifica as perdas em SAAs com base no balanço hídrico apresentado na seção 2.4.1.1.

2.6.1.8 Indicadores da IBNET

Pode-se destacar, em termos mundiais, a Rede Internacional de *Benchmarking* para Concessionárias de Água e Saneamento, *The International Benchmarking Network for Water and Sanitation Utilities* (IBNET), uma rede voluntária operada pelo Program de Água e Saneamento do Banco Mundial e financiada pelo Departamento para Desenvolvimento Internacional (DFID) do Reino Unido (VAN DEN BERG; DANILENKO, 2010). Os participantes da IBNET incluem companhias de abastecimento de água de diversas partes do mundo. A rede mantém um banco de dados de desempenho, além de definir normas e fornecer ferramentas para *benchmarking* no setor de abastecimento de água.

2.6.1.9 Indicadores do SNIS

O Ministério das Cidades, por meio da Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, mantém o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), que publica, anualmente, o Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto, atualmente em sua décima quinta edição (BRASIL, 2011b). Os prestadores nacionais de serviços de água e esgoto são convidados a fornecer informações sobre seus sistemas, que após analisadas, dão origem a

uma série de indicadores de natureza operacional, econômica, financeira, administrativa, de balanço e qualidade. A última edição do SNIS teve caráter censitário, uma vez que todos os municípios brasileiros foram convidados.

O único indicador operacional do SNIS relacionado diretamente à eficiência energética de SAAs é o índice de consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água (IN058), expresso em kWh.m^{-3} . Há um indicador análogo para sistemas de esgotamento sanitário, além de indicadores econômicos de participação da energia elétrica nas despesas operacionais. Dentre os indicadores operacionais associados à eficiência hídrica, destacam-se: índice de perdas no faturamento, índice de perdas na distribuição, índice bruto de perdas lineares, índice de perdas por ligação.

2.6.1.10 National Water Initiative, Austrália

A Iniciativa Nacional da Água, *The National Water Initiative* (NWI) foi estabelecida em 2004 através de um acordo intergovernamental entre o Governo Australiano e seus Estados e Territórios, para a implantação de reformas no setor de abastecimento de água do País. As reformas buscavam alcançar uma situação ótima do ponto de vista econômico, social e ambiental (AUSTRALIAN GOVERNMENT; NATIONAL WATER COMMISSION, 2011). A medição de desempenho e *benchmarking* das concessionárias ocupou posição proeminente no acordo da NWI, baseados em resultados anuais divulgados publicamente, de acordo com os parágrafos 75 e 76 do acordo (AUSTRALIAN GOVERNMENT; NATIONAL WATER COMMISSION, 2009).

Os resultados da medição de desempenho e *benchmarking* estabelecidos pela NWI são publicados anualmente através do *National Performance Reports* (NPRS). Segundo Worthington (2011), estes relatórios incluem componentes críticos do desempenho (recursos hídricos, saúde, serviço ao consumidor, gestão de ativos, meio ambiente, finanças e preços) de 73 concessionárias de água. Os NPRS são desenvolvidos e apresentados, separadamente, para concessionárias urbanas e rurais. Além de analisar a NWI, Worthington (2011) apresentou um sumário de diversas experiências sobre medição de desempenho e *benchmarking* em concessionárias de água.

2.6.1.11 Estudo empírico no setor de água e esgoto brasileiro

Tupper e Resende (2004) avaliaram a eficiência relativa de 20 companhias estaduais de

água esgoto nacionais, selecionadas com base na disponibilidade de dados na base SNIS, entre 1996 e 2000. A técnica utilizada na análise foi a análise envoltória de dados, com retornos variáveis de escala, tendo como insumos o custo anual de mão de obra pessoal, custos operacionais anuais (energia, produtos químicos, dentre outros) e outros custos operacionais anuais; os produtos considerados, por sua vez, foram os volumes de água diários produzidos, volumes diários de esgoto tratado, população atendida com água, população atendida com tratamento de esgoto. Métodos econométricos foram associados ao modelo para compensar as heterogeneidades regionais de cada sistema, agregando-se indicadores de densidade das redes de água e esgoto, além de perdas de água.

2.6.1.12 Indicadores de desempenho aplicados à avaliação de tecnologias e estratégias para infraestruturas distribuídas de água

Para medir a eficiência de estratégias e tecnologias para implantação de infraestruturas distribuídas de água (englobando abastecimento, tratamento de esgoto e drenagem urbana), num estudo de caso hipotético, Makropoulos e Butler (2010) estabeleceram um conjunto de indicadores de desempenho, listado a seguir:

- economia no consumo total de água;
- economia no consumo de água potável;
- economia no consumo de água não-potável;
- economia na geração de efluentes;
- redução no escoamento superficial devido à precipitação;
- melhora na qualidade do escoamento superficial;
- redução do abastecimento de água externo (incluído aí todos os suprimentos que não se incluem na captação de água de chuva, água subterrânea local e água reciclada);
- redução no uso de energia, também associado à emissão de CO₂ e outros gases estufa;

O último indicador citado demonstra a tendência de análise conjunta de interações hidráulicas e energéticas, conforme proposto na tese. Após o estabelecimento dos indicadores, os autores confrontam os resultados com seus respectivos *benchmarks*, de forma produzindo um painel comparativo de eficiência.

2.6.3 INDICADORES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

As diversas formas de se gerarem índices que expressam a eficiência com a qual a energia é utilizada em determinado sistema são chamadas de medidas de desempenho em eficiência energética (TANAKA, 2008). Para Tanaka (2008), os métodos clássicos para a quantificação da eficiência energética propriamente dita são baseados em indicadores físico-termodinâmicos, sendo eles:

- Eficiência energética térmica de equipamentos: expressa pela relação clássica entre energia consumida e energia útil produzida, aplicável para tecnologias de uso final e conversão de energia. Como exemplo, cita-se a relação de conversão de potência elétrica em potência de eixo em um motor;
- Intensidade do consumo energético (intensidade energética, consumo energético unitário ou específico): o consumo energético é dividido por um valor de produção física, por exemplo, o consumo energético necessário para se bombear um metro cúbico de água em uma estação elevatória (kWh.m^{-3}). Este tipo de indicador não é influenciado por variações econômicas, podendo ser relacionado a processos e operações. Apesar de fornecer uma visão global do uso energético em sistemas de abastecimento de água, a intensidade energética referente ao volume produzido e distribuído não fornece informações sobre como a energia é utilizada no processo, distanciando tal índice da possibilidade de aplicação em processos de auditoria (CABRERA *et al.*, 2010);
- Taxa absoluta de consumo energético: essa abordagem torna-se pouco relevante em termos de análise de eficiência, uma vez que não é associada a taxas de produção; corresponde ao montante global de energia consumida por uma unidade produtiva em determinado período de tempo, sendo um valor absoluto cuja comparação só é possível entre sistemas idênticos, que operem com as mesmas taxas produtivas. Ao se relacionar, por exemplo, a taxa absoluta de consumo energético de um país com o seu produto interno bruto (PIB), obtém-se o respectivo índice de intensidade energética (BRASIL, 2007b);
- Taxa de difusão de equipamentos e tecnologias energeticamente eficientes: mede a taxa de utilização de equipamentos de alta eficiência energética. A porcentagem de motores de alto rendimento em relação ao total de motores de uma planta industrial, e a proporção de lâmpadas econômicas comparadas com a quantidade de lâmpadas

incandescentes, são exemplos deste método, podendo servir de indicadores para projetos de eficiência energética e conservação de energia.

Segundo Bor (2008), os indicadores de eficiência energético físico-termodinâmicos são aqueles associados ao índice de volume de produtos, relacionados, principalmente, à eficiência energética térmica. Patterson (2006), por sua vez, classifica os indicadores de eficiência energética como indicadores termodinâmicos, indicadores físico-termodinâmicos, indicadores econômico-termodinâmicos e indicadores econômicos.

Novas abordagens sobre o tema, segundo Tanaka (2008), incluem indicadores de eficiência energética econômico/termodinâmicos além dos puramente econômicos. Percebe-se haver uma convergência de definições entre os trabalhos de Patterson (1996), Bor (2008) e Tanaka (2008). Patterson (1996) acrescenta que nenhum indicador termodinâmico de eficiência energética, apesar de numericamente consistente, mensura a quantidade de saída (*output*) em termos da adequação do serviço útil entregue. Observação semelhante é feita por Schaumann (2007), para quem o coeficiente termodinâmico de eficiência energética não leva em consideração a qualidade da energia, que poderia ser quantificada pela análise exergética.

A análise da exergia, ou disponibilidade, permite a mensuração da qualidade dos fluxos energéticos, segundo o Ministério de Minas e Energia e a Empresa de Pesquisa Energética (BRASIL, 2007c). De acordo com estas instituições, ao se substituírem balanços energéticos termodinâmicos clássicos por balanços exergéticos, são obtidas informações não somente sobre as perdas no sistema, mas também sobre as irreversibilidades dos seus diversos processos. Com isso, é possível definir quais destes processos possuem maiores potenciais de aumento da capacidade de realização de trabalho.

Indicadores de desempenho foram utilizados por Cabrera *et al.* (2010) para caracterizar o balanço energético de redes de distribuição de água e avaliar sua eficiência energética. Cinco indicadores foram propostos pelos autores:

- Taxa entre energia real inserida no sistema e a mínima energia útil³⁸;
- Taxa entre a energia efetivamente utilizada pelos consumidores no período de simulação;
- Capacidade hidráulica da rede, quociente entre a energia perdida por atrito e a energia fornecida ao sistema;

³⁸ A mínima energia útil corresponde à somatória das energias mínimas requeridas por cada nó, calculadas pelo produto do volume consumido em cada nó durante o tempo considerado pela mínima carga hidráulica requerida (somatório da carga potencial de cada nó e sua menor carga piezométrica requerida).

- Energia perdida por vazamentos, calculado através do quociente entre a soma das perdas de energia por vazamento propriamente dito (volume perdido associado à carga hidráulica) e das perdas por atrito causadas pelos vazamentos (diferença entre a energia perdida por atrito e a energia perdida por atrito na mesma rede, sem vazamentos);
- Taxa entre energia entregue aos consumidores e a mínima energia útil. De forma simplificada, quando menor que 1, significa um déficit de pressão para os consumidores; quando superior a 1, representa sobrepressões na rede.

2.6.4 INDICADORES EXISTENTES NA LITERATURA RELACIONADOS AO USO DE ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA EM SAAS

Nessa seção são avaliados os indicadores que expressam o uso da água e energia elétrica presentes na literatura, e mais utilizados no Brasil: os da *International Water Association* (IWA) (ALEGRE *et al.*, 2004) e Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) (BRASIL, 2011b). Propõe-se uma análise crítica sobre a adequação destes indicadores para a medição de eficiência e desempenho de SAAs, de acordo com a proposta da pesquisa (medição de desempenho absoluto de cada sistema).

2.6.4.1 IWA Ph4 – Utilização da capacidade de bombeamento

Corresponde ao consumo energético (kWh) de todos os conjuntos moto-bomba de uma instalação de bombeamento, no dia de maior consumo (num período sugerido de um ano) dividido pela carga instalada da instalação (kW) multiplicada por 24 horas (excluindo-se a carga dos conjuntos reserva), conforme equação (3).

$$Ph4 = \frac{D2}{C7 \cdot 24} \cdot 100 \quad (3)$$

sendo:

- | | |
|-----|--|
| Ph4 | utilização da capacidade de bombeamento [%]; |
| D2 | consumo energético máximo diário para bombeamento no dia de maior consumo [kWh]; |
| C7 | carga instalada na estação de bombeamento [kW]. |

Fisicamente, este indicador define a capacidade remanescente de bombeamento no dia

mais crítico (ALEGRE *et al.*, 2004). É um parâmetro semelhante ao fator de carga (FC), que utiliza a demanda ao invés da carga instalada da estação, definindo o grau de utilização da energia disponível, com repercussões contábeis em termos de tarifação – baixos fatores de carga tendem a encarecer a fatura de energia (GOMES, 2009b).

Baixos valores do indicador Ph4 podem indicar:

- Conjuntos moto-bomba superdimensionados, caso a curva de carga do dia de maior consumo seja relativamente suave, sem picos;
- Operação deficiente ou baixa capacidade de reservação, caso a curva de carga do dia de maior consumo apresente picos, o que indica a necessidade de se utilizar a máxima capacidade de bombeamento durante curtos intervalos de tempo, de forma a suprir a demanda de água em horários de pico, o que poderia ser evitado caso este suprimento pudesse ser atendido por reservatórios. Outro fator relacionado aos picos de demanda é a operação de conjuntos moto-bomba em modo “liga-desliga”, típica de sistemas operando com rotação constante, obrigando as bombas a operarem em um ponto fixo.

2.6.4.2 IWA Ph5 – Consumo de energia normalizado

Este é um dos indicadores mais relevantes em termos de medição de eficiência energética em SAAs. O Ph5 é derivado do tradicional consumo energético específico (kWh.m^{-3}), indicador atrelado ao conceito de intensidade energética e que relaciona o consumo energético à produção de uma unidade de produto, no caso, 1 m^3 de água.

O consumo energético específico é válido como medida de intensidade energética para a análise de um SAA isolado, porém não permite a comparação de eficiência propriamente dita entre diferentes sistemas porque o consumo energético de um sistema de bombeamento é função da altura de elevação do sistema (H). Tal altura, por sua vez, em suas parcelas estática e dinâmica, é influenciada por fatores sobre os quais não se pode atuar, caso da topografia, localização de mananciais e consumidores.

Diante da proposta da presente tese de se avaliar a eficiência energética em termos absolutos, tais fatores devem ser isolados do cálculo dos indicadores, uma vez que não são passíveis de otimização por parte dos gestores de SAAs. Considerando-se sistemas existentes, nos quais não se podem alterar as cotas de sucção e recalque, nem o traçado ou diâmetro de adutoras, e desconsiderando a questão operativa, pode-se separar os parâmetros do consumo energético específico em dois conjuntos relevantes:

- Parâmetros estáticos: não podem ser alterados e influenciam o consumo energético no bombeamento, sem, porém, influenciar a eficiência propriamente dita. São eles: desnível geométrico (H_G) e comprimento das adutoras (L);
- Parâmetros de eficiência: podem ser alterados e influenciam o consumo energético do bombeamento, influenciando diretamente na eficiência energética do sistema, sendo eles: rendimento da bomba (η_B) e motor (η_M), fator de atrito das tubulações (f) e quantidade e condição de singularidades (Σk).

Para um melhor entendimento da inviabilidade de se utilizar o consumo energético específico como medida de eficiência e comparação entre SAAs, pode-se apresentar um exemplo numérico. Para isso, considerem-se dois SAAs fictícios, com arranjos iguais ao da Figura 25, que possuam os mesmos conjuntos moto-bomba (iguais rendimentos e potências), a mesma quantidade e configuração de singularidades, e tubulações com o mesmo fator de atrito (perdas de carga distribuídas lineares iguais). Os dois sistemas bombeiam o mesmo volume de água, porém, em duas cidades diferentes, sendo os desníveis e distâncias entre a sucção e recalque diferentes, e a sucção e recalque feitas em reservatórios de superfície livre. Na Tabela 10, são atribuídos valores fictícios para os dois sistemas, a partir da equação (18) (esta equação é apresentada na seção 3.4, durante a modelagem matemática das relações energéticas de SAAs).

Tabela 10 – Simulação de consumos específicos para dois sistemas fictícios

VARIÁVEL	SISTEMA 1	SISTEMA 2
ρ [kg.m ⁻³]	1.000	1.000
g [m.s ⁻²]	9,81	9,81
Q [m ³ .s ⁻¹]	1	1
H_G [m]	50	100
f	0,01	0,01
L [m]	100	150
D [m]	1	1
v [m.s ⁻¹]	1,27	1,27
Σk	1	1
Δt [h]	1	1
η_B	0,8	0,8
η_M	0,9	0,9
C_{EL} [kWh]	683,50	1.362,50
Consumo específico [kWh.m⁻³]	0,190	0,378

Verifica-se na Tabela 10 que, apesar de possuírem os mesmo parâmetros de eficiência, os consumos específicos dos dois sistemas são diferentes, em função de suas distintas condições estáticas. O consumo energético específico pode incorrer em erros ainda mais

acentuados, atribuindo um menor consumo específico a um sistema menos eficiente. Por exemplo, na Tabela 10, ao se reduzirem os rendimentos da bomba e motor do sistema 1 para 0,7 e 0,8, respectivamente, e aumentar sua perda de carga por meio de um acréscimo no fator de atrito (para 0,02), obtém-se um consumo energético específico de 0,245 kWh.m⁻³, ainda inferior ao do sistema 2, apesar deste ser notadamente mais eficiente que o sistema 1.

Visando adaptar o consumo energético específico de forma a se contornar os inconvenientes descritos, a IWA desenvolveu o indicador Ph5 – Consumo energético normalizado. O termo “normalizado” refere-se ao cálculo do consumo energético específico para uma mesma altura de elevação padronizada, no caso 100 m, o que permite comparar diferentes SAAs. A equação (4) define o consumo energético normalizado.

$$Ph5 = \frac{C_{EL}}{V \cdot \frac{H}{100}} \quad (4)$$

sendo:

Ph5	consumo específico de energia normalizado [kWh.m ⁻³];
C _{EL}	consumo de energia elétrica no período de referência [kWh];
V	volume bombeado no período de referência [m ³];
H	altura total de elevação (manométrica) do sistema [m].

Gomes (2009b) indica que o cálculo do consumo energético específico normalizado pode apresentar nuances, como é o caso de bombas com grande variação da altura manométrica. Nesse caso, deve-se realizar a ponderação, ao longo do período de referência, dos volumes recalcados em cada faixa de altura manométrica para se obter valor mais realista.

Gomes (2009b) propõe, ainda, outras duas adaptações do indicador de consumo energético, de forma a melhorar a sua comparabilidade. A primeira refere-se ao consumo energético linear (por km de adutora), apresentado na equação (5).

$$CEE_L = \frac{C_{EL}}{V \cdot L} \quad (5)$$

sendo:

CEE _L	consumo energético linear [kWh.m ⁻³ .m ⁻¹];
C _{EL}	consumo de energia elétrica no período de referência [kWh];
V	volume bombeado no período de referência [m ³];

L comprimento da adutora relacionada ao sistema de bombeamento [km].

A segunda proposta de Gomes (2009b) é discretizar a parcela referente às perdas de carga no cálculo do consumo energético linear, conforme equação (6).

$$CEE_{L-PC} = \frac{C_{EL}}{V.L} \cdot \left(1 - \frac{H_G}{H_{MAN}} \right) \quad (6)$$

sendo:

CEE_L consumo energético linear [$kWh.m^{-3}.m^{-1}$];

C_{EL} consumo de energia elétrica no período de referência [kWh];

V volume bombeado no período de referência [m^3];

L comprimento da adutora relacionada ao sistema de bombeamento [km];

H_G desnível geométrico [m];

H_{MAN} altura manométrica total [m].

2.6.4.3 IWA Ph6 – Consumo de energia reativa

Este indicador relaciona a energia reativa consumida com o consumo energético total, sendo expresso pela equação (7).

$$Ph6 = \frac{D4}{C_{EL}} \cdot 100 \quad (7)$$

sendo:

$Ph6$ consumo de energia reativa [%];

$D4$ consumo de energia elétrica reativa no período de referência [$kVarh$];

C_{EL} consumo de energia elétrica no período de referência [kWh].

O consumo de energia reativa relaciona-se com o fator de potência da instalação, sendo uma medida da qualidade da energia. O baixo fator de potência ocasiona perdas devido ao aumento das correntes reativas, sendo passível de multa, quando atinge valores inferiores a 92% (GOMES, 2009b).

2.6.4.4 IWA Ph7 – Recuperação de energia

Corresponde à relação entre a energia recuperada por meio de turbinas hidráulicas (ou bombas reversíveis) e o consumo total de uma instalação, conforme equação (8).

$$Ph7 = \frac{D5}{C_{EL}} \cdot 100 \quad (8)$$

sendo:

- Ph7 recuperação de energia [%];
 D5 recuperação de energia elétrica no período de referência [kWh];
 C_{EL} consumo de energia elétrica no período de referência [kWh].

2.6.4.5 IWA WR1 – Ineficiência na utilização dos recursos hídricos

O IWA WR1 relaciona as perdas reais com a água total afluyente ao sistema, através da equação (9).

$$WR1 = \frac{A19}{A3} \cdot 100 \quad (9)$$

sendo:

- WRI ineficiência na utilização dos recursos hídricos [%];
 A19 perdas reais no período de referência [m³];
 A3 volume total de água afluyente ao sistema [m³].

Este indicador pode ser interpretado com o índice global de perdas físicas do sistema, porém, não permite identificar o nível onde ocorrem as perdas (captação, adução, distribuição, tratamento, dentre outros).

2.6.4.6 SNIS IN₀₁₃ – Índice de perdas de faturamento

Este indicador quantifica a porcentagem da água disponibilizada para o consumo que é efetivamente faturada pelo sistema, segundo equação (10).

$$IN_{013} = \frac{VAP + VATI - VAS - VAF}{VAP + VATI - VAS} \quad (10)$$

sendo:

IN ₀₁₃	índice de perdas de faturamento [%];
VAP	volume de água produzido no período de referência [m ³];
VATI	volume de água tratada importada no período de referência [m ³];
VAS	volume de água de serviço no período de referência [m ³];
VAF	volume de água faturado no período de referência [m ³].

2.6.4.7 SNIS IN₀₄₉ – Índice de perdas na distribuição

Semelhante ao índice de perdas no faturamento, este indicador possui uma base física, uma vez que substitui o volume faturado pelo volume consumido, conforme a equação (11).

$$IN_{049} = \frac{VAP + VATI - VAS - VAC}{VAP + VATI - VAS} \quad (11)$$

sendo:

IN ₀₄₉	índice de perdas na distribuição [%];
VAP	volume de água produzido no período de referência [m ³];
VATI	volume de água tratada importada no período de referência [m ³];
VAS	volume de água de serviço no período de referência [m ³];
VAC	volume de água consumido no período de referência [m ³].

2.6.4.8 SNIS IN₀₅₈ – Índice de consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água

Esse indicador é, conceitualmente, semelhante ao consumo energético específico (analisado na seção 2.6.4.2), apresentando o inconveniente já descrito de não permitir a comparação entre diferentes sistemas. A peculiaridade desse indicador no SNIS é fato dele utilizar como volume de referência a soma dos volumes produzidos e tratados importados, com base anual.

3 MATERIAL E MÉTODOS

No presente capítulo, é apresentada a metodologia utilizada na concepção do sistema de indicadores de desempenho proposto na pesquisa.

De forma resumida, inicialmente é definido um modelo conceitual generalizado de sistema de abastecimento de água, elaborado com base na literatura. O modelo prevê a divisão dos sistemas de abastecimento em unidades de análise, permitindo a aplicação segmentada do sistema de indicadores. A partir do modelo generalizado, são determinados os fluxos de água e energia elétrica no sistema de abastecimento.

Numa segunda etapa, é realizada a modelagem matemática da demanda/consumo de energia elétrica, a partir da qual é possível definir as variáveis que influenciam no desempenho hidráulico e energético do sistema. A associação dessas variáveis com os componentes físicos (bombas, tubulações) e operacionais é uma etapa importante, que permite obter, através de medição e monitoramento, dados necessários para a geração dos indicadores de desempenho e, posteriormente, sugerir medidas de eficiência relacionadas a cada indicador.

Com base nas variáveis identificadas durante a modelagem matemática, inicia-se o desenvolvimento do sistema de indicadores de eficiência. Cada indicador é associado a um valor-alvo, que quantifica a máxima eficiência hidráulica e energética atingível pelo componente em análise. Este valor-alvo é calculado através de técnicas de modelagem e otimização, consulta a referenciais técnicos presentes na literatura, ou, quando necessário, através de análises de eficiência relativa, visando à identificação de *benchmarks*.

Finalmente, o sistema de indicadores desenvolvido é testado em sistemas de abastecimento de água reais, de forma a se validar o método proposto.

Cabe nesse momento um comentário sobre a natureza conceitual dos indicadores propostos. Tais indicadores são, primordialmente, indicadores de eficiência, uma vez que seu objetivo determinar a relação ótima de uso dos recursos água e energia elétrica. Assume-se que tais indicadores são, também, indicadores de desempenho, na concepção do termo, tendo em vista que seu cálculo é pautado pelos níveis de serviço admissíveis (demandas e vazões). Dessa forma, os indicadores propostos estão diretamente associados à qualidade do serviço, representante da parcela efetividade do desempenho.

3.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES E EMBASAMENTO TEÓRICO

A partir da revisão da literatura, foram identificados pontos fundamentais e aplicáveis ao desenvolvimento de sistemas de medição e eficiência e desempenho e, consequentemente, de indicadores desta natureza. Uma estrutura básica para o projeto de um SMD, considerada adequada à proposta da pesquisa, é apresentada por Andersen e Fagerhaug (2002), sendo ilustrada pela Figura 18.

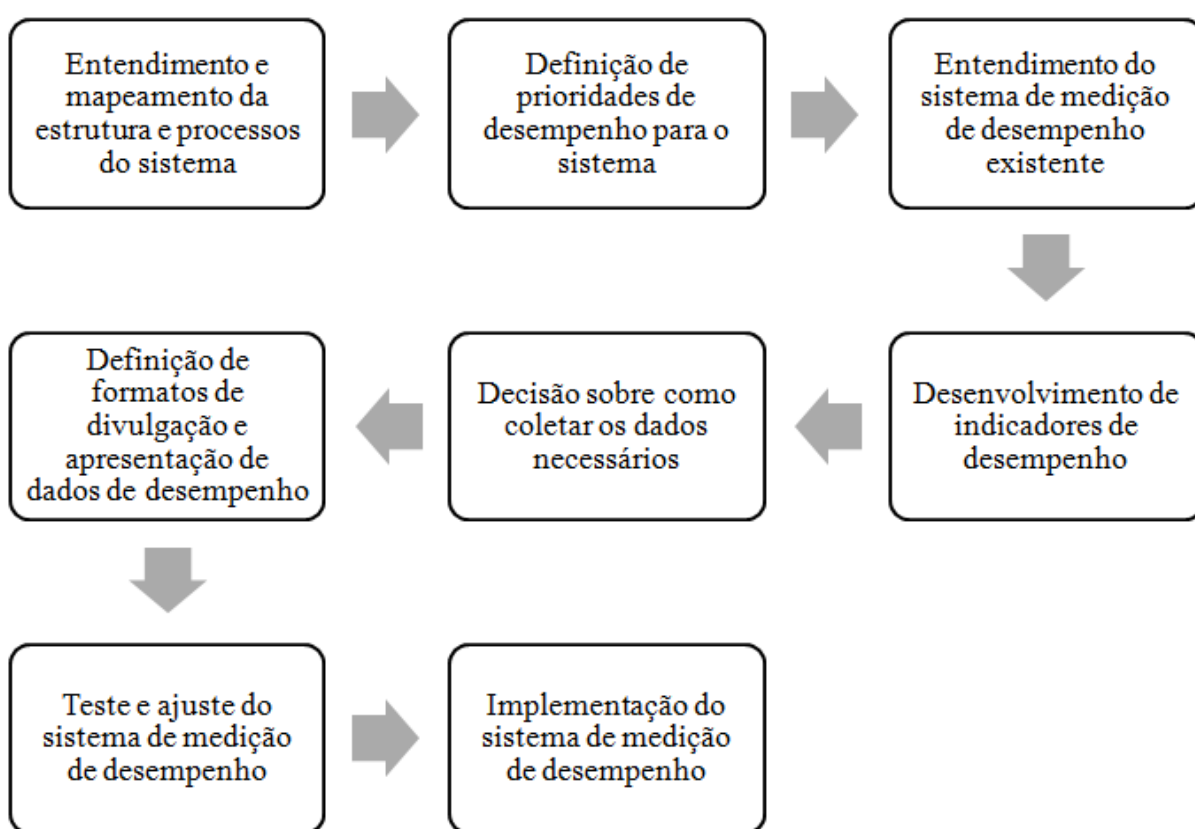


Figura 18 – Processo de desenvolvimento de sistemas de medição de performance (adaptado de Andersen; Fagerhaug, 2002)

Franceschini *et al.* (2007) propôs um método para desenvolvimento de indicadores, com base em suas propriedades fundamentais, resumido na Figura 19. Uma definição importante para o entendimento do método é a de indicador derivado, sendo este um indicador calculado com base em outros indicadores. Dependendo do nível de agregação de informações, indicadores derivados podem constituir um índices.

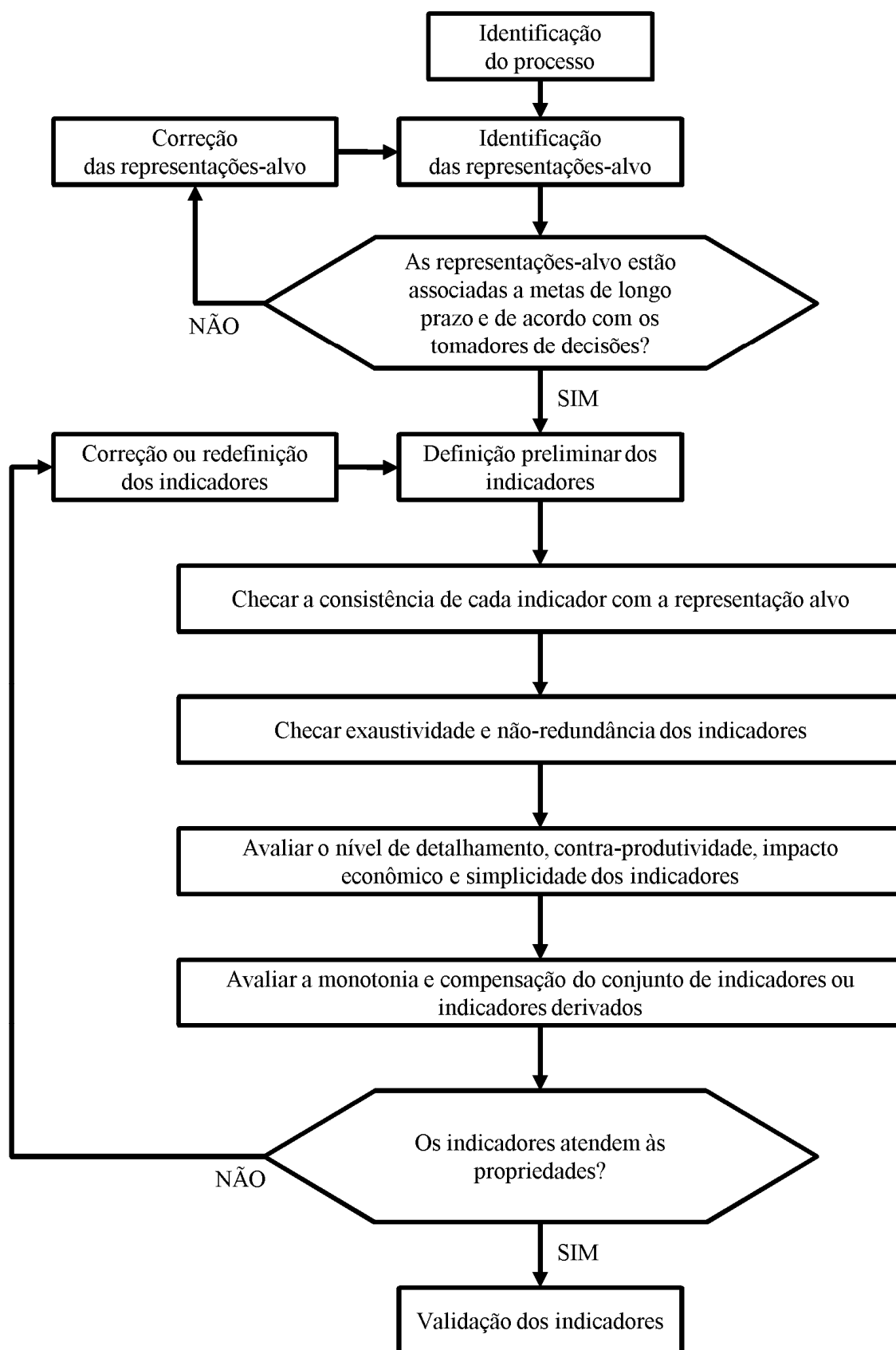


Figura 19 – Método para desenvolvimento de indicadores baseado em suas características fundamentais
(adaptado de Franceschini *et al.*, 2007)

A definição do título da medida de desempenho, da expressão matemática para o cálculo dos índices/indicadores, frequência de coleta de dados, análise de consistência de dados, forma de compilação e divulgação de resultados são etapas para medição de desempenho apresentadas por Attadia e Martins (2003).

Avaliar e propor uma estrutura de medição de desempenho auxilia o desenvolvimento de um SMD propriamente dito, uma vez que elucida os limites de medição e determina as dimensões³⁹ de medição. Folan e Browne (2005) classificam uma estrutura de medição de performance em dois tipos: estrutural (tipologia para gestão das medidas de desempenho) e processual (lista de procedimentos, “passo-a-passo”, da estratégia de medição de desempenho).

O conjunto de indicadores de desempenho elaborado e selecionado permitirá quantificar os níveis de desempenho do sistema avaliado; para tanto, é fundamental que o SMD considere as possibilidades de coleta e obtenção dos dados necessários ao cálculo dos indicadores. Este é um dos grandes desafios desta pesquisa, uma vez que a medição e o monitoramento hidráulico e energético em grande parte dos SAAs brasileiros são bastante precários, quando não inexistente. Os dados a serem medidos devem ser definidos de acordo com os aspectos críticos do sistema, e do seu potencial em promover melhorias (FRANCESCHINI *et al.*, 2007). Propõe-se, então, uma classificação para os dados e documentos disponíveis para o desenvolvimento de indicadores de eficiência hidráulica e energética:

- Dados básicos: séries de medições hidráulicas e energéticas fundamentais, admitidas presentes na maioria dos SAAs, independente da sua dimensão, localização geográfica e nível tecnológico. Enquadram-se nessa categoria: macromedição de água bruta na entrada da ETA (geralmente feita através de calha Parshall⁴⁰), expressa em volumes totais mensais; volumes de água tratada faturada totais mensais, micromedidos nos ramais prediais dos consumidores; consumos totais mensais de energia ativa e demanda registrada, na ponta e fora da ponta (quando for o caso), na captação e principais estações elevatórias do sistema; curvas de desempenho originais (fornecidas pelos fabricantes) dos conjuntos moto-bomba;
- Dados intermediários: constituem a extensão e detalhamento dos dados secundários,

³⁹ Dimensão de medição, no sentido apresentado, se refere ao nível, tipo ou natureza da medição de desempenho, por exemplo: financeira e não-financeira, ambiente interno ou externo, resultados, custos, tempo, qualidade, processos, insumos, produtos, dentre outros.

⁴⁰ Calha Parshall é uma estrutura de medição de vazão em canais de regime crítico. É constituída de um estrangulamento da seção, às vezes acompanhada de mudança de declividade do fundo, constituindo um controle hidráulico com relação entre nível d'água e vazão bem definida.

geralmente obtidos por meio de monitoramento. São exemplos: perfis de consumo horários de água bruta na entrada da ETA; curvas de carga horárias da captação e principais elevatórias; macromedição e perfis de consumo horários em setores do sistema de distribuição; variação horária do nível do reservatório principal;

- Dados avançados: dizem respeito ao completo monitoramento e controle do sistema, através da medição contínua de diversos parâmetros, em geral obtidos através de sistemas telemétricos e em tempo real, por exemplo: monitoramento contínuo de vazão em diversas unidades intermediárias de macromedição (captação, entrada da ETA, saída da ETA, setores e reservatórios secundários); níveis d'água de reservatórios principais e secundários do sistema; monitoramento de parâmetros hidráulicos (pressão na entrada e saída da bomba, níveis de sucção) e elétricos (potência elétrica, corrente, tensão, rotação) de forma individualizada em cada conjunto moto-bomba do sistema (em elevatórias principais, *boosters*⁴¹, etc); monitoramento contínuo de pressão em distritos de medição⁴²;
- Dados cadastrais, topográficos e mapas: nessa categoria de dados, devem ser compiladas todas as informações sobre os vários componentes do sistema (reservatórios, tubulações, válvulas, dentre outros). As características físicas (diâmetros, materiais/rugosidades, volumes, dimensões) destes componentes devem, preferencialmente, estar associadas a informações topográficas e geográficas (cotas e coordenadas geográficas).

A existência de um sistema de gerenciamento de informações (SGI) robusto, que irá suprir, gerenciar e atualizar informações necessárias para o desenvolvimento e implantação do SMD, é considerado vital para o sucesso desse último por Nudurupati *et al.*, (2011). Sadiq *et al.* (2010), referindo-se a pequenos sistemas de abastecimento de água (cujo atendimento se limita a até 10.000 pessoas), afirmam ser viável combinar informações operacionais, infraestruturais e de manutenção através de indicadores para estabelecer a eficiência do sistema. Tais autores propõem uma metodologia para integração de indicadores de performance em pequenos SAAs.

⁴¹ *Boosters*, segundo Monachesi (2005), são instalações de bombeamento nas quais inexiste o reservatório de sucção, sendo a alimentação da bomba realizada diretamente por uma adutora ou pela própria rede.

⁴² Um distrito de medição (*district metered area*, DMA, do inglês) corresponde a uma área hidráulica da rede de distribuição, com até cinco mil economias, que pode ser isolada do restante da rede através da operação de válvulas, e na qual são instalados medidores de pressão e/ou vazão (BURROWS *et al.*, 2000; TABESH *et al.*, 2008). As DMAs são, às vezes, referidas pelos termos zona de gerenciamento de pressão (ULANICKI *et al.*, 2000), zona de medição e controle (ALEGRE *et al.*, 2004) ou, simplesmente, zona de pressão.

Procedimentos para medição de eficiência em conjuntos moto-bomba, fundamentais para a análise energética de SAAs, são definidos pela norma ISO 9906 (ISO, 1999), podendo esta ser considerada material de referência para a coleta de dados básicos para análises hidráulicas e energéticas de SAAs.

O desenvolvimento de um indicador de desempenho propriamente dito inicia-se com o estabelecimento de um limite de controle e de um valor-alvo (ou valor-meta) (ANDERSEN; FAGERHAUG, 2002). O limite de controle corresponde ao menor nível de eficiência aceitável para o indicador, a partir do qual ações de melhoria/correção são inevitáveis e inadiáveis. Neste trabalho, o limite de controle pode ser relacionado a níveis de eficiência que comprometam o serviço de abastecimento de água – por exemplo, índices de perda de água muito elevados, associados a grandes vazamentos na rede, que possam ocasionar racionamento em setores desta.

Um valor-alvo corresponde a uma meta de eficiência atribuída a um indicador, dentro de um prazo no qual seu alcance é factível (ANDERSEN; FAGERHAUG, 2002). Neste ponto, cabe retomar a discussão sobre a análise de eficiência relativa (comparação entre sistemas semelhantes) e absoluta (nível de eficiência individual de cada sistema, em relação à sua condição ótima). No caso da eficiência relativa, um valor-alvo pode ser representado por um *benchmark*, a partir do momento em que um SAA opta por buscar os mesmos níveis de eficiência de outro, considerado referência em determinado indicador. Em termos absolutos, o valor alvo de um SAA relaciona-se à sua otimização tecnológica e operativa, como por exemplo, o uso de equipamentos eficientes, implantação de regras operativas ótimas e eliminação de desperdícios através de correta manutenção preventiva e corretiva.

3.2 PROPOSTA DE UM MODELO GENERALIZADO DE SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E UNIDADES DE ANÁLISE

A Figura 20 apresenta a concepção de um SAA, segundo a Fundação Nacional de Saúde (BRASIL, 2006a). Cullinane (1989)⁴³ *apud* Mays (1999), por sua vez, apresenta na Figura 21 as relações hierárquicas de um SAA, a partir de uma concepção simplificada.

⁴³ CULLINANE, M. J. **Methodologies for the evaluation of Water Distribution System Reliability/Availability**. 1989. Tese (Doutorado) – Universidade do Texas, Austin, 1989 *apud* MAYS, L. **Water distribution systems handbook**. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1999.

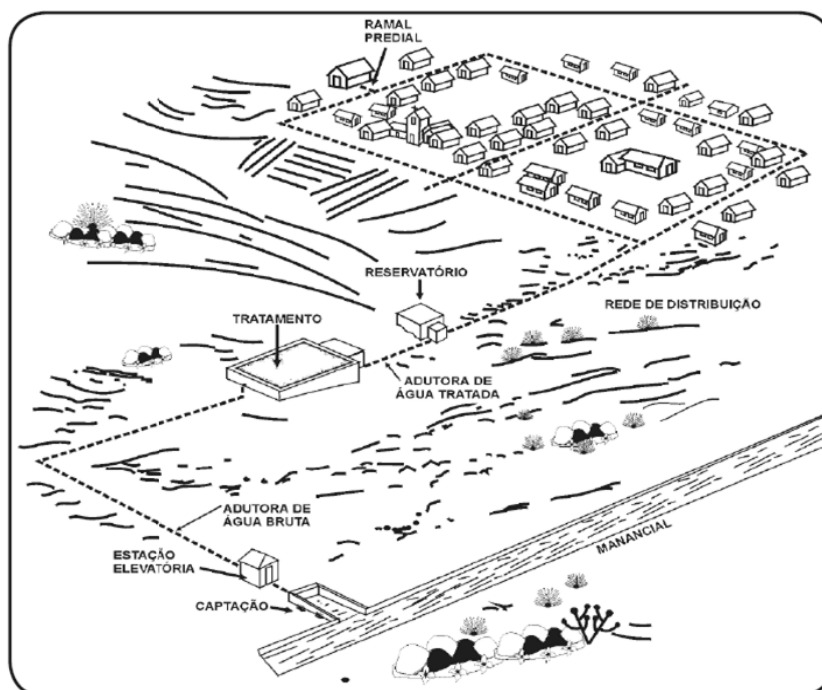


Figura 20 – Unidades de um sistema de abastecimento de água (BRASIL, 2006a)

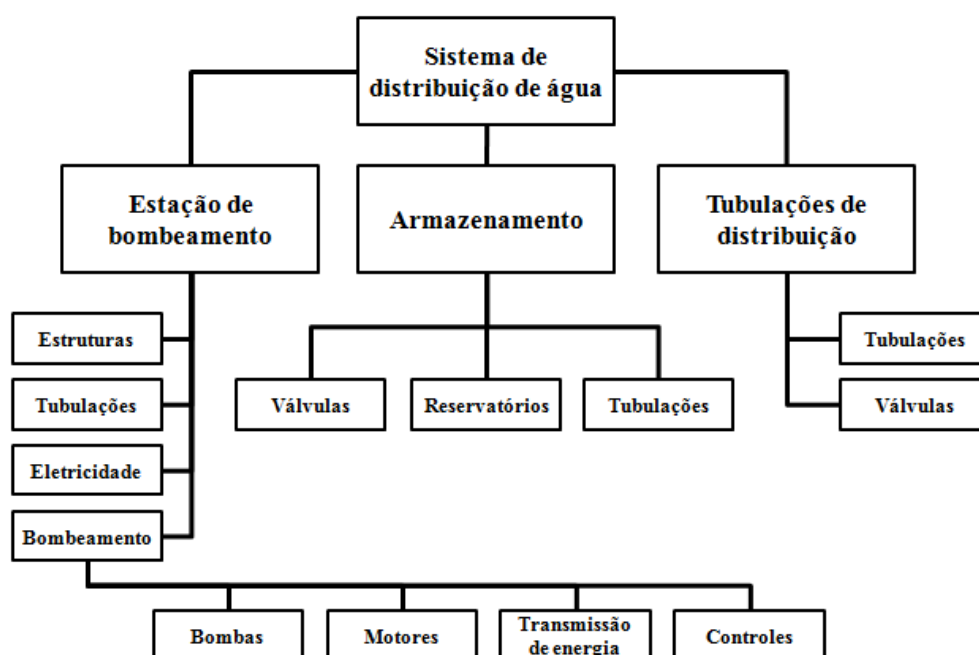


Figura 21 – Relações hierárquicas entre componentes, subcomponentes e sub-subcomponentes de sistemas de distribuição de água (adaptado de Cullinane (1989) *apud* Mays (1999))

A Tabela 11 detalha os componentes/terminologias de um SAA, em macroescala, identificados na literatura.

Tabela 11 - Principais componentes de SAAs

COMPONENTE TERMINOLOGIA	BRASIL, 2006a	GOMES, 2009	ABNT, 1992a	MAYS, 1999
Manancial	✓		✓	
Fonte				✓
Captação	✓	✓	✓	
Adução	✓	✓		
Condutos adutores e subadutores			✓	
Transmissão de água bruta				✓
Armazenamento de água bruta				✓
Tratamento	✓	✓		✓
Estação de tratamento			✓	
Reservação	✓	✓	✓	
Armazenamento de água tratada				✓
Rede de distribuição	✓	✓	✓	
Válvulas, comportas e demais aparelhos			✓	
Sistemas elétricos			✓	
Sistemas de automatização			✓	
Distribuição de água tratada				✓
Estações elevatórias	✓	✓	✓	
Ramal predial	✓			
Ligações prediais		✓	✓	

Fonte: autoria própria

A partir da revisão bibliográfica apresentada na Tabela 11 e de contribuições do autor da tese, é proposto um modelo geral de SAA, que será a base para análise dos fluxos hidráulicos e energéticos, permitindo o posterior desenvolvimento do sistema de indicadores, conforme Figura 22.

Não foram consideradas, de forma explícita, as unidades de tratamento simplificado (UTSs)⁴⁴, podendo estas serem avaliadas mediante adaptação do modelo.

No modelo genérico proposto, cada bloco ou componente do sistema é denominado unidade de análise (UA). Neste, podem ser adicionadas e/ou excluídas UAs, em função das peculiaridades de cada sistema que se pretenda analisar. Essas alterações no modelo geral podem ser decorrentes de diferenças de projeto e construtivas de cada sistema considerado, definidas por condicionantes naturais – por exemplo, disponibilidade e fontes de água, topografia, clima – e antrópicas – distribuição geográfica dos consumidores, tipos de uso da água, dentre outros.

⁴⁴ UTSs são sistemas de tratamento nos quais a água bruta, geralmente originária de mananciais subterrâneos ou fontes de encosta possui características que naturalmente a qualificam como potável, sendo submetida a um processo simplificado de desinfecção.

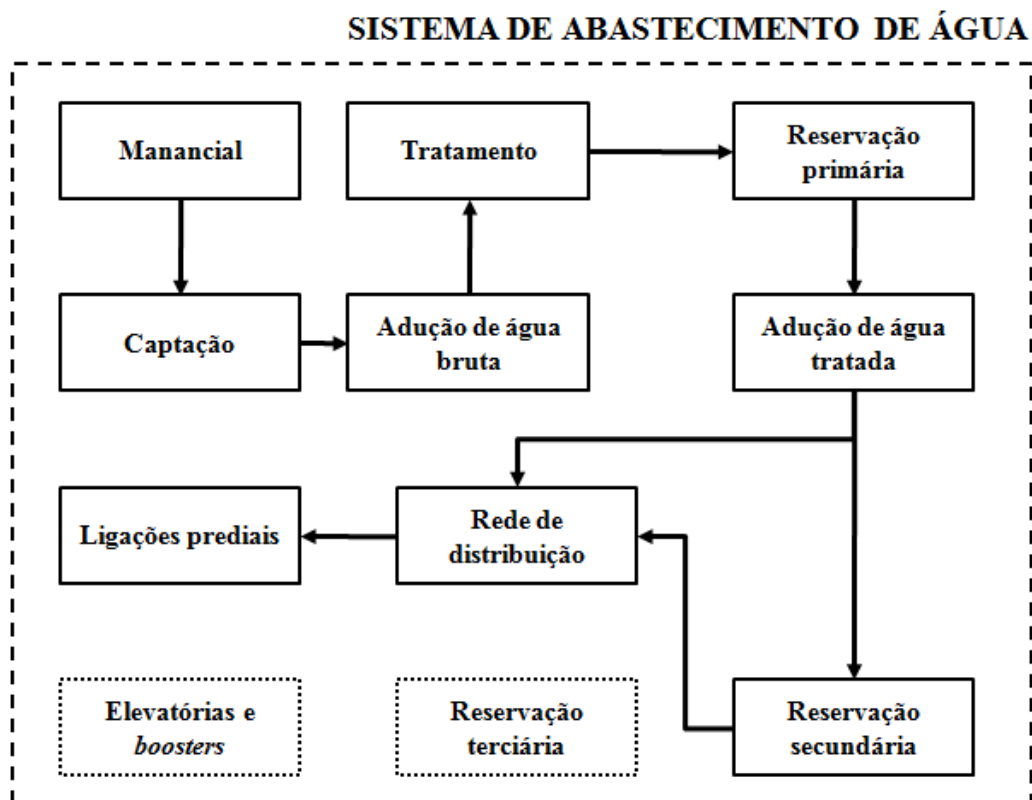


Figura 22 – Modelo geral de SAA proposto

Segundo Cabrera *et al.* (2010), do ponto de vista energético, cada sistema é diferente; as redes podem ser planas ou montanhosas; os mananciais elevados (possibilitando adução por gravidade) ou baixos (exigindo bombeamento), ou ainda, subterrâneos. Tais fatores dificultam a comparação consistente entre sistemas, do ponto de vista exclusivamente hidráulico e energético. O conjunto de características que conferem unicidade a um SAA é denominado contexto (ALEGRE *et al.*, 2004). A setorização de redes de distribuição, por exemplo, implica na inclusão de tantas quantas forem as redes de distribuição no modelo geral, com seus respectivos reservatórios e ligações prediais. As setas da Figura 22 indicam o fluxo de água no sistema. As duas unidades de análise pontilhadas (elevatórias e *boosters*, reservação terciária) foram mantidas à parte no diagrama devido à grande variabilidade de opções de locação dentro do sistema, devendo ser locadas, quando existentes, de acordo com a peculiaridade do SAA avaliado.

Outra observação relevante refere-se às interconexões entre as UAs, também variáveis de sistema para sistema, o que pode, em determinados casos, dificultar o isolamento para a análise hidráulica e energética.

Apesar de inseridas dentro dos limites do SAA modelo, as ligações prediais são avaliadas até seu ponto de conexão na rede, limitado fisicamente pelo hidrômetro;

características internas, referentes a dispositivos e formas de uso da água, não são contempladas na pesquisa. A seguir, são descritos os tipos de UA propostos no estudo, com seus respectivos componentes, tipos e limites, bem como os fluxos hidráulicos e energéticos específicos. Para não comprometer a fluidez da leitura do texto, os fluxogramas hidráulicos e energéticos são apresentados no apêndice A.

3.2.1 MANANCIAL

Manancial é toda fonte de água utilizada para abastecimento, para fins domésticos, industriais e comerciais, que apresenta condições sanitárias compatíveis com essa finalidade (BRASIL, 2006a). Os principais tipos de mananciais são os superficiais e os subterrâneos. Águas meteóricas (chuva, neve, granizo, etc) são também consideradas mananciais, ainda que seu uso ainda seja incipiente em grande parte do mundo.

A posição geográfica do manancial, quando superficial, terá influência direta sobre o consumo energético de SAAs, uma vez que esta pode proporcionar o escoamento por gravidade, evitando o uso de conjuntos moto-bomba. Por sua vez, mananciais superficiais localizados em áreas baixas em relação à ETA ou aos consumidores, exigirão bombeamento.

Mananciais subterrâneos apresentam, em geral, qualidade de água superior quando comparados às fontes superficiais, o que dispensa ou reduz as necessidades de tratamento. O Estado de São Paulo, por exemplo, é um grande usuário de água subterrânea, sendo estimado em 50% o número de municípios que se utilizam majoritariamente desse tipo de manancial no Estado, bem como diversas indústrias através de poços particulares (HIRATA et al., 2007).

Novamente sob o ponto de vista energético, a exploração de água subterrânea proveniente de aquíferos confinados, através de poços artesianos, apresenta a vantagem de não exigir bombeamento para exploração, quando comparado a poços convencionais. Critérios para de seleção de mananciais para abastecimento de água são definidos pelas normas NBR 12211 (ABNT, 1992a), NBR 12216 (ABNT, 1992d).

3.2.2 CAPTAÇÃO

Captação é o “conjunto de estruturas e dispositivos, construídos ou montados junto a um manancial, para a retirada de água destinada a um sistema de abastecimento.” (ABNT, 1992c). A Tabela 12 associa os principais tipos de captação, em função do manancial disponível.

Tabela 12 - Principais tipos de captação em função do manancial disponível

Tipo de captação	Manancial
Tomada d'água direta	Superficial (rios, lagos, açudes)
Poço tubular profundo	Águas subterrâneas/aquíferos confinados
Poço escavado	Água subterrânea/lençol freático
Caixa de tomada	Nascentes/Fontes de encosta
Galeria filtrante	Fundos de vale
Superfície de captação	Água de chuva

Fonte: adaptado de Brasil (2006a)

O tipo, localização e cota topográfica da captação influenciam de forma direta seu comportamento energético. Em mananciais superficiais e subterrâneos não artesianos, geralmente é necessário o uso de grandes conjuntos moto-bomba para recalque de água bruta até a ETA, sendo esta UA a primeira energeticamente intensiva no modelo de SAA proposto.

Quanto mais afastada a captação da ETA, maiores serão as perdas de carga distribuídas na adução de água bruta; em termos altimétricos, captações em cotas superiores às das ETAs geralmente dispensam o uso de bombeamento, enquanto unidades posicionadas abaixo das estações de tratamento inserem variadas alturas geométricas ao equacionamento energético do sistema, o que ocorre também no caso de poços escavados.

No caso de captações superficiais, a implantação de barramentos pode influir de forma positiva no consumo energético das captações. Barragens de nível podem ser implantadas para elevar o nível de sucção, reduzindo-se a altura geométrica de elevação, ou até mesmo reservatórios para regularização de vazões, que conferem flexibilidade operativa ao sistema através do volume armazenado. Sistemas reversíveis e conjugados que envolvem abastecimento de água e geração hidrelétrica são uma opção tecnológica relacionada às captações/mananciais superficiais.

Apesar de aquíferos confinados (Figura 83, apêndice A) apresentarem altas pressões, não foram identificados na literatura casos de recuperação de energia nesse tipo de manancial, ao contrário do que ocorre em captações superficiais por gravidade. As Figuras 80 a 83 (apêndice A) apresentam os fluxos energéticos e hidráulicos típicos verificados nos diferentes tipos de captação de água bruta.

3.2.3 ADUÇÃO DE ÁGUA BRUTA

A adução de água bruta corresponde ao transporte de água da captação até a ETA através da tubulação e seus respectivos acessórios. O sistema pode ser por gravidade ou

recalque, livre (escoamento sob pressão atmosférica) ou forçado (escoamento sob pressão superior à atmosférica). Em termos energéticos, deve-se dar atenção aos sistemas por recalque. Conforme comentado anteriormente, a localização geográfica de mananciais, captações e ETAs influencia diretamente no comprimento e, consequentemente, nas perdas de carga das adutoras de água bruta. Além disso, o traçado das linhas terá influência direta nesse comprimento e na presença de singularidades na adutora, sendo dependente não somente da geografia/topografia locais, mas também da conformação de outras infraestruturas urbanas, principalmente a de transportes, o que dificulta sua alteração com vistas ao aumento da eficiência hidráulica e energética.

O diâmetro da tubulação é fundamental para a minimização das perdas de carga, bem como a rugosidade do conduto, que deve ser considerada no momento da sua seleção e gerenciada ao longo da vida útil, sobretudo no que se refere a incrustações e desgaste. Nesse sentido, a qualidade da água do manancial desempenha papel fundamental, seja em função da presença de sedimentos em suspensão que possam ocasionar desgaste por atrito no tubo, ou por características físico-químicas que favoreçam a deposição de material ou a corrosão.

As Figuras 84 e 85 (apêndice A) apresentam os fluxos hidráulicos e energéticos típicos de sistemas de adução de água bruta. Nas figuras, o fluxo de energia efluente da adução de água bruta para a ETA é implícito no bloco de perdas de carga, uma vez que, considerando o tratamento convencional, após adentrar na estação o é livre e por gravidade.

3.2.4 TRATAMENTO

Estação de tratamento de água é o “[...] conjunto de unidades destinado a adequar as características da água aos padrões de potabilidade.” (ABNT, 1992e). Tais padrões são definidos, no Brasil, pela Portaria nº 518 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2005). O enquadramento de corpos d’água e águas subterrâneas, no tocante às classes de qualidade e necessidades de tratamento, é definido pelas resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 357/2005 e 396/2008 (BRASIL, 2008b).

O CONAMA (BRASIL, 2008b) considera três tipos básicos de tratamento de água:

- Tratamento simplificado: clarificação da água por através de filtração, além de desinfecção e correção de pH, quando necessário;
- Tratamento convencional: processo de clarificação com utilização de coagulação e floculação, seguido de desinfecção e correção de pH;

- Tratamento avançado: métodos para remoção e/ou inativação de constituintes refratários aos processos convencionais de tratamento, que podem conferir à água cor, odor, sabor, atividade tóxica ou patogênica.

Resumidamente, o tratamento simplificado se inicia com a oxidação ou pré-cloração, que tem por objetivo facilitar a remoção de metais e matéria orgânica presente na água, nas etapas seguintes do tratamento. É feita então uma primeira correção do pH, conferindo a água características de alcalinidade/acidez compatíveis com as outras etapas do tratamento. Posteriormente, é adicionado um coagulante (os mais utilizados no Brasil são o sulfato de alumínio e o cloreto férrico) numa seção com alta turbulência – em geral, numa calha Parshall - que favorece sua mistura com a água bruta, comumente chamada de mistura rápida.

Após adição do coagulante, a água bruta adentra no floculador, local de velocidade controlada no qual as partículas em suspensão começam a se unir, dando origem aos flocos. O trajeto da água continua através do decantador, que também apresenta baixas velocidades, e no qual os flocos se depositam no fundo, por decantação. A água atravessa, então, os filtros, cuja composição clássica é feita por camadas de cascalho, areia e antracito, no qual são retidas as partículas em suspensão remanescentes da decantação. Por fim, é realizada uma nova correção do pH, visando evitar incrustações e corrosão em tubulações, a desinfecção – normalmente com cloro – para eliminação de microorganismos patogênicos, e a adição de flúor, para controle de cáries dentárias nos consumidores.

Segundo Cheremisinoff (2002), as tecnologias para tratamento de água podem ser classificadas em três categorias:

- Métodos físicos: consistem em processos de separação de fases líquidas e sólidas, sendo a filtração o mais representativo destes;
- Métodos químicos: baseiam-se em interações químicas entre reagentes e contaminantes, visando sua remoção e/ou neutralização;
- Métodos energeticamente intensivos: são voltados principalmente para a esterilização/desinfecção da água, englobando tecnologias térmicas e eletroquímicas.

Nesta pesquisa serão consideradas apenas ETAs operando o tratamento convencional. Em termos energéticos, os principais componentes de uma ETA são os sistemas de bombeamento de água tratada para a reservação primária e as elevatórias de retrolavagem de

filtros. Normalmente, todo o escoamento desde a entrada da água bruta na ETA até a saída dos filtros ocorre por gravidade. A partir daí, a água tratada é bombeada para o reservatório primário, a partir do qual é aduzida para outros reservatórios ou para a rede de distribuição.

A retrolavagem dos filtros acontece mediante a inversão do escoamento, através da qual água tratada é bombeada em sentido ascendente através dos filtros, removendo as partículas depositadas durante o processo de tratamento, sendo esta água posteriormente descartada.

A agitação da água nos flocladores pode ser feita através de agitadores mecânicos, acionados por motores elétricos. Estes, porém, apresentam, em geral, potências significativamente inferiores àquelas verificadas nos motores que acionam as bombas integrantes do sistema, conferindo a eles baixa representatividade em termos de consumo energético. Optou-se então em não considerar os agitadores, de forma direta, nesta pesquisa.

As Figuras 86 e 87 (apêndice A) apresentam os fluxos hidráulicos e energéticos típicos em ETAs operando tratamento convencional de água.

3.2.5 RESERVAÇÃO PRIMÁRIA

No modelo proposto, reservatório primário é aquele que recebe e armazena água tratada da ETA, e a distribui para um reservatório secundário ou para a rede. Reservatórios, sejam eles primários, secundários ou terciários, desempenham um papel fundamental na gestão energética de SAAs, uma vez que conferem flexibilidade à operação de conjuntos moto-bomba, principalmente durante o horário de ponta. Apesar disso, na prática, poucos SAAs operam convenientemente seus reservatórios, utilizando as estruturas como componentes de segurança contra eventuais problemas no bombeamento ou adutoras.

No que se refere à economia de água, vazamentos provenientes de problemas estruturais, além de extravasamento devido ao não monitoramento/controle de nível, são duas importantes causas de perdas de água na reservação primária. A Figura 88 (apêndice A) apresenta os fluxos hidráulicos e energéticos típicos da reservação primária.

3.2.6 ADUÇÃO DE ÁGUA TRATADA

A adução de água tratada se refere à tubulação e seus respectivos acessórios que transportam água tratada, a partir de um reservatório primário, até a rede de distribuição ou um reservatório secundário.

Fisicamente, a adução de água tratada apresenta características análogas às da adução de

água bruta, com exceção da qualidade da água transportada. Esta tende a apresentar características químicas mais favoráveis à adução do que a água bruta, reduzindo a incidência de incrustações e corrosão na tubulação, o que afetará as perdas de carga ao longo da linha.

As Figuras 89 e 90 (apêndice A) apresentam os fluxos hidráulicos e energéticos típicos da adução de água tratada.

3.2.7 RESERVAÇÃO SECUNDÁRIA

Reservatórios secundários são aqueles localizados dentro ou adjacentes às redes de distribuição, responsáveis por abastecer determinados setores. São responsáveis pela manutenção de níveis ideais de vazão e pressão na rede, principalmente nos períodos de maior consumo.

Suas implicações energéticas (flexibilização da operação do sistema, modulação do bombeamento na ponta) e hidráulicas (perdas de água por vazamento ou extravasamento) são semelhantes às dos reservatórios primários. Devido ao fato de se localizarem em locais remotos em relação aos centros de controle dos SAAs (em geral, instalados nas ETAs), o monitoramento e controle de reservatórios secundários é feito, normalmente, por telemetria. A Figura 91 (apêndice A) apresenta os fluxos hidráulicos e energéticos típicos da reservação secundária.

3.2.8 REDE DE DISTRIBUIÇÃO

Segundo a NBR 12218 (ABNT, 1994b), uma rede de distribuição de água é um conjunto de tubulações e acessórios destinado a disponibilizar água potável aos consumidores, de forma contínua, em quantidades e sob pressões ideais. A NBR 12218 apresenta, ainda, algumas definições relevantes ao estudo:

- setor de manobra: menor subdivisão da rede que pode ser isolado sem comprometer o fornecimento ao restante da rede. A caracterização de um setor de manobra se dá por pelo menos um dos seguintes critérios: extensão da rede entre 7.000 e 35.000 m, número de economias entre 600 e 3.000, área entre 40.000 m² e 200.000 m².
- setor de medição: parte da rede com limites bem definidos e isolável, utilizada para acompanhamento do consumo e quantificação de perdas, através de medidores de vazão e pressão. A extensão máxima da rede de um setor de medição deve ser de 25.000 m;

- tubulação principal: condutos da rede de distribuição que concentram em seus nós as vazões máximas de dimensionamento da rede;
- tubulações secundárias: demais tubulações da rede, diferentes das tubulações principais;
- pressão estática: pressão em determinado ponto da rede, referenciada ao nível do eixo da via pública, sob condição hidrostática (consumo nulo). Pela norma, a pressão estática máxima nas tubulações deve ser inferior a 500 kPa ($\cong 50$ m);
- pressão dinâmica: pressão em determinado ponto da rede, referenciada ao nível do eixo da via pública, sob condição consumo não nulo. Seu valor mínimo admissível é de 100 kPa ($\cong 10$ m).

Gomes (2009a) estabelece motivos pelos quais as pressões máximas na rede devem ser limitadas:

- quanto maiores as pressões requeridas, maiores os custos energéticos de bombeamento;
- da mesma forma, quanto maiores as pressões, mais resistentes deverão ser as tubulações, implicando em maiores custos destes componentes;
- aumento da probabilidade de ruptura de tubulações mediante altas pressões;
- as perdas de água por vazamento são proporcionais à pressão na rede;
- as vazões nos pontos de consumo também são uma função proporcional à pressão disponibilizada. Aumentos na pressão podem ocasionar desperdícios por parte dos consumidores.

Ainda segundo a NBR 12218 (ABNT, 1994b), as velocidades mínima e máxima admissível nas tubulações, referentes às demandas máximas diárias no início e final da execução da rede, devem ser de, respectivamente, $0,6 \text{ m.s}^{-1}$ e $3,5 \text{ m.s}^{-1}$. Os diâmetros mínimos dos condutos secundários devem ser de 50 mm.

As redes de distribuição de água podem ser classificadas em dois tipos básicos: ramificadas e malhadas (ARAÚJO, 1998). Uma rede ramificada é composta de uma tubulação principal, da qual partem tubulações secundárias, sendo alimentada por somente um ponto (BRASIL, 2006a), o que pode comprometer o abastecimento devido a problemas na rede (rupturas, por exemplo) ou durante manutenção. As redes ramificadas apresenta um único sentido de escoamento, e tendem a ser mais baratas que as malhadas (GOMES, 2009a).

Redes malhadas são constituídas por um conduto principal, do qual se originam

tubulações secundárias cujas pontas são interconectadas, evitando pontas mortas (BRASIL, 2006a). O sentido de escoamento numa rede malhada muda em função das diferenças de pressão entre seus nós (ARAÚJO, 1998), o que torna seu dimensionamento mais complexo (GOMES, 2009a). Uma variação da rede malhada é a rede malhada em anel, sendo este o nome dado a tubulações de maior tamanho em relação às secundárias propriamente ditas, que circundam algumas áreas da malha, reduzindo sua perda de carga e oferecendo diversos pontos de alimentação (BRASIL, 2006a). Segundo Gomes (2009a), a associação de redes malhadas e ramificadas constitui uma rede mista.

A seguir, são descritos alguns componentes das redes de distribuição utilizados no dimensionamento e modelagem, conforme Gomes (2009b) e Gomes e Salvino (2009):

- Trecho: são os percursos da rede, materializados por tubulações, bombas e válvulas de controle, nos quais a vazão permanece constante;
- Nó: ponto de união entre dois trechos, no qual a água entra e/ou sai. Reservatórios de nível fixo ou variável são considerados nós especiais;
- Nó de derivação: nó que une mais de dois trechos;
- Ramal: conjunto de trechos ligados em série, sem a presença de nó de derivação;
- Artérias: agrupamento de ramais em série.

A Figura 92 (apêndice A) apresenta os fluxos hidráulicos e energéticos típicos de redes de distribuição de água.

3.2.9 RESERVAÇÃO TERCIÁRIA

Reservatórios terciários são aqueles localizados, geograficamente, dentro ou nas adjacências da rede de distribuição, que recebem água de tubulações secundárias, ramificações da rede, podendo ou não estar associados à *boosters*.

3.2.10 ELEVATÓRIAS E BOOSTERS

Dependendo principalmente da configuração geográfica e topográfica da rede e dos sistemas de adução, pode ser necessária a instalação de sistemas de bombeamento complementares àqueles existentes nas ETAs. Elevatórias convencionais (succionando água de reservatórios instalados dentro da rede) são implantadas, geralmente, à montante de

grandes setores ou conjuntos de setores, localizados em cotas topográficas elevadas em relação à reservação primária. Nesse caso, seus reservatórios são secundários, e a água é recalçada para reservatórios também secundários (caso essa adução se faça por meio de adutoras/tubulações primárias) ou para rede (podendo, através desta, atingir reservatórios terciários).

Boosters se constituem em uma alternativa utilizada com frequência para fornecer pressão suplementar para pequenos trechos de rede ou reservatórios terciários localizados em cotas elevadas, ou ainda, para complementar a carga hidráulica de forma que a vazão proveniente de adutoras primárias atinja reservatórios secundários instalados igualmente em cotas topográficas elevadas. Em termos energéticos, os *boosters* permitem ajustar os níveis de pressão/vazão em zonas especiais, que, em geral, apresentam características topográficas destoantes em relação àquelas típicas do restante do sistema. Com isso, conjuntos moto-bomba de grandes dimensões (sobretudo, aqueles localizados na ETA) podem ser dimensionados considerando alturas manométricas inferiores, sendo o excedente requerido por zonas elevadas complementado, de forma ponderada, pelos *boosters*.

3.2.11 LIGAÇÕES PREDIAIS

As ligações prediais constituem a última unidade de análise, sendo o limite de análise do modelo proposto. As ligações assumem, basicamente, os tipos residencial, industrial e comercial. O limite físico dessa UA, em termos de análise hidráulica e energética, é o micromedidor (hidrômetro).

3.2.12 FLUXOS GLOBAIS, BALANÇOS HIDRÁULICOS E ENERGÉTICOS

Uma vez definidos os limites de análise do sistema proposto, deve-se determinar sua interação com o ambiente externo. Essa interação é materializada pelos fluxos de água e energia elétrica que entram (insumos) e saem (produtos) do sistema, conforme Figura 23. O modelo de fluxo proposto não contempla explicitamente volumes importados e exportados, podendo estes serem considerados mediante adaptação do modelo.

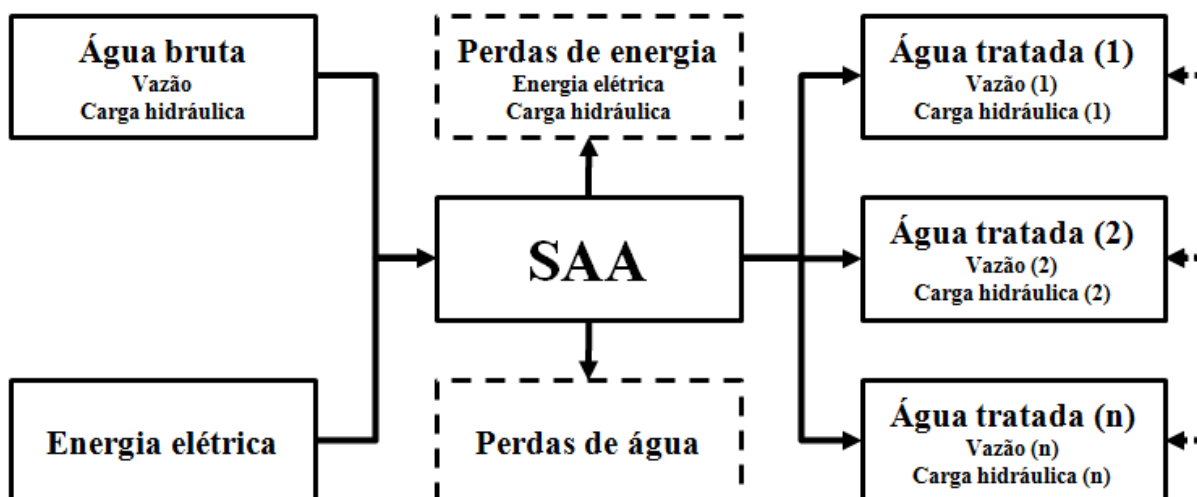


Figura 23 – Fluxos globais de água e energia elétrica em SAAs

3.2.13 DECLARAÇÃO DE METAS DE EFICIÊNCIA HIDRÁULICA E ENERGÉTICA PARA O MODELO PROPOSTO

Diante do modelo de fluxos apresentado, a meta global de eficiência do SMD proposto é atender ao consumo e demanda atual de água tratada das unidades consumidoras (produto) dentro dos limites do sistema, utilizando para isso, os menores montantes possíveis de água bruta e energia elétrica (insumos), além de reduzir as perdas de água (produto indesejável). Essa meta pode ser modelada como um problema de otimização, no qual se deseja minimizar, simultaneamente, o consumo de água bruta, energia elétrica e as perdas de água, com a restrição de se disponibilizar, em quantidade e no tempo adequado, o volume solicitado pelos consumidores, além de manter níveis adequados de pressão na rede.

A meta de eficiência global a ser considerada no modelo proposto é formalizada como segue:

Redução, quando possível simultânea, dos volumes de água bruta captada, energia elétrica consumida e potência elétrica demandada, mediante a manutenção de níveis de serviço adequados. Os níveis de serviço adequados referem-se à disponibilização de vazões requeridas pelos consumidores em condições aceitáveis de pressão, em termos espaciais e temporais.

3.3 PROPOSTA DE UMA ESTRUTURA DE MEDIÇÃO DE DESEMPENHO HIDRÁULICO E ENERGÉTICO PARA SAAS

Antes de se elaborarem os indicadores de eficiência propriamente ditos, é necessário definir o contexto de medição de performance no qual estes estarão inseridos, o que pode ser conseguido através da elaboração de uma estrutura de medição de desempenho. A estrutura proposta é apresentada na Figura 24.

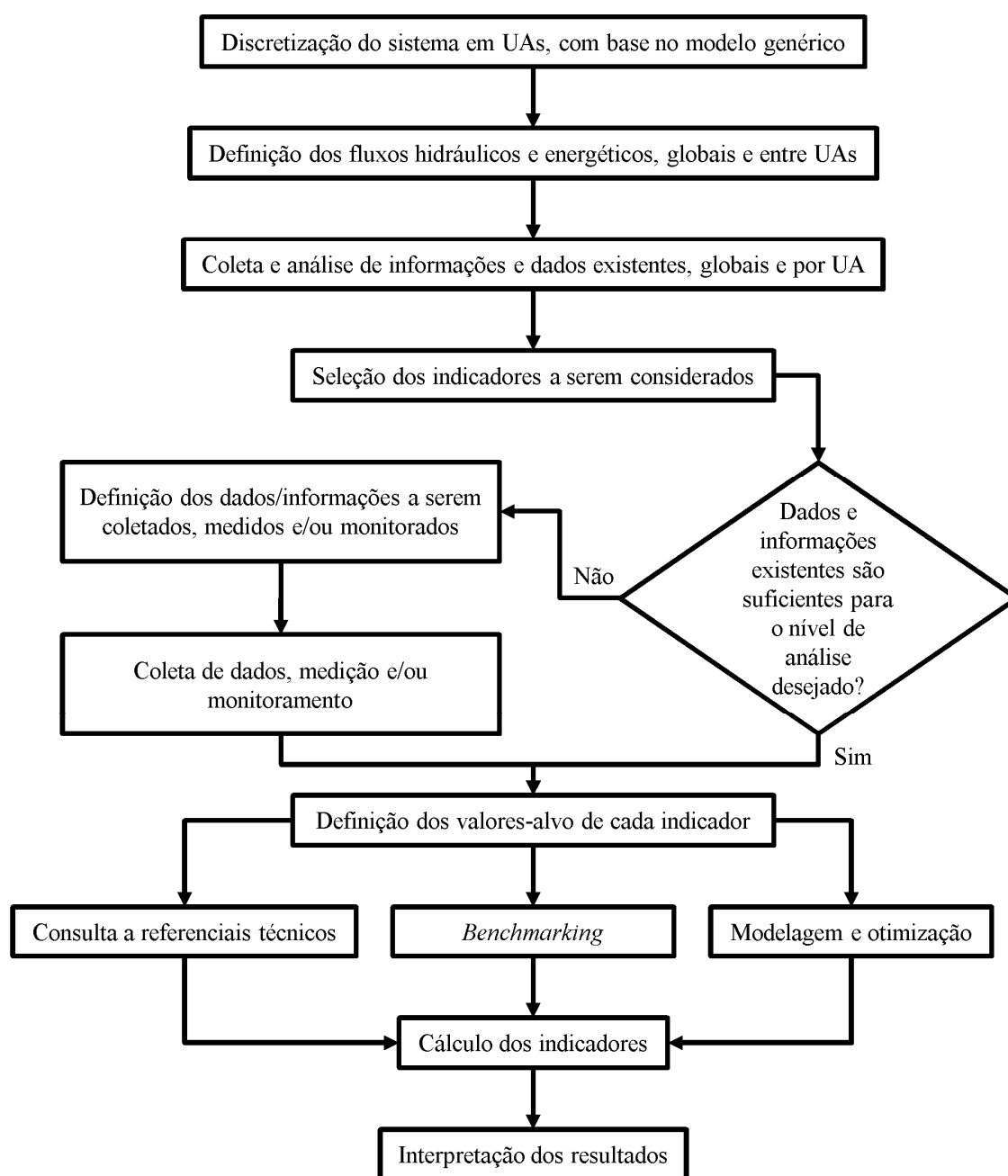


Figura 24 – Estrutura de medição de desempenho proposta

3.4 MODELAGEM MATEMÁTICA DAS RELAÇÕES HIDROENERGÉTICAS

Nesta seção é desenvolvido o equacionamento para obtenção das relações entre consumo de energia elétrica e produção de água, através do qual é possível a modelagem matemática de tais relações.

Partindo-se do pressuposto de que o consumo majoritário de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água ocorre através de conjuntos moto-bomba, é importante compreender a forma através da qual esses equipamentos realizam a conversão de energia. Isso é possível através das curvas do sistema e da bomba. O esquema geral de estação de bombeamento apresentado na Figura 25 é referência para o equacionamento da altura manométrica e definição da curva do sistema.

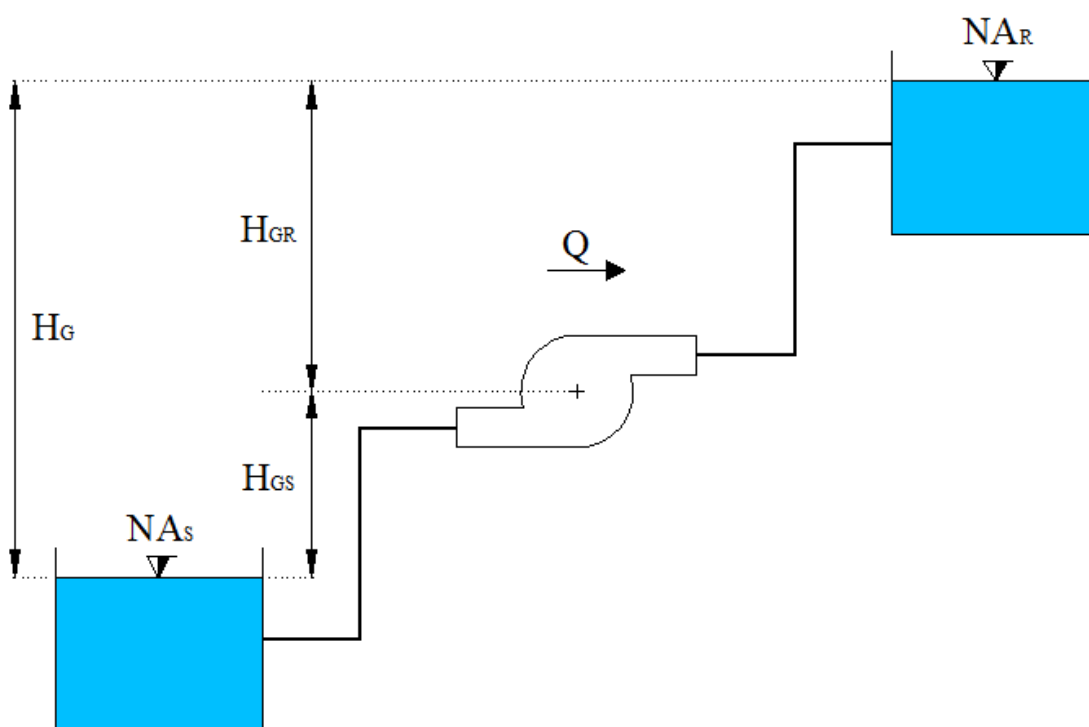


Figura 25 – Esquema geral de estação de bombeamento

A Figura 25 ilustra um arranjo clássico de estação de bombeamento utilizado em sistemas de abastecimento, no qual deseja-se recalcar água de um reservatório localizado em cota topográfica inferior (nível d'água de sucção – NA_S) para outro posicionado em uma cota superior (nível d'água de recalque – NA_R). Além do conjunto moto-bomba, o sistema de recalque é composto pelas tubulações, acessórios e singularidades (válvulas, curvas, dentre

outros). Estes componentes são comumente separados na literatura em dois setores: o sistema de sucção – localizado a montante da bomba – e o sistema de recalque – posicionado a jusante da máquina hidráulica. Os desníveis entre o eixo do rotor da bomba e os NA_S e NA_R são denominados altura geométrica de sucção (H_{GS}) e altura geométrica de recalque (H_{GR}). Somando-se H_{GR} e H_{GS} , obtém-se a altura geométrica (H_G) da instalação.

A energia por unidade de peso (carga hidráulica) que deve ser fornecida através de bombeamento para que a água se desloque entre os reservatórios de sucção e recalque, com um desnível H_G , é denominada altura manométrica ou altura total de elevação (PORTO, 1999; GOMES, 2009b; MONACHESI, 2005). Gomes (2009b) afirma que a energia mecânica necessária ao bombeamento pode ser determinada através dos princípios da conservação de massa (equação da continuidade), fórmulas semiempíricas para cálculo de perdas de carga (Darcy-Weisbach e Hazen-Williams) e pela equação da conservação de energia (equação de Bernoulli generalizada). A equação de Bernoulli adaptada para aplicações práticas – considerando as perdas de carga – é denominada equação da energia (PORTO, 1999; ARAÚJO, 1998) e define que a somatória das parcelas cinética, potencial e piezométrica da carga hidráulica entre dois pontos, em um escoamento permanente, acrescida das perdas de carga entre estes pontos, é constante, conforme equação (12).

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + H_p \quad (12)$$

sendo:

z_1 cota ou parcela potencial da carga hidráulica no ponto 1 [m];

P_1 pressão manométrica no ponto 1 [Pa];

ρ massa específica da água [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$];

g aceleração da gravidade [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$];

v_1 velocidade média do escoamento no ponto 1 [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$];

$\frac{P_1}{\rho \cdot g}$ parcela piezométrica da carga hidráulica no ponto 1 [m];

$\frac{v_1^2}{2 \cdot g}$ parcela cinética da carga hidráulica no ponto 1 [m];

z_2 cota ou parcela potencial da carga hidráulica no ponto 2 [m];

P_2 pressão manométrica no ponto 2 [Pa];

v_2 velocidade média do escoamento no ponto 2 [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$];

$\frac{P_2}{\rho \cdot g}$	parcela piezométrica da carga hidráulica no ponto 2 [m];
$\frac{v_2^2}{2 \cdot g}$	parcela cinética da carga hidráulica no ponto 2 [m];
H_P	perdas de carga [m].

Aplicando-se a equação (12) ao sistema da Figura 25, com os pontos 1 e 2 referenciados respectivamente nos NA_S e NA_R , obtém-se a altura total de elevação do sistema (equação (13)).

$$H = H_G + \frac{P_2 - P_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot g} + H_{PS} + H_{PR} \quad (13)$$

sendo:

H	altura manométrica ou altura total de elevação do sistema [m];
H_G	altura geométrica [m];
P_1	pressão manométrica no ponto 1 [Pa];
ρ	massa específica da água [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$];
g	aceleração da gravidade [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$];
v_1	velocidade média do escoamento no ponto 1 [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$];
z_2	cota ou parcela potencial da carga hidráulica no ponto 2 [m];
P_2	pressão manométrica no ponto 2 [Pa];
v_2	velocidade média do escoamento no ponto 2 [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$];
H_{PS}	perdas de carga na sucção [m];
H_{PR}	perdas de carga no recalque [m].

Apesar das parcelas cinéticas e piezométricas no sistema da Figura 25 serem nulas (velocidades nas superfícies dos reservatórios de sucção e recalque igual a zero, e pressão manométrica igual à atmosférica em ambos), a equação da altura manométrica foi mantida como tal, em função das diversas configurações que as estações de bombeamento podem assumir em sistemas de abastecimento de água, devendo ser utilizada de acordo com as variantes do sistema. Além da configuração clássica da Figura 25, Gomes (2009b) e Souza Neto (2004) citam as possíveis variáveis:

- Descarga livre da tubulação de recalque (acima no NA_R);
- Tubulação de sucção conectada diretamente a uma adutora ou da própria rede (*boosters*);
- *Booster* descarregando em um reservatório (com descarga livre ou afogada);
- *Booster* descarregando na própria rede (para a pressurização de zonas localizadas em cotas elevadas, por exemplo).

Outra importante configuração de uma instalação de bombeamento refere-se à posição da bomba em relação ao NA_S . Quando a bomba encontra-se abaixo desse nível, diz-se que bomba encontra-se afogada⁴⁵; do contrário, a bomba está não afogada.

A altura total de elevação pode ser dividida em duas componentes:

- Altura estática: correspondente à soma das parcelas potencial e piezométrica (está última normalmente nula em SAAs);
- Altura dinâmica: soma das perdas de carga com a parcela cinética.

As perdas de carga no recalque e na sucção podem ser de dois tipos: distribuídas (resultantes do atrito do escoamento ao longo das tubulações) e localizadas, ocasionadas por interferências no fluxo devido à existência de singularidades (válvulas, curvas, expansões e contrações de tubos, dentre outras). As perdas de carga distribuídas podem ser calculadas por meio da equação universal de Darcy-Weisbach (ARAÚJO, 1998) (equação (14)), enquanto as perdas localizadas são quantificadas pela equação (15).

$$h_{PD} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (14)$$

sendo:

h_{PD}	perda de carga distribuída [m];
f	fator de atrito, obtido através do diagrama de Moody [1];
L	comprimento da tubulação [m];
D	diâmetro interno da tubulação [m];
v	velocidade média do escoamento [$m.s^{-1}$];
g	aceleração da gravidade [$m.s^{-2}$].

⁴⁵ Gomes (2009b) afirma que a configuração afogada apresenta as seguintes vantagens em relação às bombas não afogadas: evita a entrada de ar no sistema e dispensa o uso de válvula de pé para evitar o retorno de água;

$$h_{PL} = k \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (15)$$

sendo:

h_{PL}	perda de carga localizada [m];
k	coeficiente de perda de carga (tabelado em função do tipo de singularidade) [1];
v	velocidade média do escoamento [$m \cdot s^{-1}$];
g	aceleração da gravidade [$m \cdot s^{-2}$].

Conhecendo-se os diâmetros das tubulações, e sabendo-se que a vazão volumétrica é numericamente igual ao produto da velocidade média do escoamento pela sua área, pode-se reescrever a equação (13) em função da vazão, assumindo-se que as cargas piezométricas no sistema são nulas, conforme equação (16).

$$H = H_G + C \cdot Q^2 \quad (16)$$

sendo:

H	altura total de elevação do sistema [m];
H_G	altura geométrica [m];
C	constante associada às perdas de carga e outros constantes do equacionamento [$s^2 \cdot m^{-5}$];
Q	vazão volumétrica [$m^3 \cdot s^{-1}$].

A representação gráfica da função correspondente à altura total de elevação do sistema recebe o nome de curva do sistema ou da instalação, ilustrada de forma genérica pela Figura 26. Na Figura 26, o valor da altura de elevação referente à vazão nula corresponde à altura estática, representada pela altura geométrica no caso do sistema ser composto por dois reservatórios sob pressão atmosférica. Para cada vazão a diferença da altura total até a geométrica corresponde à parcela dinâmica, normalmente representada de forma majoritária pelas perdas de carga no sistema. Em linhas gerais, a curva do sistema informa a energia (carga hidráulica) que deve ser fornecida ao fluido, através de bombeamento, para que determinada vazão seja recalcada, de forma a superar o desnível e as perdas de carga do sistema. A Figura 27 apresenta a separação das alturas estática e dinâmica do exemplo geral apresentado. A Figura 28, por sua vez, apresenta a decomposição da curva do sistema nas diversas cargas que a compõe.

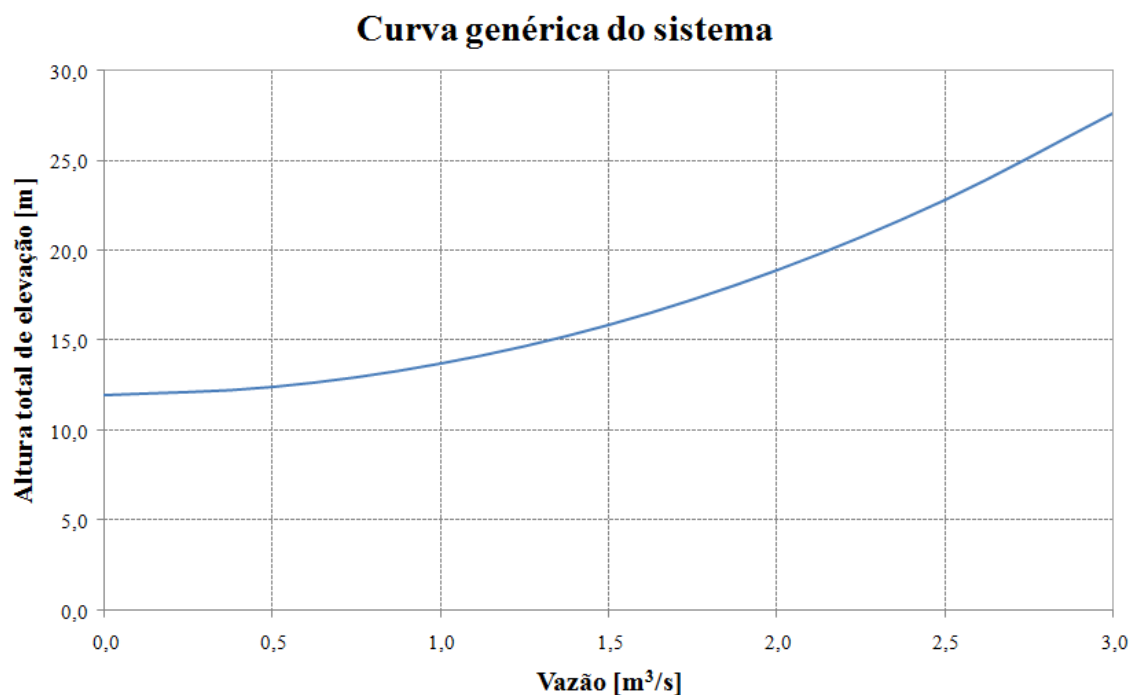


Figura 26 – Exemplo de curva do sistema

Em termos energéticos, o entendimento do comportamento dos diversos componentes da curva do sistema é fundamental para a sua análise e prospecção de alternativas para o aumento da eficiência. A potência elétrica consumida por um conjunto moto-bomba será diretamente proporcional à altura total de elevação e à vazão que este deverá recalcar, conforme equação (17).

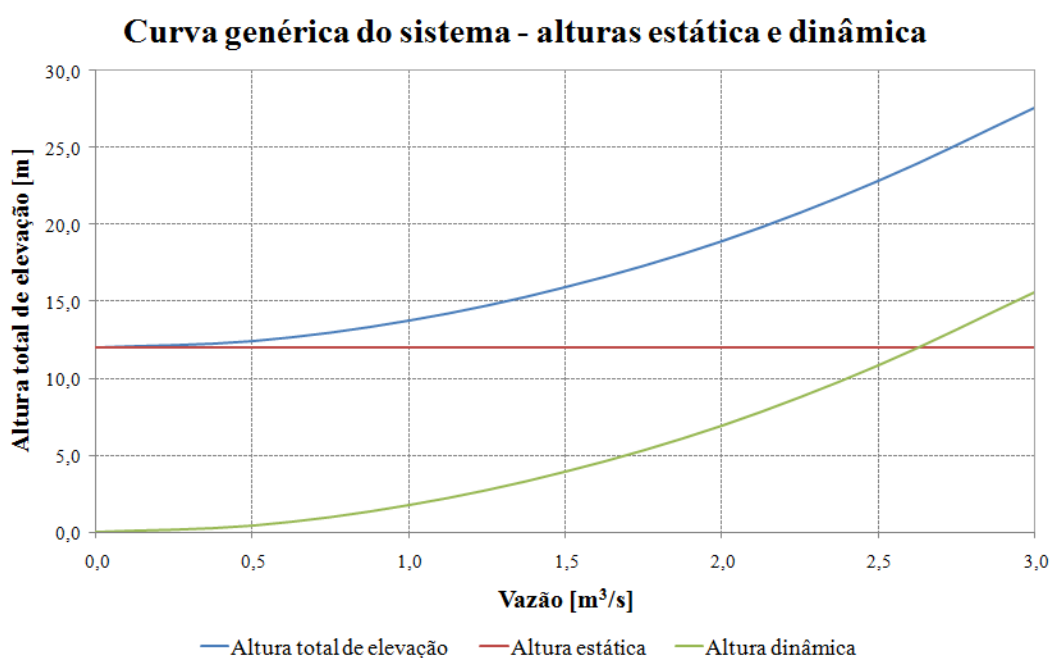


Figura 27 – Altura total de elevação, parcela estática e parcela dinâmica

Curva genérica do sistema - decomposição das cargas

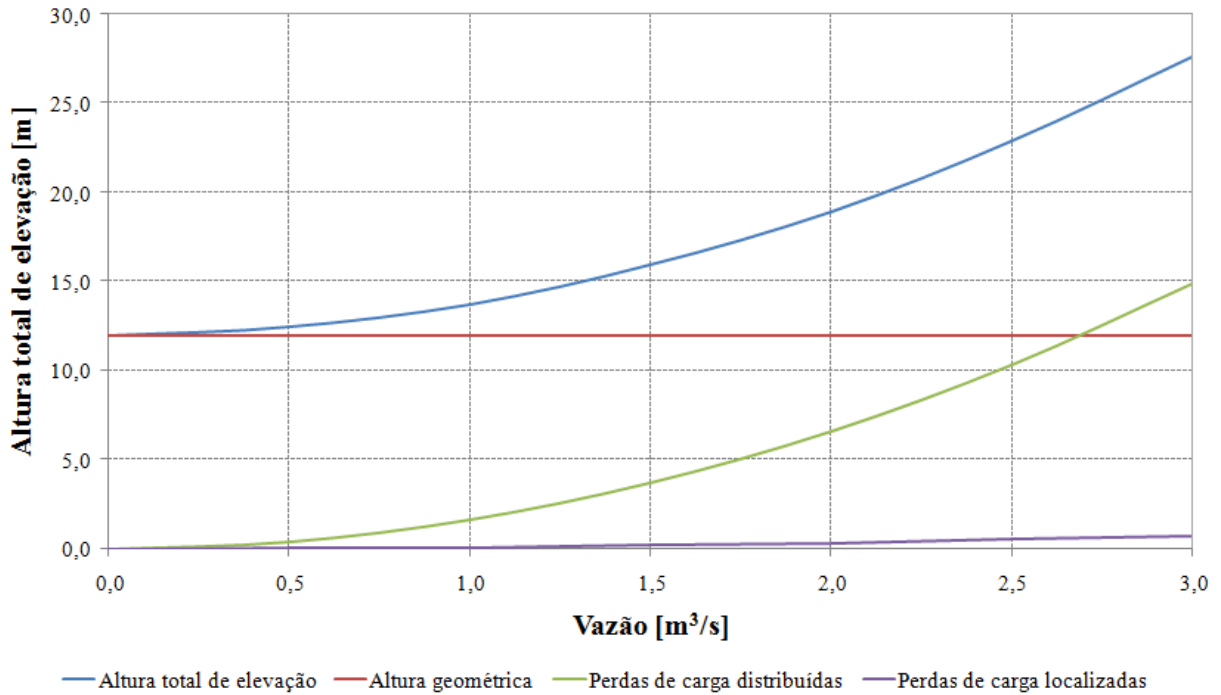


Figura 28 – Decomposição da curva do sistema

$$P_{EL} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta_B \cdot \eta_M} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot \left(H_G + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot g} + \sum \frac{f \cdot L \cdot v^2}{D \cdot 2 \cdot g} + \sum k \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \right)}{\eta_B \cdot \eta_M} \quad (17)$$

sendo:

P_{EL} potência elétrica consumida pelo conjunto moto-bomba [W];

η_B rendimento da bomba [%];

η_M rendimento do motor [%].

O consumo de energia associado ao bombeamento em SAAs pode ser quantificado pela equação (18):

$$C_{EL} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta_B \cdot \eta_M} \cdot \Delta t = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot \left(H_G + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot g} + \sum \frac{f \cdot L \cdot v^2}{D \cdot 2 \cdot g} + \sum k \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \right)}{\eta_B \cdot \eta_M} \cdot \Delta t \quad (18)$$

sendo:

C_{EL} consumo de energia elétrica pelo conjunto moto-bomba [Wh];

Δt tempo de funcionamento do conjunto moto-bomba [horas].

3.5 IDENTIFICAÇÃO DOS PRINCIPAIS FATORES INFLUENTES SOBRE O USO DE ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA EM SAAs

Com base no equacionamento da potência e consumo por bombeamento em SAAs, podem-se identificar os principais fatores físicos que as influenciam, de forma a se embasar a proposta dos possíveis indicadores a serem desenvolvidos. Os fatores influentes sobre o consumo e demanda de água e energia elétrica em SAAs podem ser classificados em:

- Fatores que podem ser alterados: são fatores hidráulicos e energéticos que, através de intervenções operacionais e/ou estruturais (substituição ou manutenção de equipamentos, por exemplo), podem ser alterados pelo gestor do sistema, influenciando diretamente no seu consumo e demanda de água e energia elétrica. Estes fatores são a base do sistema de indicadores propostos;
- Fatores que podem ser parcialmente alterados ou de difícil alteração: constituem fatores cuja alteração ou manipulação por parte dos gestores possui restrições ou maior dificuldade operacional. Exemplo desse tipo de fator é o traçado de tubulações;
- Fatores que não podem ser alterados: são os que, apesar de influenciar diretamente o consumo e demanda de água ou energia do sistema, não podem ser alterados, com, por exemplo, a altura geométrica referente à cota topográfica de uma captação.

A Tabela 13 apresenta os fatores que influenciam o consumo e demanda de energia elétrica e água em SAAs, posteriormente utilizados para a proposição de indicadores.

Tabela 13 – Variáveis e fatores que influenciam o consumo de energia em SAAs

Variável	É influenciado por quais variáveis?	É tecnicamente viável/possível alterar a variável?	Formas de alteração das variáveis
Vazão bombeada (Q)	Demanda e consumo	Sim, porém, depende dos consumidores	• Mudança de hábitos dos consumidores; • Utilização de dispositivos economizadores de água; • Captação de água de chuva; • Reuso de água.
	Clima e sazonalidades	Não	-
	Perdas de água	Sim	• Redução de pressões na rede; • Controle ativo de vazamentos; • Controle passivo de vazamentos; • Operação e monitoramento de níveis de reservatórios; • Eliminação de perdas comerciais.
Altura geométrica e níveis d'água (H_G, z)	Localização do manancial	Depende das condições do sistema	• Seleção de mananciais que permitam adução por gravidade.
	Capacidade de armazenamento	Sim	• Instalação de novos reservatórios; • Operação otimizada de reservatórios existentes.
	Topografia	Não	-
Fator de atrito (f)	Níveis de poços e reservatórios	Sim	• Elevação do nível de sucção; • Rebaixamento do nível de recalque; • Operação otimizada de reservatórios; • Seleção de mananciais em cotas adequadas.
	Material da tubulação	Sim	• Seleção e substituição de tubulações menos rugosas.
	Idade da tubulação	Sim	• Substituição de tubulações; • Limpeza interna para redução de rugosidades e incrustações.
Comprimento de tubulações (L)	Qualidade da água	Sim	• Controle de parâmetros físico-químicos da água tratada para evitar incrustações e/ou corrosão.
	Traçado das tubulações	Sim, porém, depende de outras infra-estruturas (malha viária e ocupação urbana, principalmente), no caso de sistemas já existentes	• Traçado otimizado de adutoras e rede de distribuição.
	Topografia e localização de mananciais	Não para topografia, sim no caso de mananciais para novos sistemas	• Seleção de mananciais que proporcionem as menores distâncias no sistema.

Tabela 13 – Variáveis e fatores que influenciam o consumo de energia em SAAs (continuação)

Variável	É influenciado por quais variáveis?	É tecnicamente viável/possível alterar a variável?	Formas de alteração das variáveis
Diâmetro de tubulações (D)	Diâmetro da tubulação	Sim	• Seleção dos diâmetros ótimos de tubulações, considerando a questão hidráulica e energética. Depende fortemente do custo das tubulações.
	Diâmetro da tubulação	Sim	• Seleção dos diâmetros ótimos de tubulações, considerando a questão hidráulica e energética. Depende fortemente do custo das tubulações.
	Vazão	Sim	• Verificar itens referentes à vazão, no início da tabela.
Somatório dos coeficientes de perdas localizadas (Σk)	Presença de singularidades (válvulas, registros, curvas, etc)	Sim	• Traçado otimizado de adutoras e rede de distribuição; • Seleção e/ou projeto de singularidades inevitáveis com os menores coeficientes de perda possíveis.
	Traçado das tubulações	Sim, porém, depende de outras infra-estruturas (malha viária e ocupação urbana, principalmente), no caso de sistemas já existentes	• Traçado otimizado de adutoras e rede de distribuição.
	Variação da vazão por meio de válvulas	Sim	• Variação da vazão por meio de operação otimizada; • Mudança na rotação da bomba.
η_B	Seleção adequada	Sim	• Escolha do modelo de forma que o ponto de operação esteja localizado o mais próximo possível do ponto de maior rendimento da bomba.
	Uso de equipamentos eficientes	Sim	• Seleção de equipamentos reconhecidamente mais eficientes em termos energéticos, com base em programas de etiquetagem e disponibilidade no mercado local.
	Condições de manutenção	Sim	• Manutenção preventiva de forma a se evitarem perdas decorrentes de desgaste de peças, vibrações e outros problemas.
η_M	Seleção adequada	Sim	• Escolha do modelo de forma que o ponto de operação esteja localizado o mais próximo possível do ponto de maior rendimento da bomba.
	Uso de equipamentos eficientes	Sim	• Seleção de equipamentos reconhecidamente mais eficientes energeticamente, com base em programas de etiquetagem e disponibilidade no mercado local.
	Condições de manutenção	Sim	• Manutenção preventiva de forma a se evitarem perdas decorrentes de desgaste de peças e outros problemas.

Tabela 13 – Variáveis e fatores que influenciam o consumo de energia em SAAs (continuação)

Variável	É influenciado por quais variáveis?	É tecnicamente viável/possível alterar a variável?	Formas de alteração das variáveis
$\Delta\tau$	Demanda e consumo	Sim	• Mudança de hábitos dos consumidores.
	Capacidade de armazenamento	Sim	• Instalação de novos reservatórios; • Operação otimizada de reservatórios existentes, conferindo flexibilidade ao sistema de forma a possibilitar o melhor arranjo operativo dos conjuntos moto-bomba, sobretudo para redução da demanda.
	Operação do sistema	Sim	• Definição de regras operativas ótimas; • Utilização de sistemas com rotação variável.

3.6 PROPOSTA DE UM CONJUNTO DE INDICADORES DE EFICIÊNCIA HIDRÁULICA E ENERGÉTICA PARA SAAS

O cálculo dos indicadores propostos na tese segue dois modelos matemáticos básicos, expressos pelas equações 19 e 20.

$$I = \frac{S}{VA} \cdot 100 \quad (19)$$

$$I = \frac{VA}{S} \cdot 100 \quad (20)$$

sendo:

I indicador generalizado [%];

S situação (valor atual) do componente/parâmetro analisado [unidade hidráulica, energética, ou percentual];

VA valor-alvo do componente/parâmetro analisado [unidade hidráulica, energética, ou percentual].

Percebe-se que tais modelos são inversos e expressam uma relação percentual entre o valor atual (situação) de determinada variável hidráulica ou energética e o seu valor ótimo (valor-alvo), correspondente à condição de maior eficiência hidráulica ou energética do sistema. Do ponto de vista termodinâmico, a eficiência é uma razão entre a variável que representa a forma de energia que se deseja avaliar como produto do processo em análise em relação à variável que indica a forma de energia assumida como fonte de energia. Dessa forma, pode se apresentar como um valor numérico percentual inferior a 100% em ciclos de potência, mas também com valores superiores a 100% em ciclos de refrigeração, por exemplo. O modelo utilizado em cada indicador proposto e sua interpretação são apresentados durante o desenvolvimento e análise do mesmo, nas seções subsequentes.

O método aqui proposto para avaliação de desempenho, através de taxas relacionando a situação (medida ou observada) do sistema e seus valores-alvo, é uma característica do chamado método robusto de avaliação de desempenho, segundo Rogers e Louis (2009). A métrica de desempenho baseada nesta razão de eficiência fornece uma medida compreensível do desempenho do sistema em relação aos objetivos desejados, permitindo um acompanhamento temporal de sua evolução, enquanto os valores-alvo não são atingidos.

Com base na literatura, o sistema de indicadores de desempenho proposto é classificado

como rígido (medições quantitativas), não financeiro, de processo e de resultados, direcionado a resultados e diagnóstico. A partir da proposta de divisão de SAAs em UAs (seção 3.2), da discretização de seus fluxos hidráulicos e energéticos (seção 3.2 e apêndice A), do equacionamento matemático das relações hidráulicas e energéticas (seção 3.4) e da análise dos fatores influentes sobre estas relações (seção 3.5), é proposto um conjunto de indicadores de eficiência hidráulica e energética para sistemas de abastecimento de água, cujo processo de cálculo é generalizado no fluxograma da Figura 29.

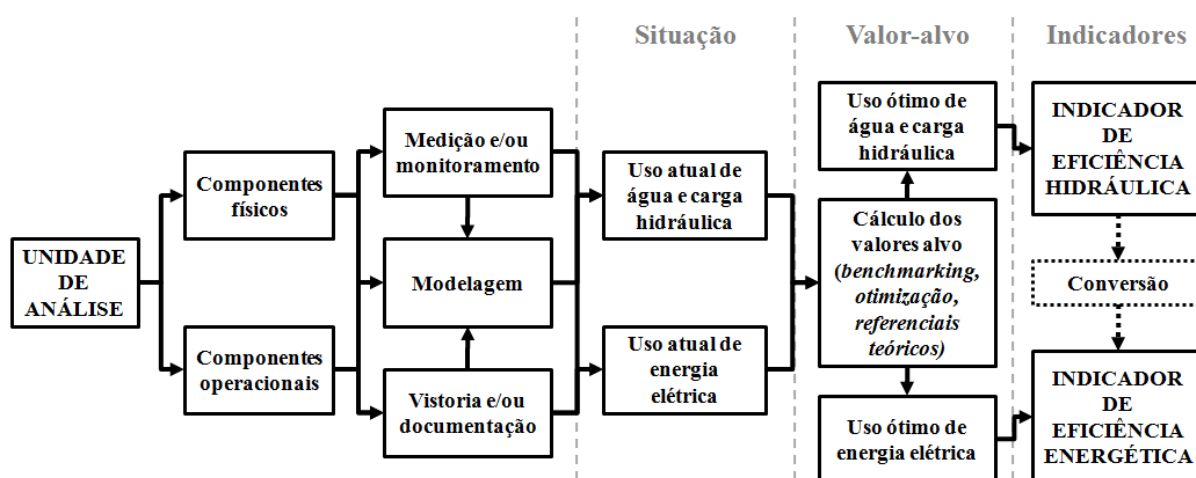


Figura 29 – Etapas de cálculo dos indicadores de eficiência hidráulica e energética

O fluxograma da Figura 29 deve ser interpretado como segue: após discretização do SAA em UAs e seleção da UA a ser analisada, são identificados a partir dos fluxogramas hidráulicos e energéticos os componentes físicos (por exemplo, bombas, tubulações) e/ou operacionais (por exemplo, operação dos níveis de reservatórios e pressões na rede), relacionados ao consumo de água e energia através das variáveis descritas na Tabela 13. A partir de medição, monitoramento, vistorias e/ou modelagem, tais parâmetros e variáveis são convertidos em valores atuais de uso da água e energia (consumos, demandas, cargas), que quantificam o nível de utilização destes recursos. Utilizando-se de técnicas de otimização, *benchmarking* ou referenciais teóricos, são obtidos na sequência os valores-alvo hidráulicos e energéticos, correspondentes ao melhor uso possível de água, energia hidráulica e elétrica que o sistema pode, teoricamente, apresentar, mediante a implantação de medidas de eficiência hidráulica e energética. Relacionando-se os consumos atuais com os consumos ótimos, através dos modelos das equações 19 e 20, são obtidos os indicadores de eficiência hidráulica e energética para o componente atualizado.

Percebe-se na Figura 29 que um indicador de eficiência hidráulica pode ser convertido

em um indicador de eficiência energética, conversão esta representada pelas setas e bloco pontilhados. Um exemplo dessa conversão refere-se à economia energética proveniente da eliminação de vazamentos, que, inicialmente, seriam quantificados por meio de um indicador puramente hidráulico, porém, com conteúdo energético implícito. A Tabela 14 apresenta a descrição geral dos indicadores propostos, que são detalhados nas seções subsequentes.

Tabela 14 – Conjunto de indicadores de eficiência hidráulica e energética proposto

Título do indicador e símbolo	Refere-se a quais parâmetros do equacionamento hidroenergético	Descrição	Natureza	UAs às quais é aplicável
Operação otimizada de bombeamento I_{OoB}	Vazão bombeada (Q), altura total de elevação do sistema (H), rendimento da bomba (η_B), rendimento do motor (η_M)	Quantifica a redução possível no consumo e demanda de energia elétrica por meio da operação otimizada dos conjuntos moto-bomba, considerando variação da velocidade (rotação)	Energética	Todas as estações de bombeamento do sistema
Recuperação de energia hidráulica I_{REH}	-	Quantifica a capacidade do sistema em auto-atender seu consumo e demanda de energia elétrica através do aproveitamento do potencial hidrelétrico do manancial, através da vazão (água bruta) e carga hidráulica que adentra na ETA	Energética	Interface entre adução de água bruta e ETA
Carga hidráulica disponibilizada I_{CHD}	Este indicador pode ser utilizado em análises de diferentes UAs e componentes, podendo se associar desde à altura geométrica de elevação de estações de bombeamento, até às pressões em redes de distribuição	Relaciona as pressões disponibilizadas nos pontos críticos (de máxima e mínima pressão), sob as condições de máxima e mínima demanda) de determinada rede ou setor, de acordo com os padrões definidos em norma, de acordo com a carga hidráulica disponibilizada para esta rede (por bombeamento ou reservatório)	Hidráulica, com repercussões energéticas diretas	Pode ser aplicado em praticamente todas as interfaces entre UAs
Indicador de eficiência hídrica IEH	Vazão bombeada (Q)	Propõe-se não um aprimoramento dos indicadores de perdas de água, de forma a se considerar características dos sistemas de abastecimento influentes sobre tais perdas. Além disso, o indicador proposto propõe-se a definir uma melhor base para comparações dos índices de perdas entre diferentes sistemas, permitindo o estabelecimento de metas de redução mais realistas. Para tanto, é utilizada a técnica de análise envoltória de dados	Hidráulica, com repercussões energéticas diretas	Sistema como um todo.

3.7 DETALHAMENTO DOS INDICADORES PROPOSTOS

Detalha-se nessa seção o conjunto de indicadores proposto na Tabela 14.

3.7.1 INDICADOR DE OPERAÇÃO OTIMIZADA DE BOMBEAMENTO

As estações de bombeamento de sistemas de abastecimento de água geralmente operam com múltiplos conjuntos moto-bomba iguais, associados em paralelo (//) e com rotação constante (Figuras 30 e 31). Com isso, os conjuntos atuam em modo “liga-desliga”, ou seja, em pontos de operação fixos, sendo associados em função da variação da demanda de água. Teoricamente, essa associação fornecerá uma pressão constante (igual para todas as bombas), e a vazão corresponderá à soma das vazões unitárias de cada bomba, extraídas de suas curvas individuais.

Esse tipo de associação tradicional impede que os níveis de pressão e vazão demandados pelo sistema sejam atendidos de forma exata, uma vez que tais variáveis podem ser consideradas contínuas, ao passo em que a operação de conjuntos moto-bomba em paralelo com rotação constante fornece valores discretos de pressão e vazão. Essa condição normalmente resulta num excedente de vazão, pressão e, conseqüentemente, de potência/consumo elétrico consumido pelos conjuntos moto-bomba em relação àquelas efetivamente demandadas pelo sistema. Tais excedentes hidráulicos são, muitas vezes, absorvidos por reservatórios.

Outro problema relacionado a esse tipo de associação reside na operação das bombas fora de seu ponto de máxima eficiência (PME) (Figura 32). Nesse modelo tradicional de operação, normalmente são utilizadas válvulas ou *by passes* quando se busca uma melhor regulação da vazão bombeada, alternativas estas energeticamente ineficientes.

Na busca pela otimização operativa de estações de bombeamento, uma importante alternativa é a utilização de sistemas com rotação variável, geralmente obtida através do uso de inversores de frequência⁴⁶ nos motores. Ao se alterar a rotação de uma bomba, altera-se também sua curva característica (vazão, altura manométrica e potência absorvida). Para pontos homólogos (de mesmo rendimento), são definidas as chamadas equações de similaridade, que relacionam a proporção entre a rotação original e alterada e sua influência sobre os parâmetros hidráulicos da bomba, conforme equações (21) a (23) e Figura 33.

⁴⁶ Conversores de frequência são equipamentos micro-processados que permitem variar a velocidade de rotação de motores de indução trifásicos (GOMES, 2009b).

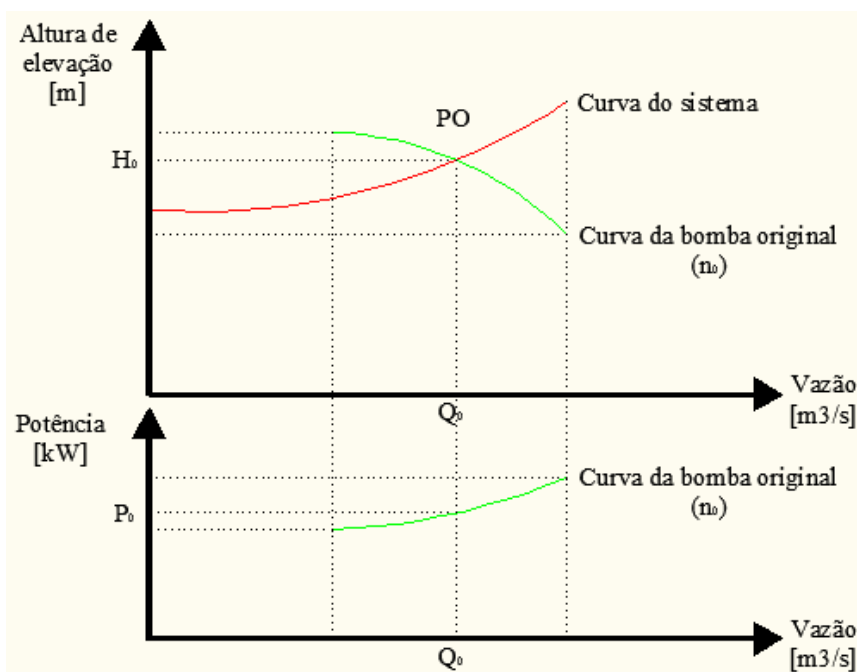


Figura 30 – Curva característica de uma bomba radial operando com rotação constante (n_0)

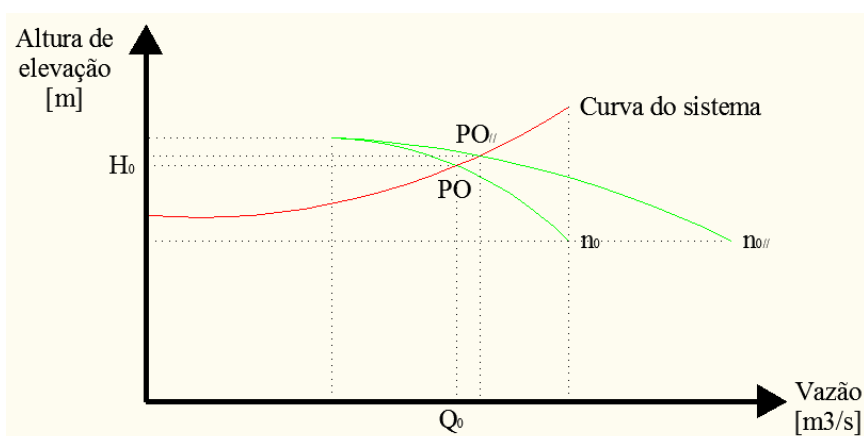


Figura 31 – Curva característica de uma associação de duas bombas centrífugas iguais em paralelo (//) operando com rotação constante (n_0)

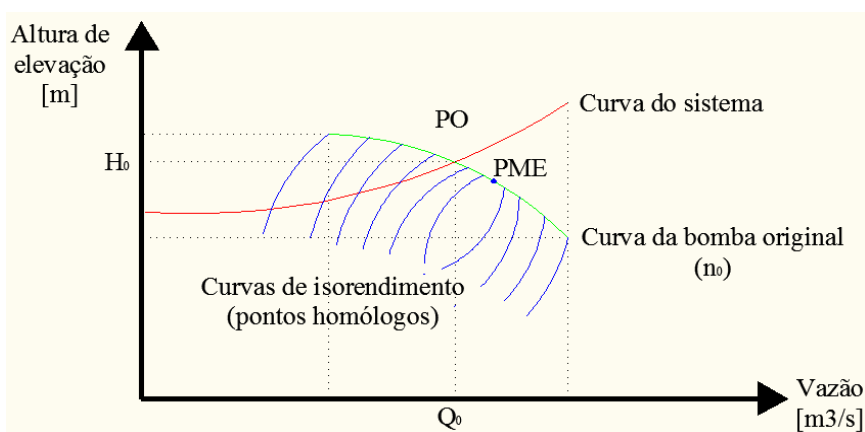


Figura 32 – Curvas de isorendimento características de uma bomba centrífuga

$$\frac{Q_n}{Q_0} = \frac{n_n}{n_0} \quad (21)$$

$$\frac{H_n}{H_0} = \left(\frac{n_n}{n_0} \right)^2 \quad (22)$$

$$\frac{P_n}{P_0} = \left(\frac{n_n}{n_0} \right)^3 \quad (23)$$

sendo:

- Q_n vazão referente à rotação alterada n_n [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$];
 Q_0 vazão original ou nominal referente à rotação n_n [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$];
 n_n rotação alterada [rpm];
 n_0 rotação original ou nominal [rpm];
 H_n altura manométrica referente à rotação alterada n_n [m];
 H_0 altura original ou nominal referente à rotação n_0 [m];
 P_n potência absorvida (de eixo) referente à rotação alterada n_n [W];
 P_0 potência absorvida (de eixo) original ou nominal referente à rotação n_0 [W].

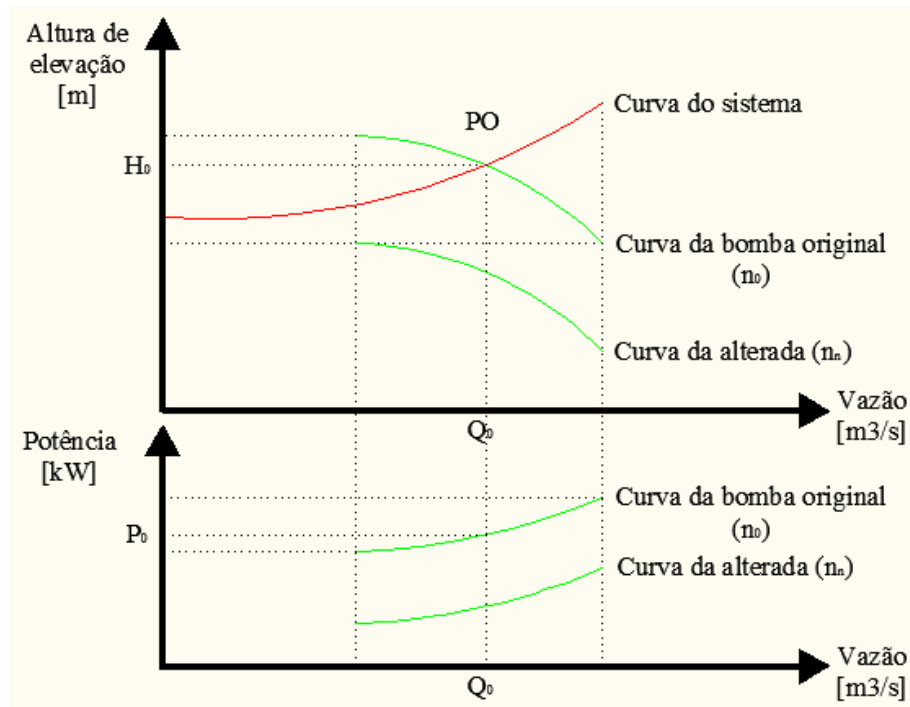


Figura 33 – Curva característica de uma bomba centrífuga operando com rotação variável (n_n)

De acordo com as equações 21 a 23, o universo de pontos de operação ($Q_0 \times H_0$) possíveis para uma bomba, que está inicialmente restrito aos pontos da sua curva original ($H_0 = f(Q_0)$), é expandido para uma superfície de possibilidades ($H_n = f(Q_n, n_n)$), conforme Figura 34. A potência absorvida pela associação corresponderá, teoricamente, à soma das potências individuais absorvidas por cada bomba.

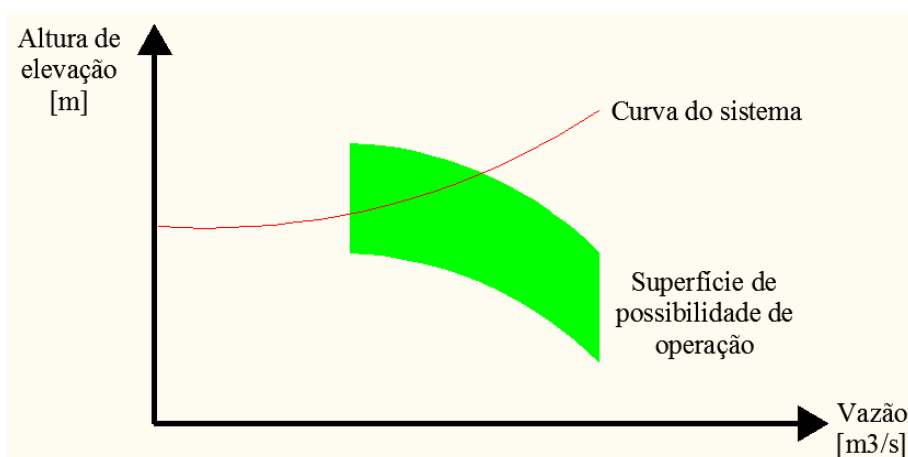


Figura 34 – Superfície de possibilidades de operação de uma bomba centrífuga decorrente da variação da rotação

Vale ressaltar que, sempre que possível, conjuntos moto-bomba operando com velocidades variáveis e/ou associados devem ser ensaiados sob tais condições, uma vez que estas podem acarretar variações de seu comportamento hidráulico em relação ao original (com rotação constante e operando isoladamente). Por exemplo, o rendimento real de uma bomba operando com rotação variável, mesmo quando consideradas as equações de similaridade – que implicam teoricamente na definição de pontos homólogos, com mesma eficiência – pode diferir do valor calculado, havendo na literatura equações que permitem a sua correção.

O mesmo raciocínio é válido para o rendimento da bomba que, considerando-se a curva original da bomba sob rotação constante, pode ser equacionado em função apenas da vazão ($\eta_{B0} = f(Q_0)$). Ao se gerar a superfície de possibilidades de operação através da variação da velocidade, o rendimento pode ser equacionado como uma função da vazão e da altura de elevação ($\eta_{Bn} = f(Q_n, H_n)$) (Figura 35).

A expansão da quantidade de pontos de operação de uma bomba proporcionada pela variação da velocidade é válida, também, para a associação em paralelo (//) de múltiplas máquinas. O universo de pontos de operação da associação, antes restrito aos pontos de curvas resultantes da combinação das curvas originais de cada bomba, é transformado através

das equações 21 a 23 em uma superfície de possibilidades significativamente mais ampla, conferindo maior flexibilidade à operação do sistema, conforme Figura 36.

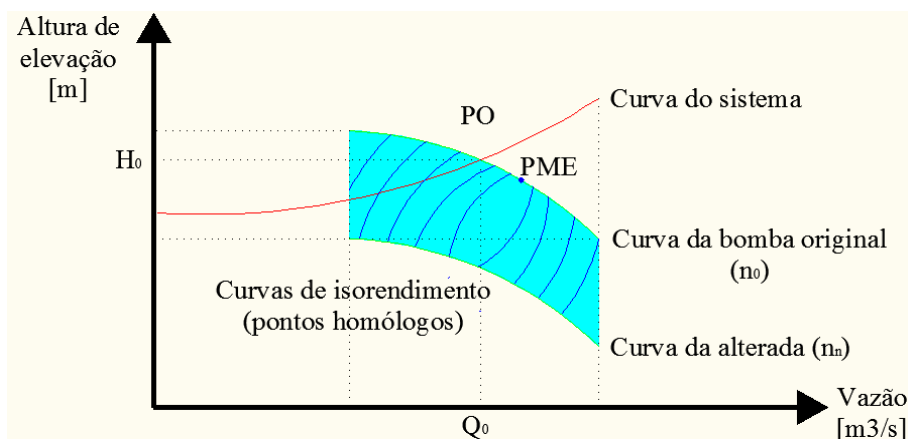


Figura 35 – Superfície de possibilidades de rendimento de uma bomba centrífuga decorrente da variação da rotação

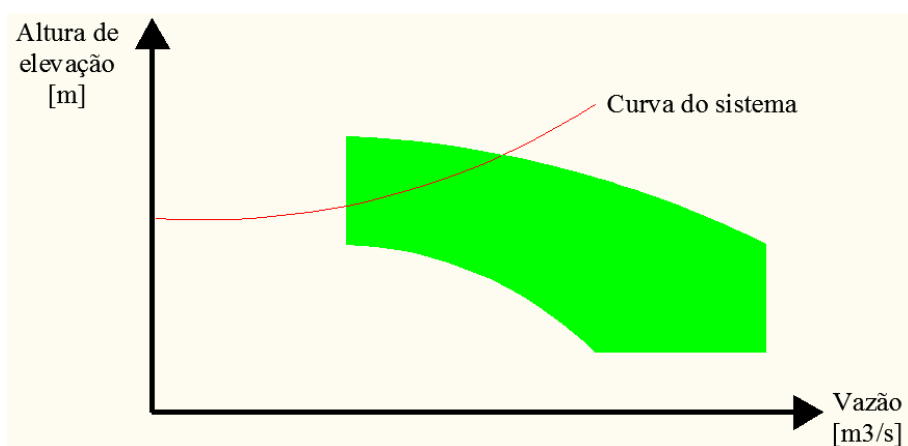


Figura 36 – Superfície de possibilidades de operação de uma associação em paralelo de duas bombas centrífugas decorrente da variação da rotação

Considerando-se a equação do sistema (equação (16)), cada ponto da curva (Q_{DS} , H_{DS}) definido pela vazão demandada pelo sistema (Q_{DS}) e sua respectiva altura de elevação ($H_{DS} = f(Q_{DS}^2)$), atendido por um ponto de operação (Q_0 , $H_0 = Q_{DS}$, H_{DS}) de uma bomba com rotação constante (n_0) ou de uma associação de bombas com rotação constante, pode ser atendido de forma ótima (com a menor demanda e consumo de energia elétrica) através de um ponto de operação (Q_n , $H_n \cong Q_{DS}$, H_{DS}) obtido pela variação da velocidade (n_n) de uma bomba ou associação de múltiplas bombas com rotação variável.

3.7.1.1 Definição do valor-alvo do indicador de operação otimizada de bombeamento

A definição do valor-alvo do indicador de operação otimizada é feita através de um problema de otimização, no qual se busca minimizar a potência elétrica demandada (e consequentemente o consumo energético) pela estação de bombeamento (P_{DS}), atendendo à demanda de água do sistema (Q_{DS}) e sua respectiva altura de elevação (H_{DS}), de acordo com um padrão temporal de Q_{DS} ⁴⁷. A Figura 37 esquematiza o problema proposto, utilizando o caso de uma estação de bombeamento composta por três conjuntos moto-bomba. A quantidade de conjuntos moto-bomba é definida pelo índice m (no exemplo proposto, $m = 3$), enquanto os parâmetros hidráulicos e energéticos de cada conjunto moto-bomba são definidos pelos índices i ($i = 1, 2, \dots m$). O instante (tempo) é estabelecido pelo índice j , sendo o tempo total definido pelo índice k . Sugere-se que o incremento de j seja de uma hora.

Com base no esquema da Figura 37, pode-se propor o equacionamento básico para a resolução do problema de otimização, como segue (equações 24 a 26).

$$P_{ELij} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q_{ij} \cdot H_{ij}}{\eta_{Bij} \cdot \eta_{Mij} \cdot \eta_{IF}} \quad (24)$$

sendo:

P_{ELij}	potência elétrica consumida pelo conjunto moto-bomba i , no tempo j [W];
ρ	massa específica da água [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$];
g	aceleração da gravidade [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$];
Q_{ij}	vazão da bomba i , no tempo j [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$];
H_{ij}	altura de elevação da bomba i , no tempo j [m];
η_{Bij}	rendimento da bomba i , no tempo j [%];
η_{Mij}	rendimento do motor i , no tempo j [%];

⁴⁷ Para o cálculo do indicador de operação otimizada de bombeamento, este padrão temporal é pré-definido para um período de tempo de análise total (k). Idealmente, visando a aplicação do indicador na tomada de decisões no sistema considerado (para um processo de implantação de medidas de eficiência energética, por exemplo), assume-se que k deveria compreender um período mínimo de um ano, visando a adequada caracterização da variabilidade de Q_{DS} em escalas diária (ao longo das 24 horas do dia), semanal (diferenças dos padrões de consumo principalmente entre os dias úteis e finais de semana) e sazonal (variabilidade do consumo devido às condições climáticas de cada estação). Na prática, porém, poucos SAAs possuem uma estrutura de medição e controle que permita obter séries completas de dados horários num período tão extenso (principalmente dados referentes ao bombeamento, tendo em vista que as vazões totais produzidas e consumidas são geralmente obtidas através de leituras em calhas Parshal e níveis de reservatórios). Dessa forma, cabe ao profissional responsável pelo cálculo do indicador avaliar a disponibilidade de dados e o horizonte de análise k a ser considerado. Sugere-se que, na ausência de séries anuais ou mensais de dados e, assumindo-se insignificante a variabilidade sazonal, seja considerado um k de pelo menos 7 dias, com registros horários, que permita definir um padrão de consumo e bombeamento assumido como esperado (médio) do sistema.

η_{IF} rendimento do inversor de frequência [%].

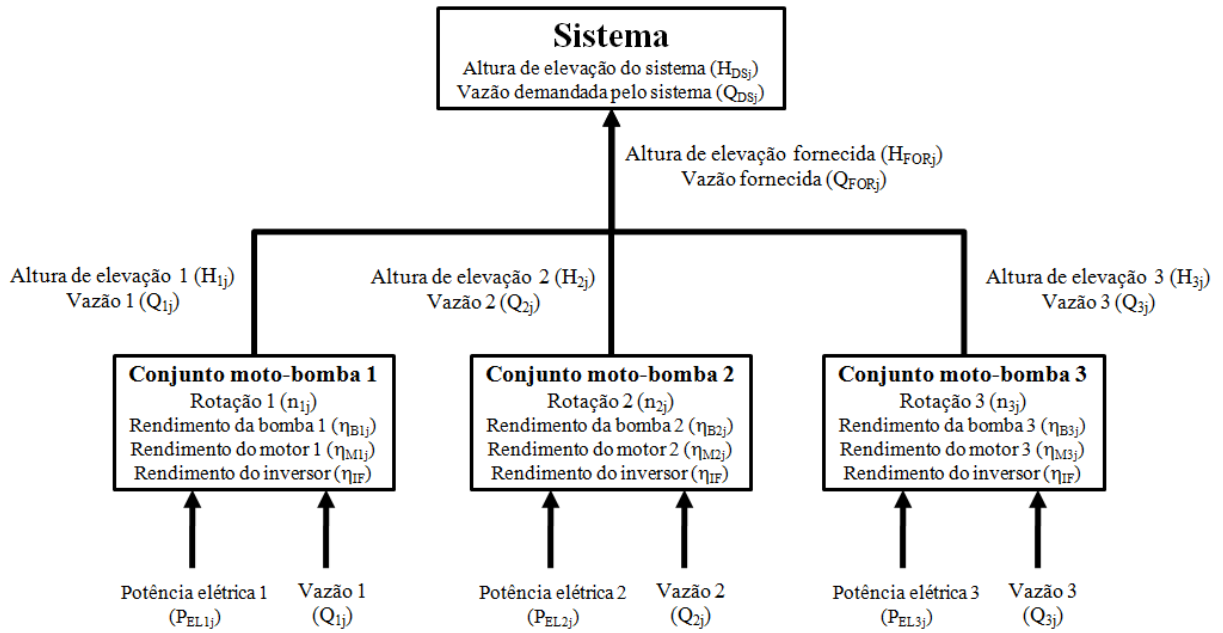


Figura 37 – Esquemática do problema de otimização

$$Q_{FORj} = \sum_{i=1}^m Q_{ij} \quad (25)$$

sendo:

Q_{FORj} vazão fornecida ao sistema no tempo j [$m^3.s^{-1}$];

Q_{ij} vazão da bomba i , no tempo j [$m^3.s^{-1}$].

$$P_{ELTOTj} = \sum_{i=1}^m P_{ELij} \quad (26)$$

sendo:

P_{ELTOTj} potência elétrica total solicitada pela estação de bombeamento no tempo j [W];

P_{ELij} potência elétrica solicitada pelo conjunto moto-bomba i , no tempo j [W].

Com base na teoria da associação de bombas em paralelo, a altura de elevação fornecida (H_{FORj}) em determinado instante será igual à de todas as bombas, no mesmo instante, conforme equação (27).

$$H_{FORj} = H_{ij} \quad (27)$$

sendo:

H_{FORj} altura de elevação fornecida ao sistema no tempo j [m];
 H_{ij} altura de elevação da bomba i , no tempo j [m].

Para implantação do modelo proposto, é necessário obter as expressões matemáticas que representam as superfícies de possibilidades de pontos de operação ($H_{ni} = f(Q_{ni}, n_{ni})$) e as superfícies de possibilidades de rendimento ($\eta_{Bni} = f(Q_{ni}, H_{ni})$) para cada bomba, a partir de suas curvas originais com rotação constante. Para tanto, deve-se inicialmente extrair os parâmetros das curvas originais de cada bomba, conforme Tabela 15.

Tabela 15 – Exemplo de extração de parâmetros da curva original da bomba

Rotação [rpm]	Vazão [$m^3.s^{-1}$]	Altura de elevação [m]	Rendimento da bomba [%]
n_{0i}	$Q_{0i} 1$	$H_{0i} 1$	$\eta_{B0i} 1$
n_{0i}	$Q_{0i} 2$	$H_{0i} 2$	$\eta_{B0i} 2$
n_{0i}	$Q_{0i} 3$	$H_{0i} 3$	$\eta_{B0i} 3$
n_{0i}	$Q_{0i} 4$	$H_{0i} 4$	$\eta_{B0i} 4$
n_{0i}	$Q_{0i} 5$	$H_{0i} 5$	$\eta_{B0i} 5$
n_{0i}	...	...	...

Com base nos dados das curvas originais exemplificados na Tabela 15, pode ser gerada uma nova tabela, a partir das equações de similaridade (equações 21 a 23). Tomando como referência cada rendimento obtido da curva original da bomba, e suas respectivas rotações nominais, serão gerados pontos homólogos através da variação rotação dentro dos limites previstos na literatura, dando-se origem a uma extensa massa de dados, exemplificados na Tabela 16.

Uma vez gerada a massa de dados exemplificada na Tabela 16, pode-se obter as expressões que relacionam a vazão com a altura de elevação e rotação da bomba ($H_{ni} = f(Q_{ni}, n_{ni})$) e o rendimento com a vazão e altura de elevação ($\eta_{Bni} = f(Q_{ni}, H_{ni})$), através da utilização de ferramentas matemáticas e computacionais específicas, que serão descritas durante o desenvolvimento do estudo de caso da pesquisa.

Algumas considerações sobre os limites operacionais e rendimentos das bombas, motores e conversores de frequência são necessárias para o estabelecimento das restrições do problema de otimização:

- Bombas: são considerados os limites de rotação das bombas de 50% e 120% em relação à rotação nominal, conforme determina a norma NBR 6400 (ABNT, 1989). Os mesmos limites são considerados em relação à vazão, referenciados ao seu valor no ponto de máximo rendimento. Os limites de altura fornecida pela bomba são

implícitos no problema de otimização, uma vez que a altura das bombas (operando isoladas ou em paralelo) deve ser igual à altura do sistema no ponto de operação considerado. Ainda assim, para garantia da integridade da máquina, é considerada como altura máxima aquela corresponde à sua altura de *shut off* (vazão nula). Uma vez utilizados tais limites, é assumido que os valores de NPSH requeridos pelas bombas encontram-se compatíveis com os disponíveis, não tendo esta variável sido considerada explicitamente no estudo de caso desenvolvido;

- Motores: na indisponibilidade de curvas de rendimento (fornecidas pelo fabricante ou obtidas por meio de ensaios), os rendimentos dos motores podem ser considerados constantes (equivalentes ao nominal) para condições de carga superiores a 50% da nominal, como indicam os trabalhos de Bernier e Bourret (1999) e Ulanicki *et al.* (2008). No estudo de caso desenvolvido neste trabalho, é considerada a curva de rendimento do motor fornecida pelo fabricante, sendo o carregamento de 50% em relação ao nominal considerado uma das restrições do problema de otimização. É desconsiderada nesse trabalho a redução do rendimento do motor decorrente da variação da rotação, sendo apenas consideradas as perdas relativas ao rendimento do conversor de frequência, conforme descrito a seguir;
- Conversores de frequência: considerando o uso de conversores de frequência associados a motores com potência nominal acima de 100 hp ($\cong 73$ kW), diversos trabalhos sugerem que para altas velocidades em relação à nominal (Rooks e Wallace (2004) e Ulanicki *et al.* (2008), indicando velocidades superiores a 75% da nominal) e carregamentos (acima de 50% do nominal, conforme USDOE, 2008), o rendimento de inversores de frequência pode ser considerado constante, geralmente acima de 95%. Neste trabalho, será considerado o rendimento de 97%.

Através de modelagem hidráulica, pode-se obter a curva do sistema ($H_{DSj} = f(Q_{DSj}^2)$), conforme equação (16). Por meio de medição e monitoramento, e/ou modelagem, é definida a curva característica de demanda hídrica do sistema para o período de análise considerado que, a partir da curva do sistema, pode ser convertida em uma curva de altura requerida pelo sistema.

Tabela 16 – Exemplo de geração de pontos para as superfícies de possibilidades de operação e rendimento

Rendimento da bomba [%]	Rotação [rpm]	Vazão [m ³ .s ⁻¹]	Altura de elevação [m]
η_{B0i} 1	n_{0i}	Q_{0i} 1	H_{0i} 1
η_{B0i} 1	n_{ni} 11	Q_{ni} 11	H_{ni} 11
η_{B0i} 1	n_{ni} 12	Q_{ni} 12	H_{ni} 12
η_{B0i} 1	n_{ni} 13	Q_{ni} 13	H_{ni} 13
η_{B0i} 1	n_{ni} 14	Q_{ni} 14	H_{ni} 14
...	...	...	...
η_{B0i} 2	n_{0i}	Q_{0i} 2	H_{0i} 2
η_{B0i} 2	n_{ni} 21	Q_{ni} 21	H_{ni} 21
η_{B0i} 2	n_{ni} 22	Q_{ni} 22	H_{ni} 22
η_{B0i} 2	n_{ni} 23	Q_{ni} 23	H_{ni} 23
η_{B0i} 2	n_{ni} 24	Q_{ni} 24	H_{ni} 24
...	...	...	...
...	...	...	...

De posse das equações que regem o comportamento hidráulico e energético, pode-se desenvolver a modelagem matemática do problema de otimização, como segue, na qual se assume que as vazões e rotações operacionais são sempre superiores a 50% e inferiores a 120% da condição nominal:

[Função objetivo]: Minimizar P_{ELTOTj} , para $j = 1, 2, 3, \dots, k$

Variando: n_{nij} , para $i = 1, 2, \dots, m$

Restrito a:

$$Q_{FORj} = Q_{DSj}$$

$$H_{FORj} = H_{DSj}$$

$$H_{FORj} = H_{ij}$$

$$n_{nij} \leq 1,2 \cdot n_{0i}$$

$$n_{nij} \geq 0,5 \cdot n_{0i}$$

$$Q_{ij} \leq 1,2 \cdot Q_{iPME}$$

$$Q_{ij} \geq 0,5 \cdot Q_{iPME}$$

$$H_{ij} \leq H_{iSO}$$

$$P_{EIXOij} \geq 0,5 \cdot Pot_{NOMi}$$

sendo:

Q_{iPME} vazão da bomba i no ponto de máxima eficiência [m³.s⁻¹];
 H_{iSO} altura da bomba i no ponto de *shut off* [m];
 P_{EIXOij} potência de eixo do conjunto i , no tempo j [kW];
 Pot_{NOMi} potência nominal do motor i [kW].

O indicador de operação otimizada de bombeamento (I_{OOB}) é, então, dividido e

calculado em duas parcelas, a de potência (I_{OBDP}) e a de consumo (I_{OBC}), determinadas pelas equações 28 e 29.

$$I_{OBD} = \frac{\text{Min}(P_{ELTOTjm})}{P_{ELTOTAjm}} \cdot 100 \quad (28)$$

sendo:

I_{OBD}	indicador de operação otimizada de bombeamento, parcela demanda [%];
jm	índice referente ao momento de maior demanda durante o período de análise;
$\text{Min}(P_{ELTOTjm})$	valor alvo de demanda, referente à demanda otimizada no tempo jm [W];
$P_{ELTOTAjm}$	potência elétrica total atual demandada no tempo jm [W].

$$I_{OBC} = \frac{C_{ELO}}{C_{ELA}} \cdot 100 \quad (29)$$

sendo:

I_{OBC}	indicador de operação otimizada de bombeamento, parcela consumo [%];
C_{ELO}	valor alvo de consumo, referente ao consumo otimizado no período de análise obtido pela integração de $\text{Min}(P_{ELTOTj})$ neste período [Wh];
C_{ELA}	consumo energético atual do período de análise, referente às P_{ELTOTj} [Wh].

3.7.1.2 Interpretação do indicador de operação otimizada de bombeamento

A parcela potência do indicador demonstra a possibilidade de se reduzir a carga máxima do sistema de bombeamento considerado. Assumindo que o consumo de energia majoritário em estações elevatórias é referente aos conjuntos moto-bomba, a parcela potência do indicador pode ser considerada, também, uma estimativa aproximada do potencial de redução da demanda da unidade, devendo ser avaliada de forma específica em cada sistema considerado. A parcela consumo, por sua vez, quantifica o potencial de redução do uso de energia ativa no período de tempo considerado pela análise.

Todas as parcelas do indicador podem assumir três classes de valor:

- $I_{OBD} > 100\%$: indica que o sistema de bombeamento opera no seu ponto de máxima eficiência, e que a inserção de dispositivos de controle de velocidade reduzirá esta eficiência, tendo em vista que deve ser considerado o rendimento do conversor de

frequência e a redução do rendimento do motor em função da variação da velocidade. Nesse caso, a diferença entre o valor do indicador e 100% se aproxima do valor das perdas do conversor de frequência acrescidas das demais perdas de eficiência resultantes do processo de variação da velocidade dos conjuntos;

- $I_{OOB} = 100\%$: indica que o sistema de bombeamento opera ligeiramente abaixo do seu ponto de máxima eficiência. A ineficiência do sistema de bombeamento atual é da mesma ordem de grandeza do valor do rendimento do conversor de frequência acrescido das demais perdas de eficiência resultantes do processo de variação da velocidade dos conjuntos;
- $I_{OOB} < 100\%$: esta é a faixa de valores esperada durante a aplicação do indicador, considerando sistemas de bombeamento antigos e/ou em más condições de manutenção e operação. A diferença entre o valor do indicador e 100% quantifica o potencial de redução de carga e consumo no sistema de bombeamento analisado.

3.7.1.3 Aplicação do indicador de operação otimizada de bombeamento – estudo de caso

O indicador de operação otimizada de bombeamento foi testado na estação de alto recalque de água bruta da Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA) em Itajubá/MG, responsável pela adução de água bruta captada diretamente no Rio Sapucaí até a estação de tratamento. O sistema de captação é composto por duas estações de bombeamento, a saber:

- Sistema de baixo recalque: instalado sobre uma balsa a céu aberto, é responsável por recalcar água bruta do Rio Sapucaí até um poço de sucção, sendo composto por 3 conjuntos moto-bomba. Este sistema não foi considerado na presente pesquisa;
- Sistema de alto recalque: instalado numa casa de máquinas abrigada, é responsável por recalcar água bruta do poço de sucção até uma calha Parshal na entrada da ETA. Composto por 3 conjuntos moto-bomba, é o sistema objeto de estudo desta seção da tese.

A Tabela 17 descreve as características básicas dos conjuntos moto-bomba do sistema de alto recalque.

Tabela 17 – Características básicas dos conjuntos moto-bomba da estação de alto recalque da COPASA/Itajubá

BOMBA	
Quantidade	3
Marca	ESCO
Modelo	16 GMB 3 estágios, eixo vertical
Vazão nominal [m³.h⁻¹]	540,00
Rotação nominal [rpm]	1770
Altura nominal [m]	109,65
Diâmetro da sucção [mm]	250,00
Diâmetro do recalque [mm]	300,00
Diâmetro do rotor [mm]	312,00
NA sucção [m]	839,31
NA recalque [m]	919,70
MOTOR	
Quantidade	3
Marca	WEG
Modelo	KGA 280 C
P_{EL} nominal [kW]	257,42
Tensão [V]	440
Corrente [A]	409
Rotação nominal [rpm]	1.772
Frequência [Hz]	60

Fonte: curvas das bombas e motores originais

A estação de alto recalque opera com 3 conjuntos moto-bomba em paralelo, sendo 2 deles ativos e o terceiro mantido como reserva. Cada bomba possui uma tubulação de sucção de 5,2 m de comprimento, com diâmetro de 250 mm. As tubulações de recalque se unem numa linha de 400 mm de diâmetro que, logo após a casa de bombas se divide em duas adutoras de 350 mm cada, com 3.763 m de comprimento. Para efeito de indexação das equações, o conjunto moto-bomba principal (que opera a maior parte do tempo) é indexado pelo valor “1” (conjunto moto-bomba 1), enquanto o conjunto auxiliar, que opera em paralelo em momentos de alta demanda, recebe o índice 3 (conjunto moto-bomba 3). As curvas e dados originais (fornecidos pelo fabricante) dos conjuntos moto-bomba podem ser apreciados no anexo A.

No ano de 2007 a COPASA/Itajubá contratou um estudo para análise de eficiência energética do seu sistema de captação, durante o qual, foram realizados ensaios para determinação dos rendimentos reais dos conjuntos moto-bomba. Nestes ensaios, foram medidas as potências elétricas absorvidas pelos motores, e calculadas as potências hidráulicas fornecidas através de medições de vazão e pressão nas bombas. A empresa contratada assumiu constante o rendimento do motor (90%), o que permitiu a estimativa da potência de eixo e rendimento da bomba. Para maior refinamento das curvas de rendimento utilizadas nessa tese, foi considerada a curva de rendimento do motor em função do seu carregamento, fornecida pelo fabricante (Figura 111, anexo A), que permitiu obter a função do rendimento

dos motores em função da potência absorvida, conforme Figura 38. No caso estudado, os motores dos dois conjuntos foram considerados iguais.

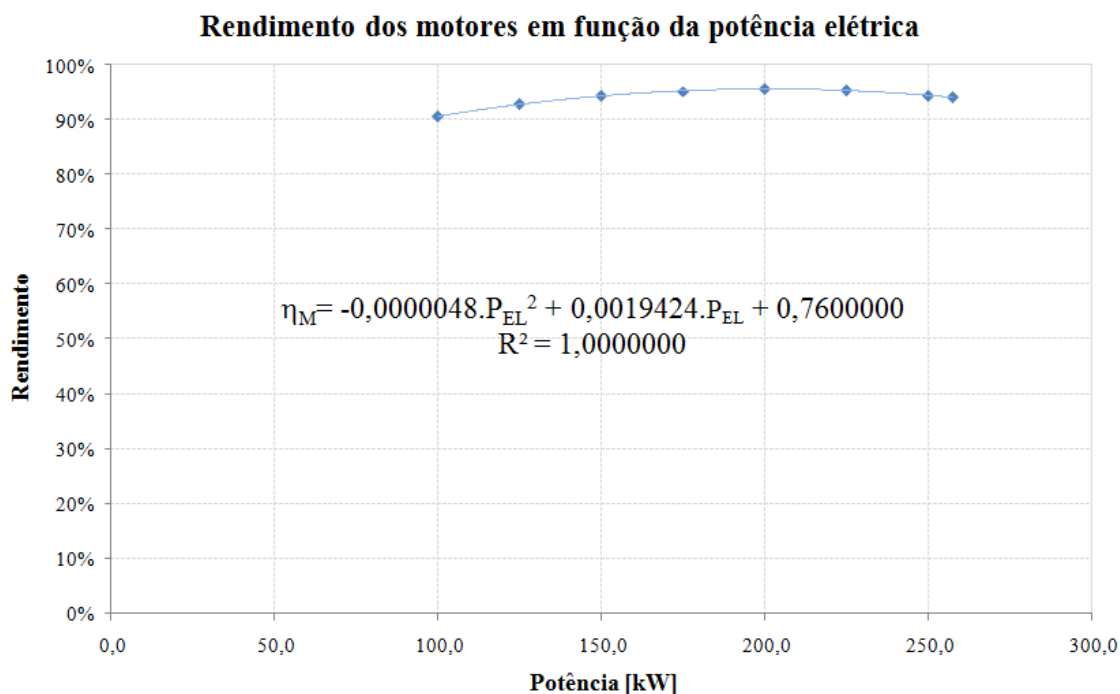


Figura 38 – Rendimento dos motores em função da potência elétrica

Com base nas premissas citadas anteriormente, foram calculadas as curvas das bombas 1 e 3, cujos dados são apresentados nas Tabelas 18 e 19 e os gráficos nas Figuras 39 a 42.

Tabela 18 – Levantamento das curvas do conjunto moto-bomba 1

FABRICANTE 1770 rpm			ENSAIO 1772 rpm		ENSAIO 1770 rpm		RESULTADOS CALCULADOS 1772 rpm				
Q_{B1} [l/s]	H_{B1} [m]	η_{B1} [%]	Q_{B1} [l/s]	H_{B1} [m]	Q_{B1} [l/s]	H_{B1} [m]	P_{EL} [kW]	η_M [%]	P_{EIXO} [kW]	P_{HID} [kW]	η_B [%]
193,40	90,30	82%	193,40	94,20	193,18	93,99	238,87	95,0%	226,95	178,72	79%
179,30	98,70	84%	179,30	101,40	179,10	101,17	234,61	95,2%	223,23	178,36	80%
163,10	105,60	84%	163,10	108,10	162,92	107,86	229,53	95,3%	218,73	172,96	79%
152,50	110,40	84%	152,50	111,70	152,33	111,45	224,77	95,4%	214,45	167,11	78%
117,60	121,50	78%	117,60	118,90	117,47	118,63	202,55	95,7%	193,74	137,17	71%
0,00	144,00	0%	0,00	131,60	0,00	131,30	170,27	95,2%	162,02	0,00	0%

Tabela 19 – Levantamento das curvas do conjunto moto-bomba 3

FABRICANTE 1770 rpm			ENSAIO 1772 rpm		ENSAIO 1770 rpm		RESULTADOS CALCULADOS 1772 rpm				
Q_{B1} [l/s]	H_{B1} [m]	η_{B1} [%]	Q_{B1} [l/s]	H_{B1} [m]	Q_{B1} [l/s]	H_{B1} [m]	P_{EL} [kW]	η_M [%]	P_{EIXO} [kW]	P_{HID} [kW]	η_B [%]
168,00	102,90	84%	168,00	91,00	167,81	90,79	227,70	95,3%	217,10	149,98	69%
143,20	114,00	83%	143,20	103,40	143,04	103,17	216,94	95,5%	207,29	145,26	70%

Tabela 19 – Levantamento das curvas do conjunto moto-bomba 3 (continuação)

FABRICANTE 1770 rpm			ENSAIO 1772 rpm		ENSAIO 1770 rpm		RESULTADOS CALCULADOS 1772 rpm				
Q_{B1} [l/s]	H_{B1} [m]	η_{B1} [%]	Q_{B1} [l/s]	H_{B1} [m]	Q_{B1} [l/s]	H_{B1} [m]	P_{EL} [kW]	η_M [%]	P_{EIXO} [kW]	P_{HID} [kW]	η_B [%]
129,20	117,90	81%	129,20	108,10	129,05	107,86	211,36	95,6%	202,09	137,01	68%
91,40	127,50	70%	91,40	114,80	91,30	114,54	187,42	95,5%	179,07	102,93	57%
67,10	130,20	60%	67,10	120,60	67,02	120,33	166,09	95,0%	157,82	79,39	50%
0,00	144,00	0%	0,00	125,60	0,00	125,32	153,59	94,5%	145,16	0,00	0%

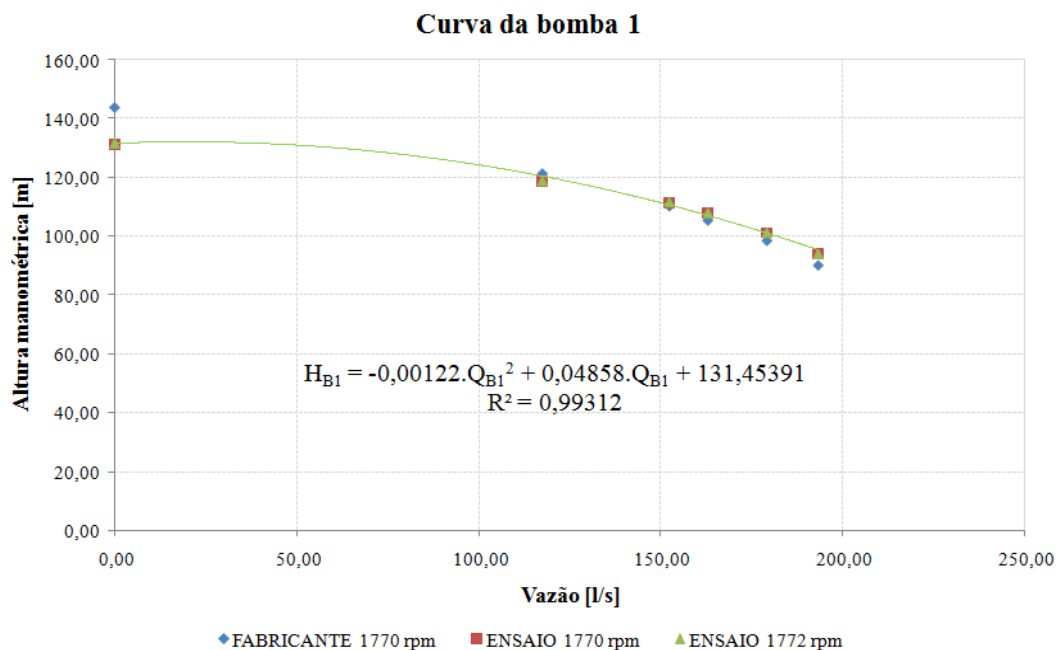


Figura 39 – Curva da bomba 1

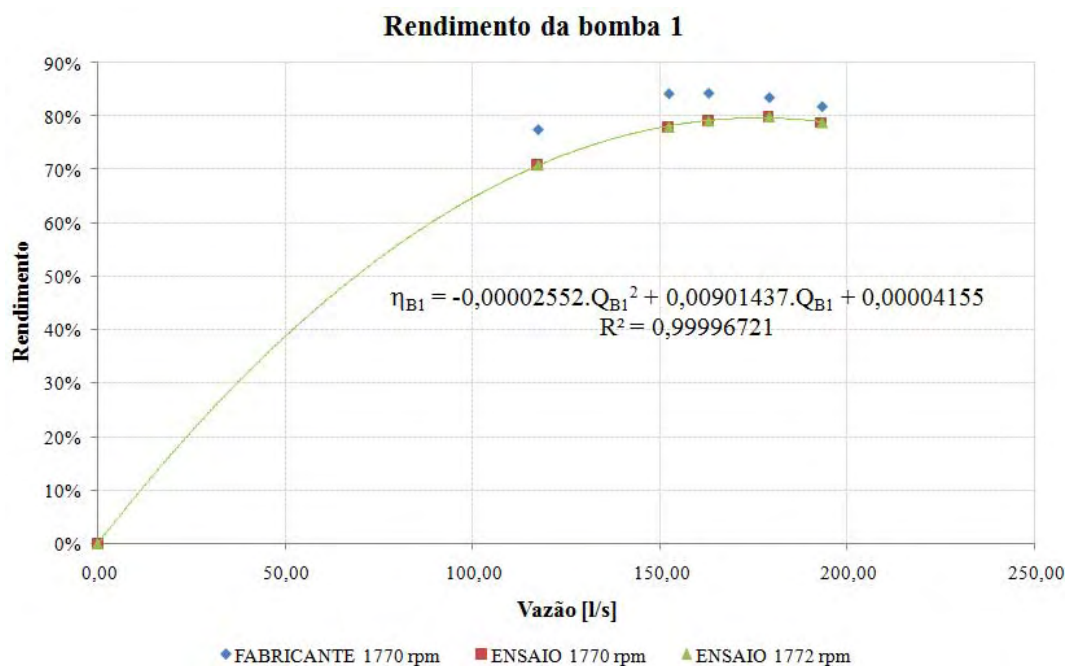


Figura 40 – Curva de rendimento da bomba 1

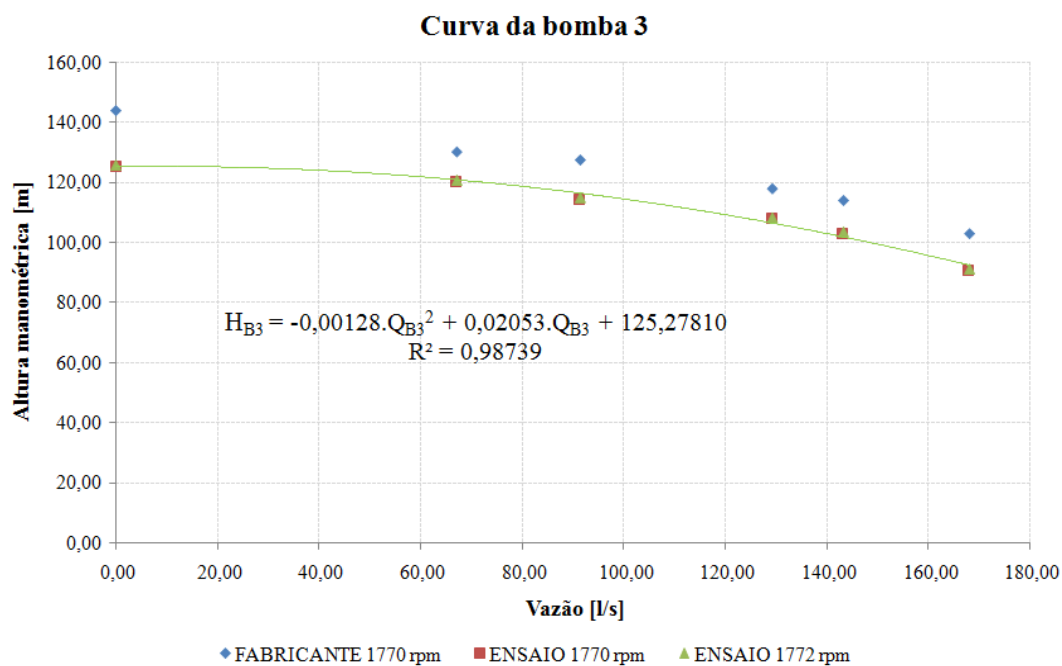


Figura 41 – Curva da bomba 3

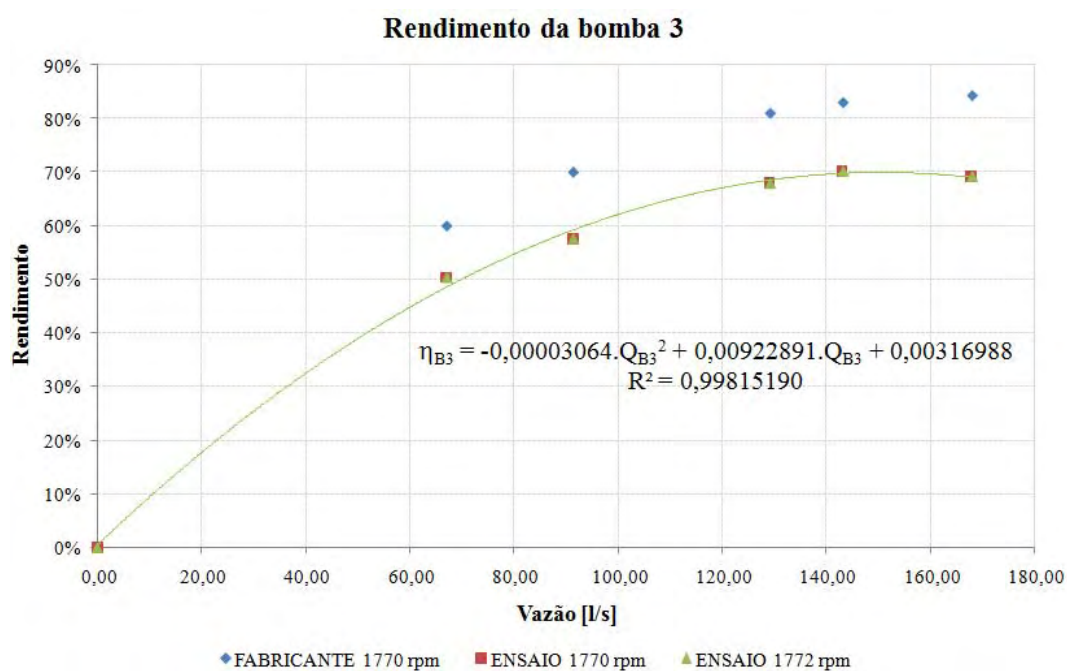


Figura 42 – Curva de rendimento da bomba 3

Com base nas curvas nas curvas individuais das bombas, foi calculada a curva de sua associação em paralelo, apresentada na Figura 43. O rendimento da associação foi elaborado com base na ponderação dos rendimentos individuais sugerida por Gomes (2009b).

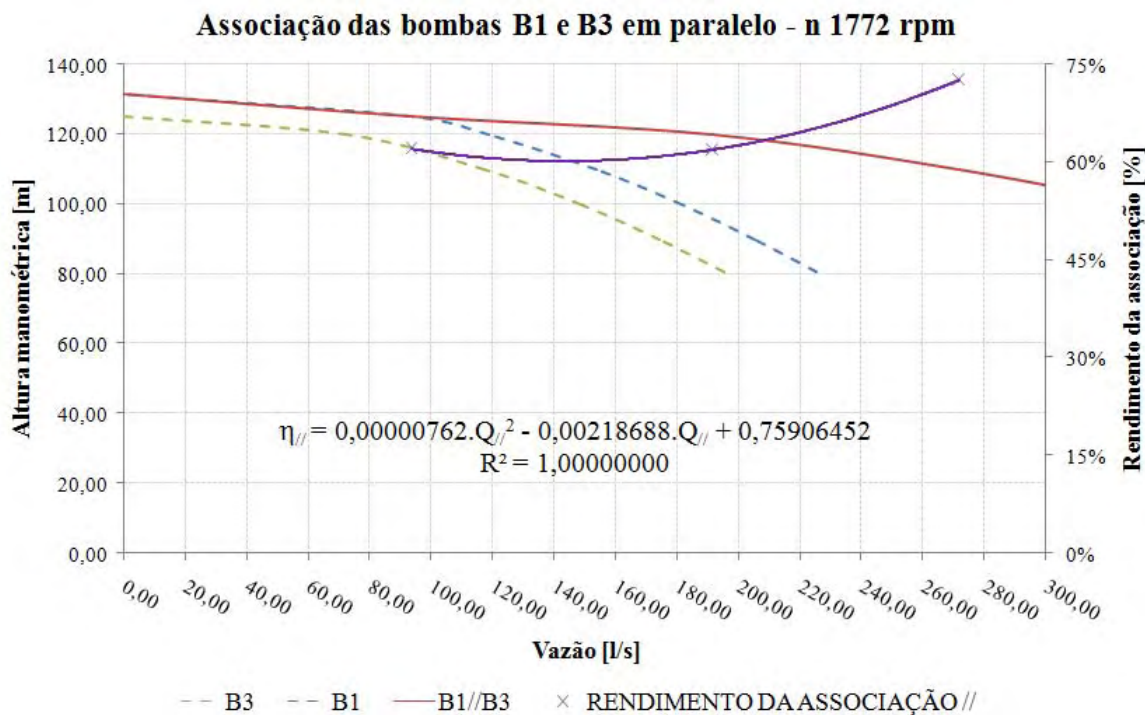


Figura 43 – Curva da associação em paralelo

Devido ao fluxo de cálculos do problema de otimização proposto (no qual as potências de eixo e elétricas são calculadas a partir da potência hidráulica e rendimentos da bomba e motor), foi necessário definir uma função que relaciona a potência de eixo com o rendimento do motor. Essa função foi calculada com base na equação que relaciona o rendimento do motor com sua potência elétrica absorvida (Figura 38), sendo apresentada pela Figura 44.

A curva do sistema a ser considerada foi obtida a partir dos ensaios das bombas 1 e 3, e da modelagem da associação apresentada na Figura 43, com base nos dois pontos de operação (vazões de 174,8 l/s e 235,8 l/s) do sistema, calculados conforme metodologia descrita na continuidade desta seção. A Tabela 20 e Figura 45 apresentam a curva do sistema.

Tabela 20 – Dados da curva do sistema de alto recalque da COPASA/Itajubá

Vazão [m ³ .s ⁻¹]	Altura total de elevação [m]
0,0000	80,39
0,1748	102,70
0,2358	114,90

Para validação da curva do sistema, foi realizada sua plotagem juntamente a um modelo teórico desenvolvido a partir das características físicas do sistema (comprimentos e diâmetros de tubulações, quantidade e características dos acessórios/singularidades) e aplicação das equações 13 a 15. As informações foram obtidas do memorial descritivo do sistema, fornecido

pela COPASA. A modelagem hidráulica para obtenção da curva teórica do sistema foi elaborada considerando os níveis de sucção e recalque fixos (o primeiro é controlado por um vertedouro, e o segundo, é composto por uma descarga livre em nível fixo na calha Parshal da ETA), sendo os cálculos apresentados no apêndice B.

A Figura 46 apresenta uma comparação entre as curvas do sistema obtidas pelo ensaio, modelagem teórica e, também, daquela apresentada no memorial do sistema, que contemplou suas condições originais (datadas do ano de 1978).

Verifica-se na Figura 46 que o modelo considerado (curva verde, obtido através de ensaios) se aproxima satisfatoriamente dos outros dois a ele comparados, sobretudo do modelo teórico elaborado (curva azul). A diferença entre a curva ensaiada (verde) e aquela presente no memorial da COPASA (curva laranja) era esperada, tendo em vista que, na curva ensaiada (curva verde) e no modelo teórico (curva azul), foi considerado o efeito de envelhecimento das tubulações, implícito nas medições e na adoção de rugosidades compatíveis com tubos velhos, o que representa um aumento das perdas de carga em relação ao do memorial.

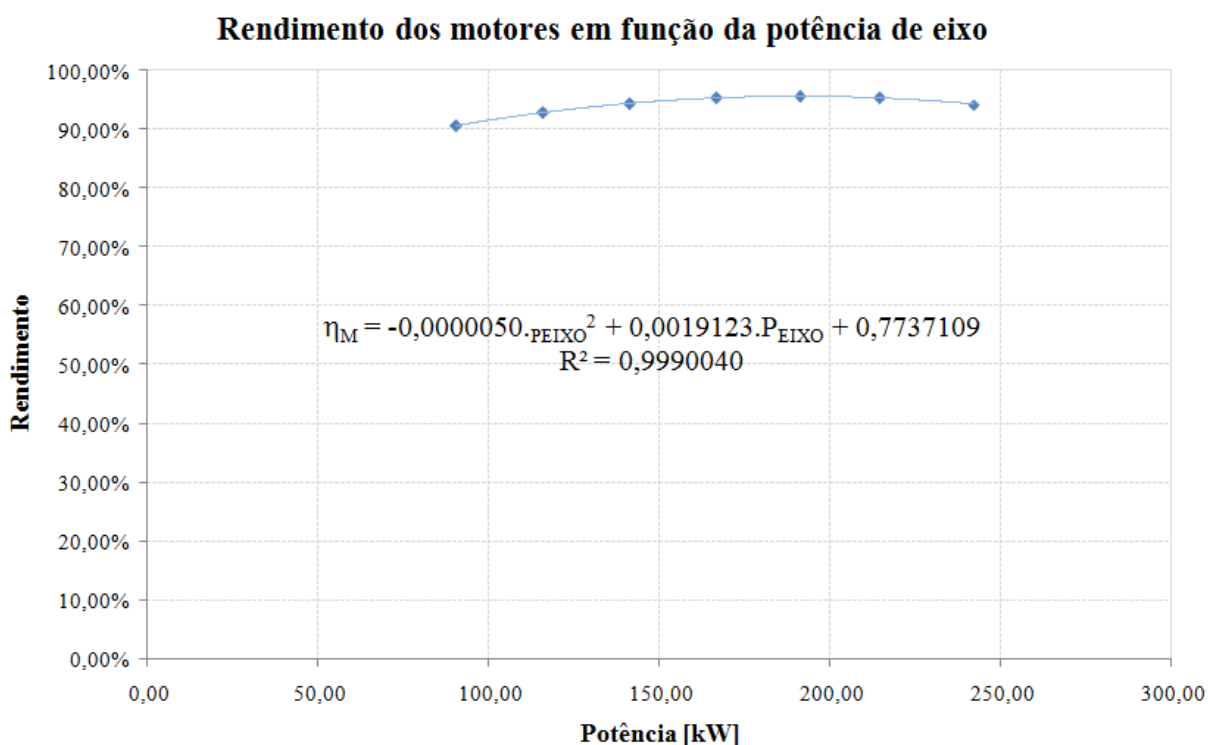


Figura 44 – Rendimento do motor em função da potência de eixo

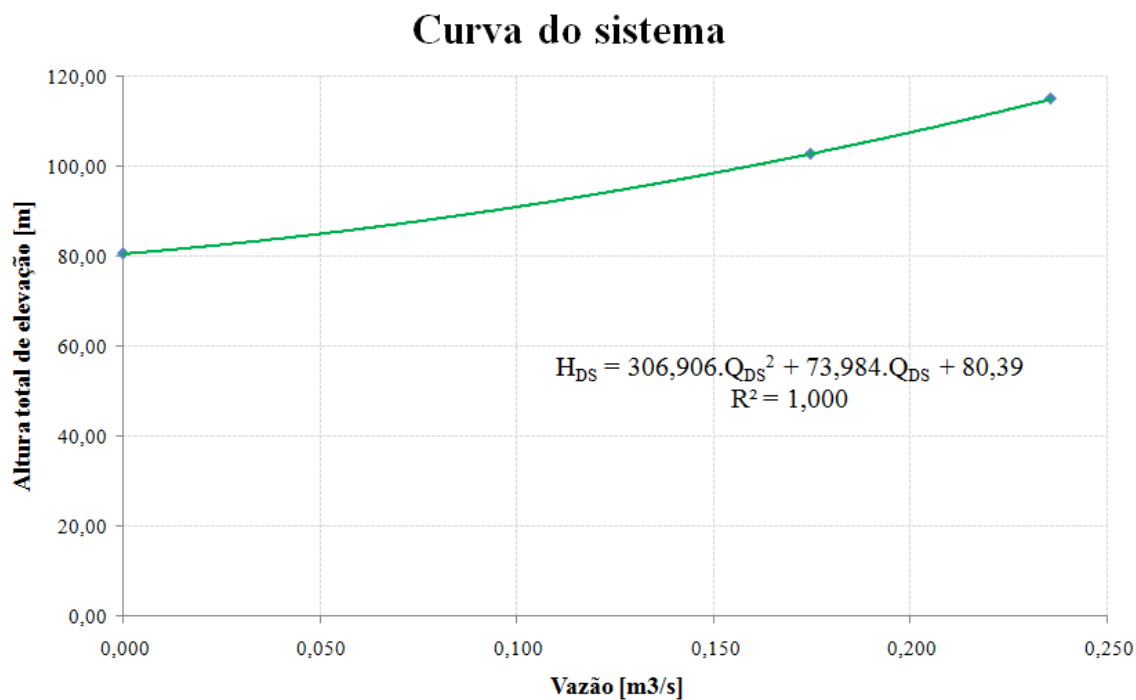


Figura 45 – Curva do sistema de alto recalque da COPASA/Itajubá

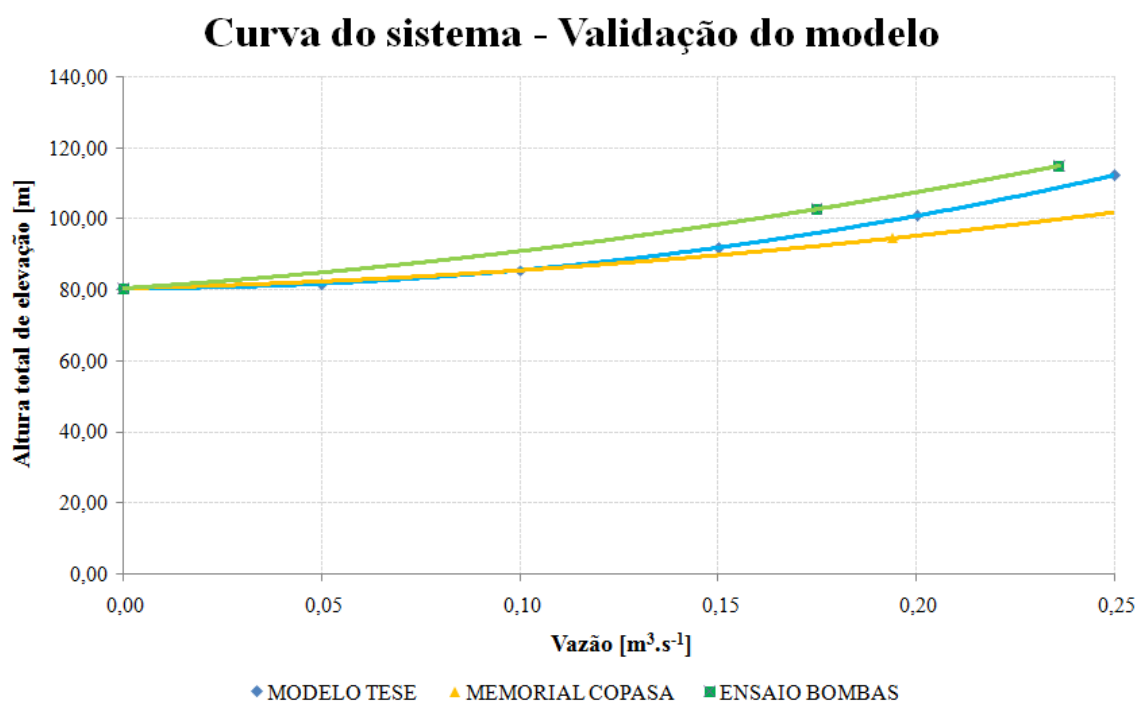


Figura 46 – Validação do modelo de curva do sistema desenvolvido

A restrição básica do problema de otimização proposto é a de que, para cada instante de simulação, a vazão fornecida pelas bombas seja igual à vazão demandada pelo sistema. No caso estudado, considerou-se o padrão de bombeamento da estação de alto recalque de uma

semana (7 dias), referente ao mês de agosto de 2011, medido⁴⁸ pelos funcionários da COPASA para controle interno, sendo os dados apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 – Vazões bombeadas (demandas pelo sistema) pela estação de alto recalque da COPASA/Itajubá

DATA/ HORA	Valores em l/s						
	Segunda- feira 08/08/11	Terça-feira 09/08/11	Quarta- feira 10/08/11	Quinta- feira 11/08/11	Sexta-feira 12/08/11	Sábado 13/08/11	Domingo 14/08/11
0:00	173,0	175,0	176,0	176,0	174,0	174,0	176,0
1:00	173,0	175,0	176,0	175,0	174,0	174,0	176,0
2:00	173,0	175,0	176,0	175,0	174,0	174,0	176,0
3:00	237,0	175,0	176,0	175,0	174,0	174,0	176,0
4:00	237,0	175,0	176,0	175,0	174,0	174,0	176,0
5:00	237,0	175,0	176,0	175,0	235,0	174,0	176,0
6:00	237,0	175,0	233,0	240,0	225,0	174,0	176,0
7:00	237,0	234,0	233,0	240,0	225,0	174,0	176,0
8:00	237,0	234,0	233,0	240,0	225,0	174,0	0,0
9:00	237,0	234,0	233,0	240,0	225,0	174,0	0,0
10:00	237,0	234,0	233,0	240,0	225,0	174,0	0,0
11:00	237,0	234,0	233,0	240,0	225,0	174,0	0,0
12:00	237,0	234,0	233,0	240,0	225,0	174,0	0,0
13:00	237,0	234,0	233,0	240,0	225,0	174,0	0,0
14:00	237,0	234,0	233,0	240,0	225,0	174,0	176,0
15:00	237,0	234,0	285,0	240,0	225,0	174,0	176,0
16:00	237,0	234,0	285,0	240,0	225,0	174,0	176,0
17:00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	174,0	176,0
18:00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	174,0	176,0
19:00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	174,0	176,0
20:00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	174,0	176,0
21:00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	174,0	176,0
22:00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	174,0	176,0
23:00	175,0	175,0	172,0	174,0	172,0	174,0	176,0

Fonte: medições realizadas e fornecidas pela COPASA/Itajubá

A partir de reunião com o supervisor de operação do sistema, estabeleceu-se que o padrão de bombeamento de água bruta pode ser aproximado de uma média para os dias úteis (de segunda a sexta-feira), e que os padrões dos sábados e domingos devem ser analisados separadamente, devido à diferença do padrão de consumo nestes dias. A Figura 47 apresenta os padrões médios de produção de água (bombeamento) calculados.

⁴⁸ Vale salientar que o indicador de operação otimizada de bombeamento se restringe ao sistema de bombeamento, em si. O padrão de vazões bombeadas (fornecidas pelas bombas e demandadas pelo sistema) considerado na simulação é assumido como o aplicável ao caso, podendo, porém, não constituir o padrão ótimo do ponto de vista hidráulico e energético. Em outras palavras, através da otimização da operação dos reservatórios associados ao sistema de bombeamento, é possível otimizar o padrão de vazões demandadas, com base na capacidade de reserva de água e no padrão de consumo da rede. Ao se assumir o atual padrão de bombeamento para o problema de otimização, o caso estudado será constituído pela otimização de dois pontos de operação discretos, descritos no texto.

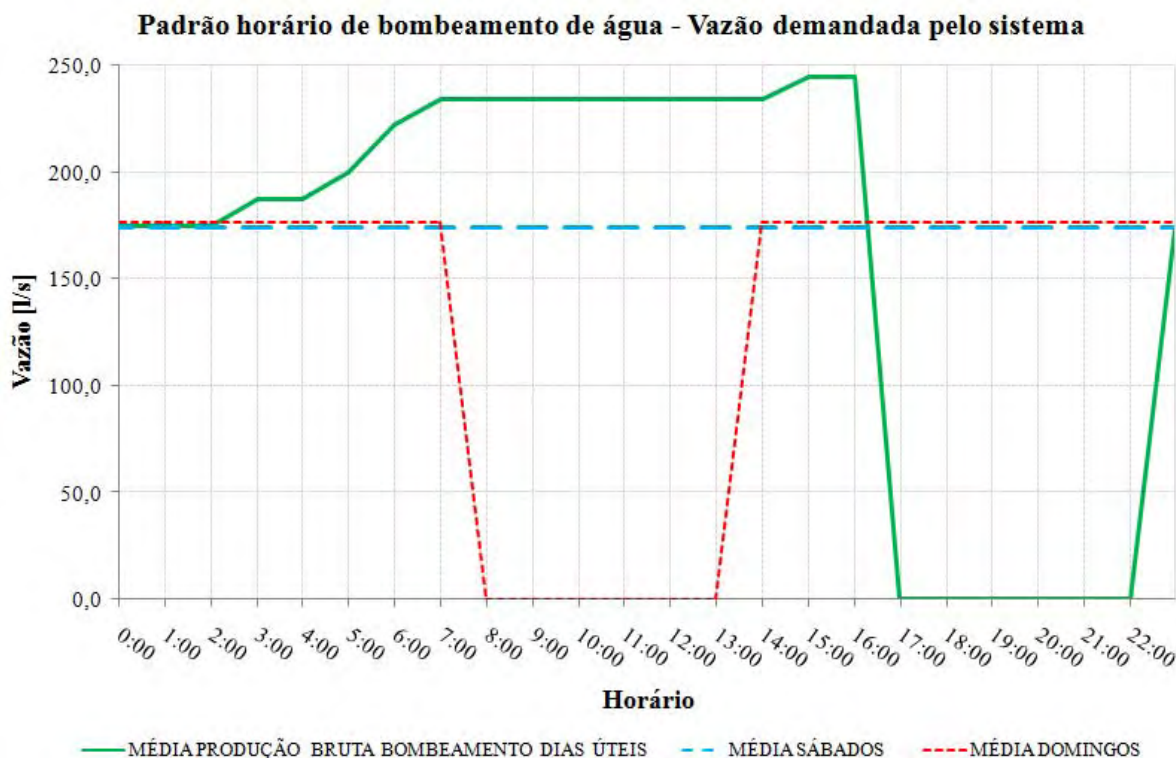


Figura 47 – Padrão horário de bombeamento de água bruta (vazões demandadas pelo sistema)

Percebe-se na Figura 47 o desligamento do sistema de bombeamento durante os dias úteis, no horário de ponta, de forma a se minimizar o custo de energia devido à classe tarifária aplicável ao sistema de alto recalque (tarifa horo-sazonal verde A4, serviço público).

Apesar de expressar de forma mais detalhada a variabilidade da produção de água pelo sistema de alto recalque, a curva de bombeamento para os dias úteis (Figura 47) não retrata a realidade da operação dos conjuntos moto-bomba na sua forma original. Esta operação acontece em dois pontos únicos, sendo o primeiro referente ao conjunto moto-bomba 1 operando isoladamente (para uma vazão média de $174,8 \text{ l.s}^{-1}$), e o segundo referente à associação em paralelo dos conjuntos 1 e 3 (para uma vazão média de $235,8 \text{ l.s}^{-1}$), como pode ser verificado na Tabela 21. A Figura 48 apresenta o padrão de bombeamento médio considerando os dois pontos de operação e suas respectivas vazões médias.

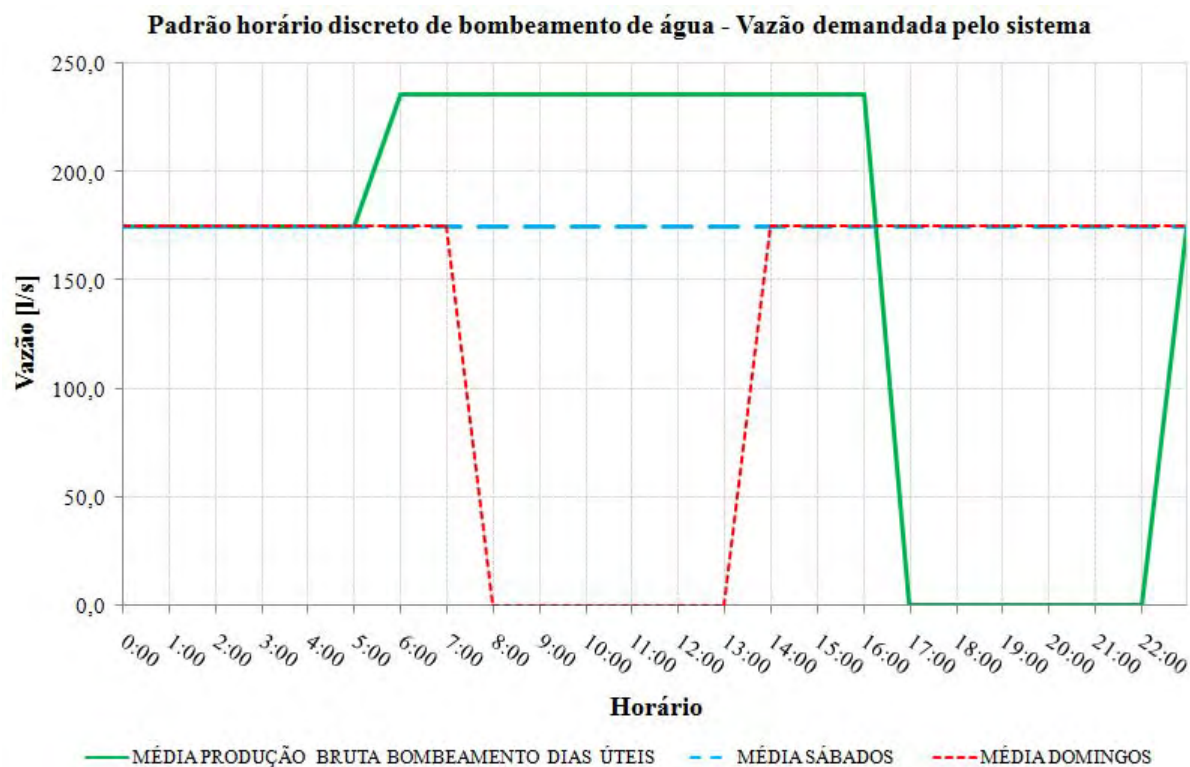


Figura 48 – Padrão horário discreto de bombeamento de água bruta (vazões demandadas pelo sistema)

As Figuras 49 a 51 apresentam os padrões de acionamento dos conjuntos moto-bomba 1 e 3.

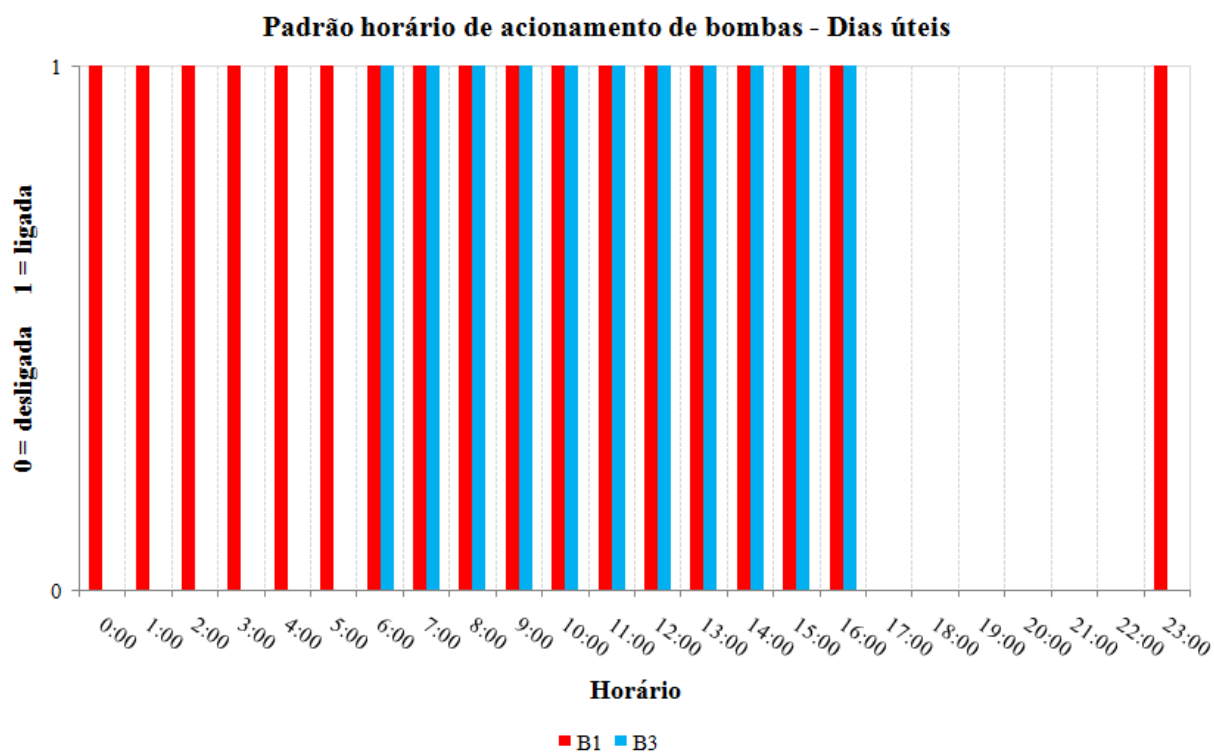


Figura 49 – Padrão horário de acionamento dos conjuntos moto-bomba, dias úteis

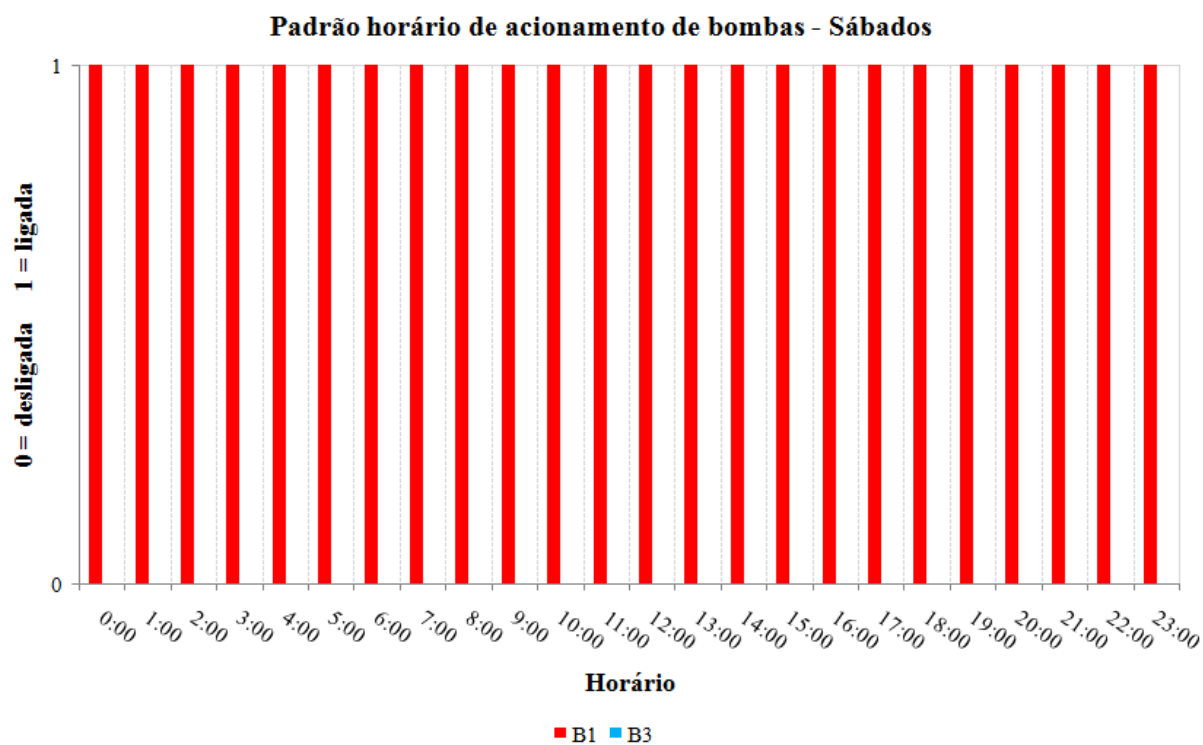


Figura 50 – Padrão horário de acionamento dos conjuntos moto-bomba, sábados

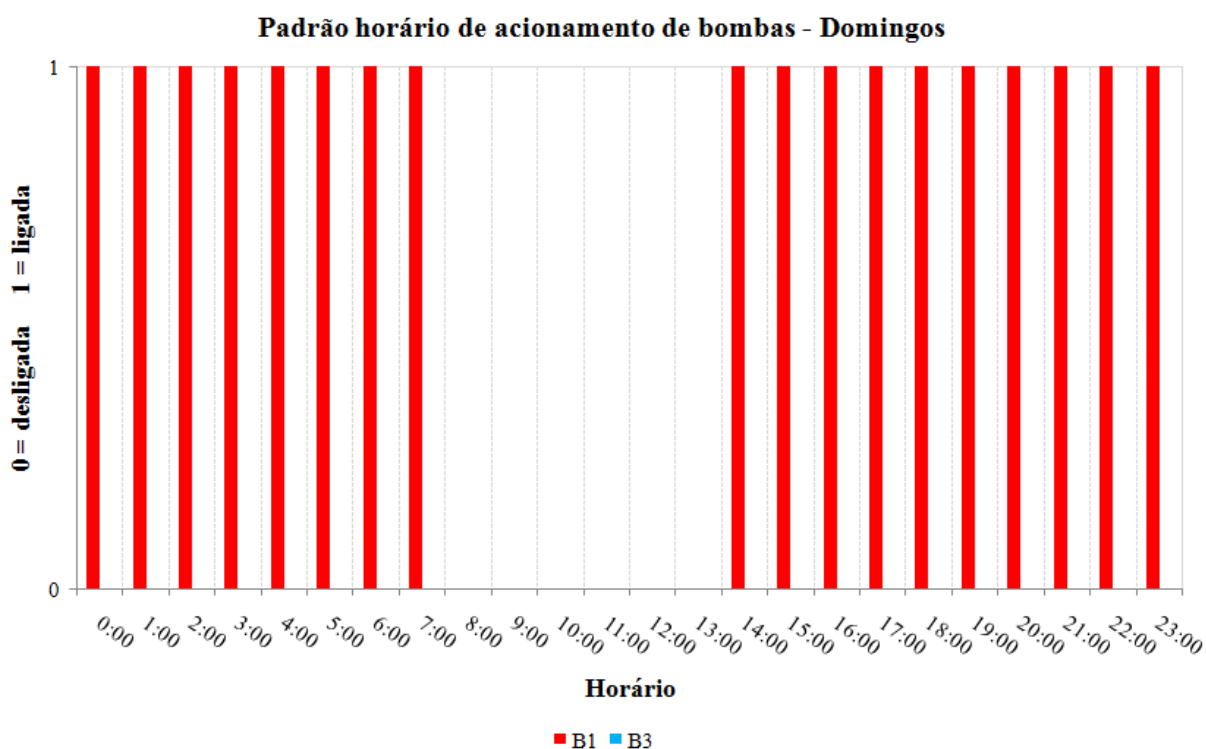


Figura 51 – Padrão horário de acionamento dos conjuntos moto-bomba, domingos

Com base na Figura 46, a equação da curva do sistema é representada pela equação (30).

$$H_{DS} = 306,906 \cdot Q_{DS}^2 + 73,984 Q_{DS} + 80,39 \quad (30)$$

sendo:

H_{DS} altura demandada pelo sistema [m];

Q_{DS} vazão demandada pelo sistema [$m^3 \cdot s^{-1}$].

Para a resolução do problema de otimização, foi necessário obter as funções que referentes à operação dos conjuntos moto-bomba com rotação variável, a partir dos dados apresentados no apêndice F. As funções foram obtidas através da interpolação de superfícies polinomiais, a partir do aplicativo Matlab versão R2010a, e sua ferramenta de interpolação de superfícies (*Curve Fitting Toolbox, Surface Fitting*). Foram obtidas as curvas $H = f(Q^2, n^2)$ e $\eta_B = f(Q^3, H^3)$ para as bombas 1 e 3, conforme equações 31 a 34 e Figuras 52 a 55. Todas as equações obtidas apresentaram coeficientes de determinação (R^2) e coeficientes de determinação ajustados superiores a 0,99, o que indica ajuste satisfatório das funções.

$$H_1 = 0,3087 + 0,00002755 \cdot Q_1 - 0,000459 \cdot n_1 - 0,001216 \cdot Q_1^2 + 0,00002744 \cdot Q_1 \cdot n_1 + 0,00004203 \cdot n_1^2 \quad (31)$$

sendo:

H_1 altura fornecida pela bomba 1 [m];

Q_1 vazão fornecida pela bomba 1 [$l \cdot s^{-1}$];

n_1 rotação da bomba 1 [rpm].

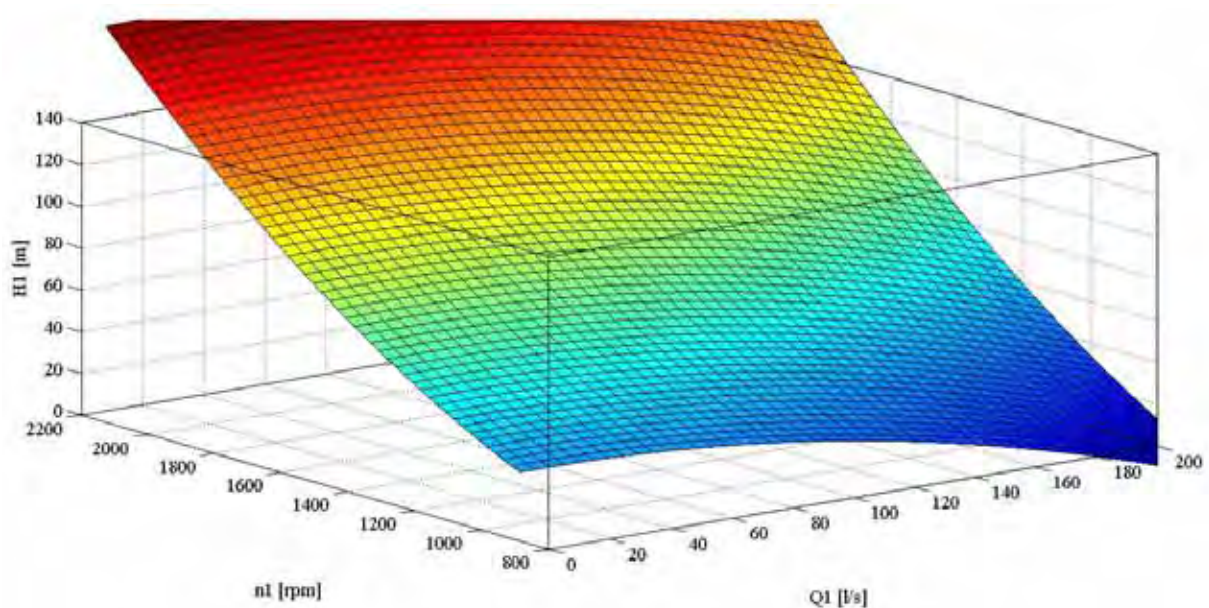


Figura 52 – Altura da bomba 1 com rotação variável

$$\eta_{B1} = 13,74 + 1,483 \cdot Q_1 - 0,3873 \cdot H_1 - 0,008356 \cdot Q_1^2 - 0,001057 \cdot Q_1 \cdot H_1 + 0,003087 \cdot H_1^2 + 0,00001017 \cdot Q_1^3 + 0,0000189 \cdot Q_1^2 \cdot H_1 - 0,00001017 \cdot Q_1 \cdot H_1^2 - 0,000007443 \cdot H_1^3 \quad (32)$$

sendo:

- η_{B1} rendimento da bomba 1 [%];
 Q_1 vazão fornecida pela bomba 1 [l.s^{-1}];
 H_1 altura fornecida pela bomba 1 [m].

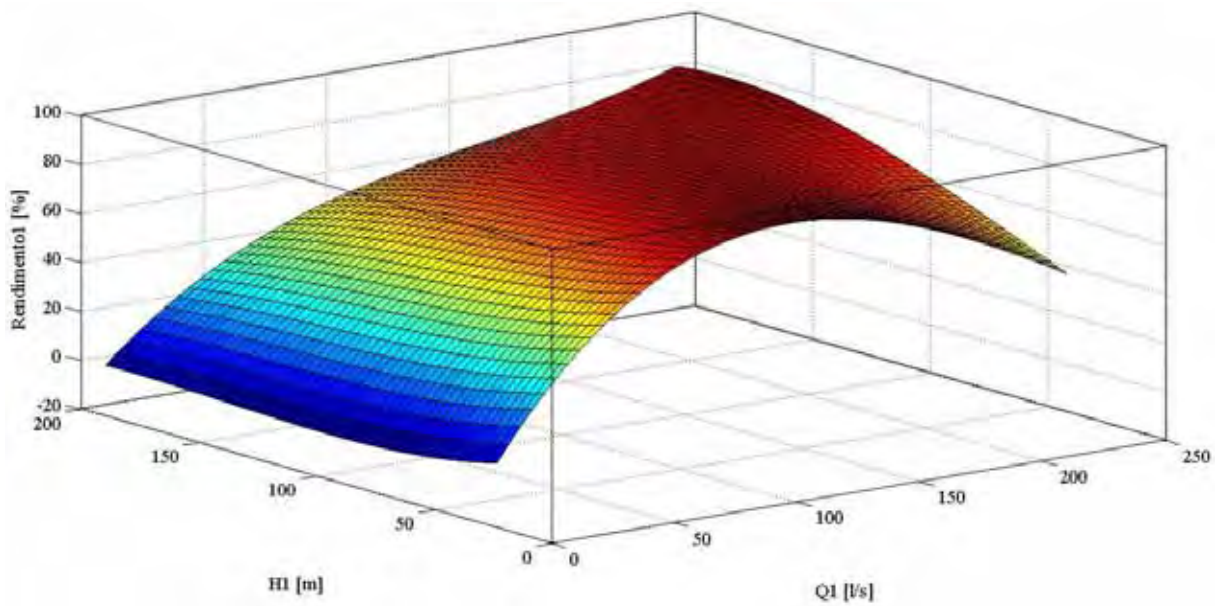


Figura 53 – Rendimento da bomba 1 com rotação variável

$$H_3 = 0,2858 + 0,0009975 \cdot Q_3 - 0,000466 \cdot n_3 - 0,001285 \cdot Q_3^2 + 0,00001114 \cdot Q_3 \cdot n_3 + 0,00004007 \cdot n_3^2 \quad (33)$$

sendo:

- H_3 altura fornecida pela bomba 3 [m];
 Q_3 vazão fornecida pela bomba 3 [l.s^{-1}];
 n_3 rotação da bomba 3 [rpm].

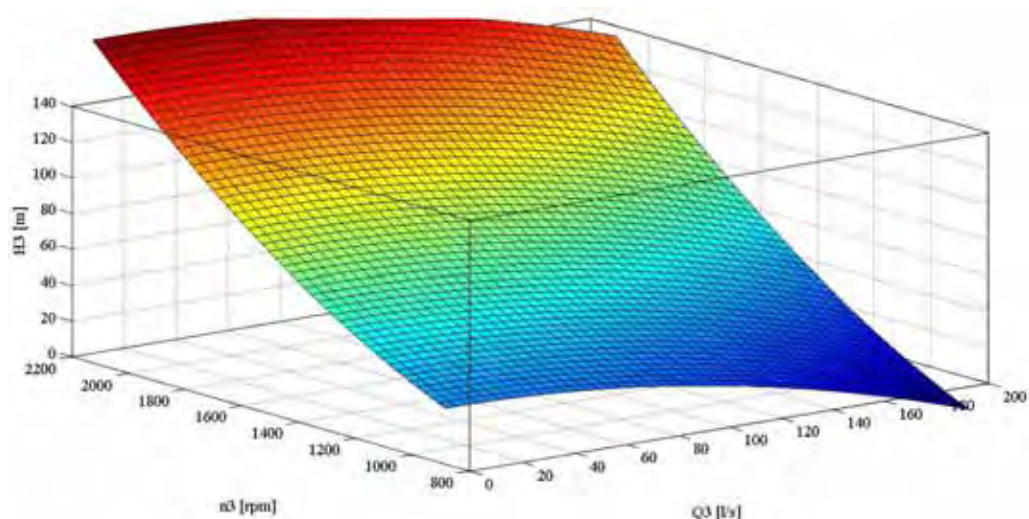


Figura 54 – Altura da bomba 3 com rotação variável

$$\eta_{B3} = 13,89 + 1,485 \cdot Q_3 - 0,337 \cdot H_3 - 0,009772 \cdot Q_3^2 - 0,001035 \cdot Q_3 \cdot H_1 + 0,002163 \cdot H_3^2 + 0,00001347 \cdot Q_3^3 + 0,00002463 \cdot Q_3^2 \cdot H_3 - 0,00001212 \cdot Q_3 \cdot H_3^2 - 0,000003736 \cdot H_3^3 \quad (34)$$

sendo:

- η_{B3} rendimento da bomba 3 [%];
 Q_3 vazão fornecida pela bomba 3 [l.s^{-1}];
 H_3 altura fornecida pela bomba 3 [m].

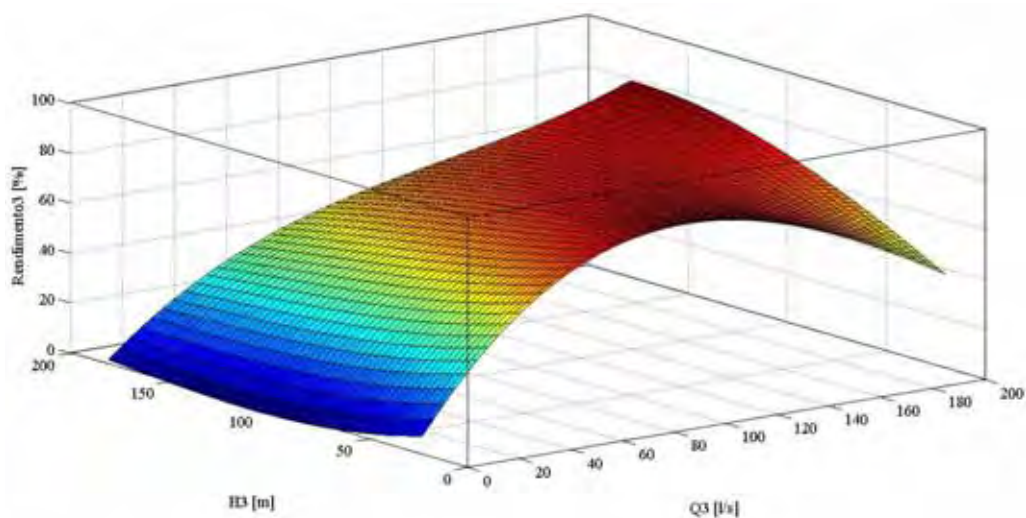


Figura 55 – Rendimento da bomba 3 com rotação variável

O problema de otimização foi implementado no ambiente computacional LINGO 10 (LINDO SYSTEMS INC., 2011), e resolvido através da técnica de programação não linear. A Tabela 22 apresenta o sumário das funções e restrições utilizadas no problema de otimização, na sequência em que são utilizadas.

Tabela 22 – Sumário das funções utilizadas no problema de otimização

Etapa	Função	Restrições	Sistema	Conjuntos moto-bomba
1	$H_{DS} = f(Q_{DS}^2)$	$Q_{DS} = \text{conhecido}$	$H_{DS} = 306,906 \cdot Q_{DS}^2 + 73,984 Q_{DS} + 80,39$	-
2	$H_i = f(Q_i, n_i)$	$n_{01} = n_{03} = \text{conhecida}$ $n_1 \leq 1,2 \cdot n_{01}$ $n_1 \geq 0,5 \cdot n_{01}$ $n_3 \leq 1,2 \cdot n_{03}$ $n_3 \geq 0,5 \cdot n_{03}$ $Q_1 \leq 1,2 \cdot Q_{IPME}$ $Q_1 \geq 0,5 \cdot Q_{IPME}$ $Q_3 \leq 1,2 \cdot Q_{3PME}$ $Q_3 \geq 0,5 \cdot Q_{3PME}$ $H_1 \leq H_{ISO}$ $H_3 \leq H_{3SO}$ $H_1 = H_{DS}$ $H_3 = H_{DS}$ $Q_1 + Q_3 = Q_{DS}$		$H_1 = 0,3087 + 0,00002755 \cdot Q_1 - 0,000459 \cdot n_1 - 0,001216 \cdot Q_1^2 + 0,00002744 \cdot Q_1 \cdot n_1 + 0,00004203 \cdot n_1^2$ $H_3 = 0,2858 + 0,0009975 \cdot Q_3 - 0,000466 \cdot n_3 - 0,001285 \cdot Q_3^2 + 0,00001114 \cdot Q_3 \cdot n_3 + 0,00004007 \cdot n_3^2$
3	$\eta_{Bi} = f(Q_i, H_i)$	-	-	$\eta_{B1} = 13,74 + 1,483 \cdot Q_1 - 0,3873 \cdot H_1 - 0,008356 \cdot Q_1^2 - 0,001057 \cdot Q_1 \cdot H_1 + 0,003087 \cdot H_1^2 + 0,00001017 \cdot Q_1^3 + 0,0000189 \cdot Q_1^2 \cdot H_1 - 0,00001017 \cdot Q_1 \cdot H_1^2 - 0,000007443 \cdot H_1^3$ $\eta_{B3} = 13,89 + 1,485 \cdot Q_3 - 0,337 \cdot H_3 - 0,009772 \cdot Q_3^2 - 0,001035 \cdot Q_3 \cdot H_3 + 0,002163 \cdot H_3^2 + 0,00001347 \cdot Q_3^3 + 0,00002463 \cdot Q_3^2 \cdot H_3 - 0,00001212 \cdot Q_3 \cdot H_3^2 - 0,000003736 \cdot H_3^3$
4	$P_{HIDi} = f(Q_i, H_i)$	-	-	$P_{HID1} = 9,81 \cdot Q_1 \cdot H_1$ $P_{HID3} = 9,81 \cdot Q_3 \cdot H_3$
5	$P_{EIXOi} = f(P_{HIDi}, \eta_{Bi})$	$P_{EIXO1} \geq 0,5 \cdot P_{OtNOM1}$ $P_{EIXO3} \geq 0,5 \cdot P_{OtNOM3}$	-	$P_{EIXO1} = P_{HID1} \cdot \eta_{B1}^{-1}$ $P_{EIXO3} = P_{HID3} \cdot \eta_{B3}^{-1}$
6	$\eta_{Mi} = f(P_{EIXOi})$	-	-	$\eta_{M1} = (-0,0000005 \cdot P_{EIXO1}^2 + 0,0019123 \cdot P_{EIXO1} + 0,7737109) \cdot 100^{-1}$ $\eta_{M3} = (-0,0000005 \cdot P_{EIXO3}^2 + 0,0019123 \cdot P_{EIXO3} + 0,7737109) \cdot 100^{-1}$

Tabela 22 – Sumário das funções utilizadas no problema de otimização (continuação)

Etapa	Função	Restrições	Sistema	Conjuntos moto-bomba
7	$P_{ELi} = f(P_{EIXOi}, \eta_{Mi}, \eta_{IF})$	$\eta_{IF} = \text{conhecido}$	-	$P_{EL1} = P_{EIXO1} \cdot (\eta_{M1} \cdot \eta_{IF})^{-1}$ $P_{EL3} = P_{EIXO3} \cdot (\eta_{M3} \cdot \eta_{IF})^{-1}$
8	$P_{ELTOT} = f(P_{EL1}, P_{EL3})$	-	$P_{ELTOT} = P_{EL1} + P_{EL3}$	-

3.7.2 INDICADOR DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA HIDRÁULICA

Conforme abordado anteriormente, diversos SAAs que possuem captações em cotas topográficas superiores às das ETAs recebem água bruta aduzida por gravidade, com alto conteúdo agregado de energia hidráulica, conforme esquema da Figura 56. Nesses casos, é possível aproveitar a carga hidráulica que normalmente é desprezada ou dissipada por dispositivos e estruturas específicas (válvulas, caixas de passagem, dentre outros), convertendo-a em eletricidade por meio de grupos geradores hidrelétricos.

Além de economicamente atrativa (uma vez que, na maioria dos casos o único componente não existente é o grupo gerador), essa alternativa não possui nenhum efeito deletério sobre o processo de tratamento da água, tendo em vista que no tratamento convencional utilizado na maioria dos SAAs brasileiros, a água bruta é descarregada na ETA em uma superfície livre, geralmente na calha Parshall, onde ocorre a mistura rápida de produtos químicos e a macromedicação de vazão.

O potencial hidrelétrico disponível é função do desnível topográfico (queda bruta) e da vazão turbinada (Q_{TUR}). A queda bruta (H_B) representa a diferença geométrica entre os níveis d'água de montante (NA_M) e jusante (NA_J), no caso de turbinas de reação, ou entre o NA_M e o nível de saída do jato, no caso de turbinas de ação. A Figura 56 esquematiza um potencial hidrelétrico genérico.

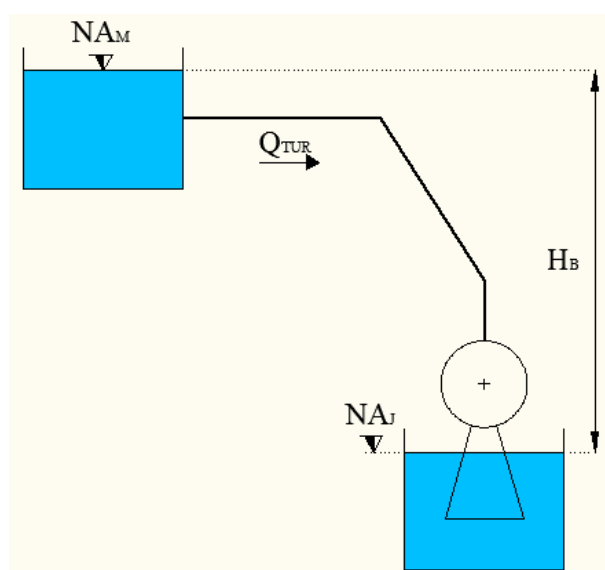


Figura 56 – Esquema genérico de potencial hidrelétrico aplicado a SAAs

A potência hidrelétrica disponível é expressa pela equação (35).

$$P_{HEL} = \rho \cdot g \cdot Q_{TUR} \cdot H_L \cdot \eta_{TUR} \cdot \eta_{GER} \quad (35)$$

sendo:

P_{HEL}	potência elétrica gerada [W];
ρ	massa específica da água [kg.m^{-3}];
g	aceleração da gravidade [m.s^{-2}];
Q_{TUR}	vazão turbinada [$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$];
H_L	queda líquida [m];
η_{TUR}	rendimento da turbina [%];
η_{GER}	rendimento do gerador [%].

A queda líquida (H_L) corresponde à queda bruta subtraída das perdas de carga distribuídas e localizadas no sistema de adução, calculadas conforme equações 14 e 15. A vazão turbinada (Q_{TUR}) é igual à vazão de água bruta aduzida por gravidade que adentra na ETA.

3.7.2.1 Definição do valor-alvo do indicador de recuperação de energia hidráulica

O indicador de recuperação de energia hidráulica possui três parcelas: parcela potência, parcela demanda e parcela consumo. Seu cálculo é efetuado através das equações 36 a 38.

$$I_{REHP} = \frac{P_{HELMÁX}}{D_{EL}} \cdot 100 \quad (36)$$

sendo:

I_{REHP}	indicador de recuperação de energia hidráulica, parcela potência [%];
D_{EL}	demanda elétrica registrada na ETA no período de análise considerado [W];
$P_{HELMÁX}$	potência elétrica instalada máxima, considerando o limite da vazão máxima aduzida por gravidade pelo SAA ou a máxima combinação de vazão e queda líquida, dentro dos mesmos limites de vazão do SAA [W].

$$I_{REHD} = \frac{P_{HEL P}}{D_{EL}} \cdot 100 \quad (37)$$

sendo:

I_{REHD}	indicador de recuperação de energia hidráulica, parcela demanda [%];
------------	--

D_{EL} demanda elétrica registrada na ETA no período de análise considerado [W];
 P_{HELP} potência elétrica produzida, considerando a vazão média aduzida pelo sistema atual [W].

$$I_{REHC} = \frac{EHE_p}{CEE} \cdot 100 \quad (38)$$

sendo:

I_{REHC} indicador de recuperação de energia hidráulica, parcela consumo [%];
 CEE consumo energético da ETA no período de análise considerado [kWh];
 EHE_p energia média produzida no período de análise considerado, considerando a vazão média aduzida pelo sistema atual [kWh].

Uma característica importante do indicador de recuperação de energia hidráulica é a sua dependência da operação e estrutura física do sistema de abastecimento de água. Conceitualmente, o indicador assume que sistema hidrelétrico a ser implantado é uma unidade auxiliar e secundária, submetida às características (vazões disponíveis e médias aduzidas) da operação do SAA, que são prioritárias. Em outras palavras, o sistema hidrelétrico proposto pelo indicador pode ser subdimensionado em relação ao potencial de geração real do sistema. No mesmo sentido, o sistema proposto considera a estrutura física (barragens, tomadas d'água e, principalmente, tubulações) existentes no sistema de adução de água bruta, considerando a realização de intervenções mínimas neste, o que, também, limita a geração hidrelétrica em relação ao potencial máximo existente no sistema.

Fisicamente, o principal fator limitante da potência hidrelétrica estabelecida pelo indicador é a dimensão da tubulação de adução por gravidade. Os diâmetros dos tubos já existentes podem conduzir a elevadas velocidades por ocasião da adução das vazões máximas do SAA, o que representa aumento quadrático das perdas de carga e redução proporcional da queda líquida disponível. Estes fatores influenciam diretamente o cálculo da parcela potência do indicador de recuperação de energia, uma vez que a potência máxima passível de instalação no SAA pode não estar associada à vazão máxima aduzida, e sim, a uma combinação ótima de vazão e queda líquida, considerando os limites mínimo e máximo de adução da captação por gravidade.

O período de análise considerado também é dependente da disponibilidade de dados monitorados no sistema. Idealmente, deveria ser considerado o período de um ano com medições horárias, de forma a se caracterizar as variações diárias e sazonais do sistema.

Tendo em vista a indisponibilidade desses dados para a maioria dos sistemas de abastecimento nacionais, o indicador pode ser calculado com base em valores médios e representativos do sistema, obtidos de períodos menores de medição.

Por fim, o indicador de recuperação de energia hidráulica é calculado com base nas vazões típicas do SAA. Dessa forma, seu cálculo não prevê estudos hidrológicos típicos de projetos hidrelétricos, como a elaboração de curvas de permanência de vazões e estudos energéticos subsequentes para determinação do fator de capacidade da central.

Conceitualmente, o indicador de recuperação de energia hidráulica considera como valores-alvo as demandas e energias da ETA ou, em casos mais específicos, de outra unidade de análise considerada para seu cálculo. Isso ocorre devido à concepção do indicador, que assume que a energia possivelmente gerada pelo sistema de recuperação será consumida no próprio local de geração, dispensando a utilização de sistemas de distribuição.

É importante destacar que os benefícios destes sistemas de recuperação podem ser maiores que o simples atendimento dos consumos e demandas locais, em situações nas quais o indicador de recuperação de energia hidráulica identifique excedentes energéticos possivelmente gerados. Nestas situações, tais excedentes poderiam ser utilizados para suprir consumos e demandas de outras UAs dos sistemas, como por exemplo, de estações de bombeamento localizadas distantes das ETAs (captações, *boosters*, dentre outras).

É relevante destacar que em abril de 2012 foram aprovadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (BRASIL, 2012a) regras que permitem que micro (até 100 kW) e mini geradores (entre 100 kW e 1.000 kW), baseados em fontes alternativas (incluídas mini e micro hidrelétricas), forneçam energia à distribuidora local e, através de um sistema de créditos, abatam os valores da sua conta num prazo de até 36 meses. A publicação destas regras potencializa os benefícios de sistemas de recuperação de energia hidráulica utilizados em SAAs, uma vez que permite utilizar possíveis excedentes energéticos para o atendimento de UAs distantes do ponto de geração, conforme descrito no parágrafo anterior. Este fato evidencia a relevância do indicador de recuperação de energia hidráulica no contexto do SAAs, indicando um grande campo para sua aplicação no Brasil.

3.7.2.2 Interpretação do indicador de recuperação de energia hidráulica

A parcela demanda do indicador considera o fato de que a demanda máxima da ETA⁴⁹

⁴⁹ A demanda da ETA é constituída, dentre outras, por cargas que não possuem nenhuma relação com a produção e bombeamento de água, por exemplo, iluminação.

não é coincidente, em termos temporais, com a vazão máxima de água bruta aduzida pelo sistema por gravidade. Ao se considerar a vazão média no cálculo, a parcela demanda representa, de forma mais realista, a capacidade do sistema de recuperação de energia hidráulica em atender a demanda elétrica do sistema.

A parcela potência do indicador, de forma complementar a parcela demanda, indica a capacidade do sistema de recuperação de energia hidráulica de suprir totalmente a demanda da ETA, caso a operação da captação por gravidade e as condições hidrológicas do manancial permitam sincronizar, temporalmente, a geração da potência máxima e a demanda elétrica característica. A parcela consumo, por sua vez, quantifica a capacidade do sistema de recuperação de suprir totalmente a energia consumida pelo sistema, em termos médios.

Todas as parcelas do indicador podem assumir três classes de valor:

- $I_{REH} < 100\%$: indica que o sistema hidrelétrico pode reduzir parcialmente a dependência da ETA em relação à energia elétrica fornecida pela concessionária;
- $I_{REH} = 100\%$: indica que a ETA pode se tornar autossuficiente em termos energéticos, caso o sistema de recuperação de energia hidrelétrica seja implantado;
- $I_{REH} > 100\%$: indica que a ETA pode, além de se tornar autossuficiente, produzir um excedente de energia para atender outras unidades consumidoras do SAA, de acordo com a resolução normativa nº 482 da ANEEL (BRASIL, 2012a).

3.7.2.3 Aplicação do indicador de recuperação de energia hidráulica – estudo de caso

O estudo de caso para avaliação do indicador de recuperação de energia hidráulica foi conduzido no sistema de abastecimento de água da COPASA/Itajubá. Além da captação de água bruta do Rio Sapucaí, avaliada no indicador de operação otimizada de bombeamento, o sistema conta com uma captação auxiliar, localizada na Serra dos Toledos, que aduz água por gravidade até a ETA. Essa captação foi implantada na década de 1960 pela Prefeitura de Itajubá, tendo sido posteriormente agregada ao sistema da COPASA. Além da vantagem de aduzir por gravidade, a água bruta proveniente da Serra dos Toledos apresenta qualidade superior à do Rio Sapucaí, tendo em vista que a captação ocorre em área próxima as nascentes, localizadas na Reserva Ecológica da Serra dos Toledos. A Figura 57 apresenta a localização da captação da Serra dos Toledos e ETA, a partir do aplicativo Google Earth.

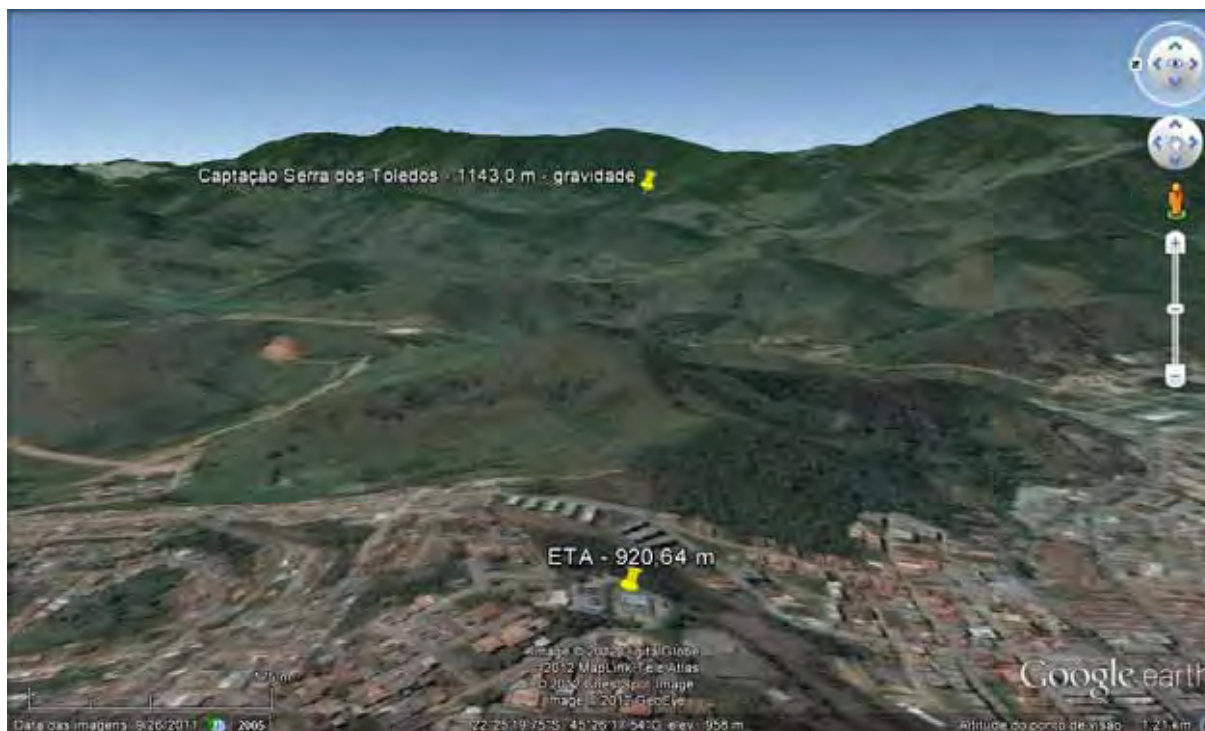


Figura 57 – Captação da Serra dos Toledos e ETA

A cota da captação, correspondente ao NA_M , é de 1143,0 m, enquanto a cota de sua descarga livre na ETA, NA_J , é de 920,64 m, conforme levantamentos topográficos oficiais da COPASA. A adução é feita por um conduto de aço, com diâmetros variando entre 250 mm e 300 mm, num total de 7.428 m de tubulação. Ao longo do traçado, a tubulação descarrega vazão em uma caixa de passagem que, por ocasião da implantação do sistema de recuperação de energia hidrelétrica, deveria ser suprimida. Considerando a implantação do sistema proposto, é necessária uma verificação da classe de pressão e condição de manutenção da tubulação existente, de forma a garantir sua integridade no caso do seu uso, também, para geração de energia.

Através de consultas ao supervisor de operação e operadores da ETA, além de documentação técnica da COPASA, foram identificadas as vazões características aduzidas por gravidade pelo sistema:

- Vazão mínima aduzida (durante o período de estiagem) $\cong 50,0$ l/s;
- Vazão média aduzida $\cong 70,0$ l/s;
- Vazão máxima aduzida $\cong 120,0$ l/s.

A partir da equação universal de perdas de carga (equações (14) e (15)) foi estabelecido

um modelo de perdas para as vazões média e máxima (apêndice C), o que permitiu calcular a queda líquida do sistema. Para a simulação, as características das tubulações singularidades foram obtidas no descritivo do sistema fornecido pela COPASA. Através de simulações com este modelo, foi obtida uma relação entre vazão de água bruta aduzida e potência elétrica gerada.

O rendimento do grupo gerador foi obtido através de solicitação de proposta técnica-comercial para fornecimento à empresa Betta Hidroturbinas. O grupo é formado por uma turbina Pelton, incluindo multiplicador de velocidade (com velocidade nominal da turbina de 1.317 rpm) associado a gerador síncrono com 220 V de tensão de saída e 1.800 rpm. O rendimento do grupo é de 67%. A Figura 58 apresenta os resultados da simulação de perdas de carga, queda líquida e potência elétrica gerada em função da vazão turbinada. A equação (39) apresenta a função da potência elétrica gerada em função da vazão aduzida.

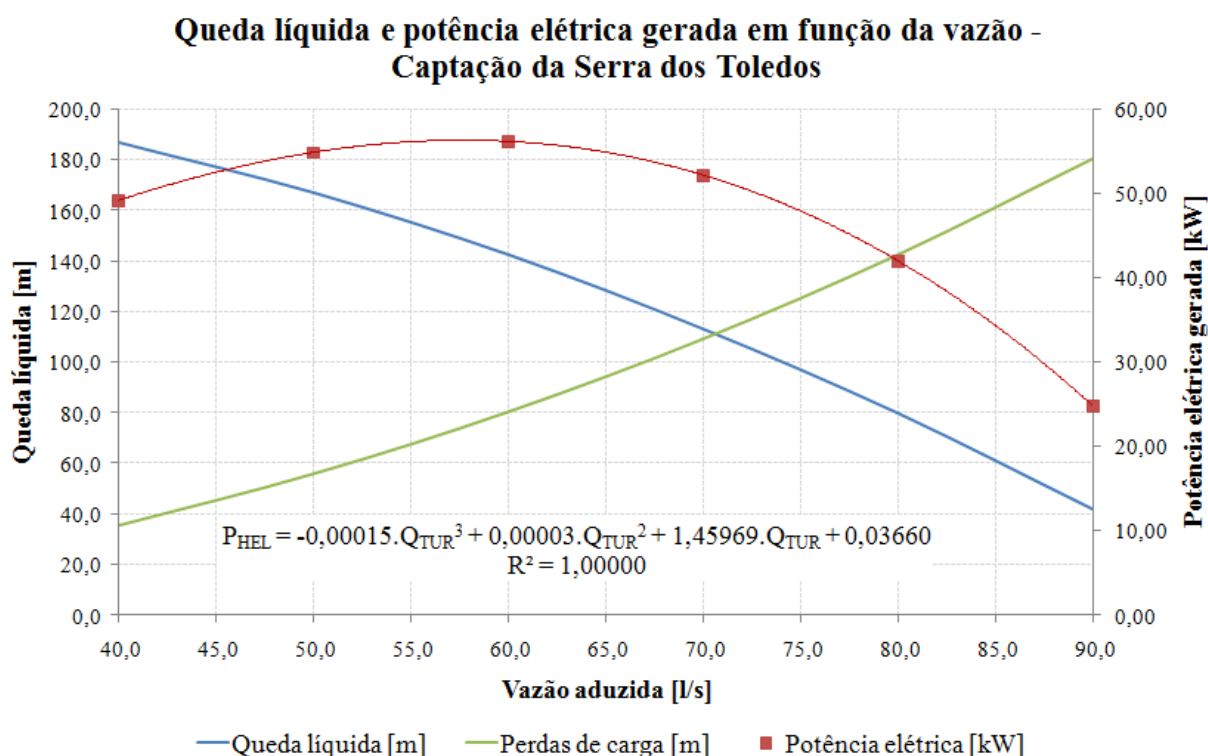


Figura 58 – Simulação de quedas líquidas e potência elétrica gerada

$$P_{HEL} = -0,00015.Q_{TUR}^3 + 0,00003.Q_{TUR}^2 + 1,45969.Q_{TUR} + 0,0366 \quad (39)$$

sendo:

P_{HEL} potência elétrica gerada [kW];

Q_{TUR} vazão turbinada [$l.s^{-1}$].

Para determinação precisa da potência elétrica máxima possível no sistema proposto, foi resolvido no módulo “Solver” da planilha Excel um problema de otimização visando maximizar a função da equação (39) através da variação da vazão. A potência máxima possível de ser gerada no sistema é de 55,6 kW, obtida com a vazão aduzida de 57 l.s^{-1} , e respectiva queda líquida de 149,9 m. Este resultado corrobora o fato do diâmetro da tubulação ser um fator limitante da recuperação de energia hidráulica em SAAs, tendo em vista que o aumento quadrático das perdas de carga em função do aumento da vazão resulta numa potência máxima utilizando uma vazão muito próxima à média aduzida pelo sistema, e não através das vazões máximas, como era de se esperar num projeto hidrelétrico convencional.

A ETA da COPASA/Itajubá está submetida à classificação tarifária Convencional A4 – Serviço Público. Para o cálculo do indicador de recuperação de energia hidráulica, foram consideradas as demandas e consumos médios de 12 meses, entre os anos de 2010 e 2011, conforme Tabela 23. O mês de novembro/2010 foi desconsiderado no cálculo.

Tabela 23 – Demandas e consumos da ETA – COPASA/Itajubá

Data de referência	Demanda [kW]	Energia [kWh]
Agosto 2010	31	12.956
Setembro 2010	31	14.473
Outubro 2010	33	12.956
Novembro 2010	0	13.448
Dezembro 2010	31	15.211
Janeiro 2011	31	11.972
Fevereiro 2011	32	13.243
Março 2011	31	12.095
Abril 2011	33	12.505
Maio 2011	33	12.095
Junho 2011	33	14.432
Julho 2011	33	14.268
Agosto 2011	35	15.334
MÉDIA	32,3	13.461

3.7.3 INDICADOR DE CARGA HIDRÁULICA DISPONIBILIZADA (I_{CHD})

Conforme verificado na seção 3.2 durante a discretização dos fluxos hidráulicos e energéticos das unidades de análise de SAAs, diversas UAs fornecem, além de água, carga hidráulica para as unidades subsequentes. Em função da configuração topográfica e arranjo do sistema, essa carga hidráulica pode ser fornecida por bombeamento ou através de parcelas potenciais, normalmente materializadas pelos níveis d’água de reservatórios.

Do ponto de vista da eficiência hidráulica e energética, a carga hidráulica disponibilizada constitui um dos mais importantes parâmetros de análise, uma vez que cargas

excessivas influenciarão diretamente a altura de elevação das bombas e, conseqüentemente, a potência elétrica consumida. Além disso, cargas hidráulicas excessivas (no caso, piezométricas) fornecidas a redes de distribuição e adutoras irão aumentar a magnitude de vazamentos, tendo em vista que estes são demandas regidas pela pressão, conforme descrito na seção 2.4.2.3. Por outro lado, cargas hidráulicas insuficientes (pode-se tomar como referência as pressões mínimas admissíveis previstas em norma) irão comprometer a qualidade do serviço, impedindo o atendimento às demandas dos consumidores e, até mesmo, possibilitando a intrusão de contaminantes e agentes patogênicos na rede, devido a subpressões. Neste último caso, o sistema pode ser considerado eficiente do ponto de vista energético, porém, ineficiente em termos hidráulicos. Nessa situação, deve-se recordar a proposta conceitual dos indicadores propostos nessa tese, que visam à minimização do consumo/demanda de água e energia elétrica, simultaneamente, atendendo-se aos limites operacionais do sistema.

É interessante notar que, em muitos casos, a carga hidráulica fornecida por uma UA tem sua repercussão energética e hidráulica tanto nas UAs subsequentes (de jusante), quanto naquelas localizada à montante. Essa situação pode ser visualizada com auxílio da Figura 59, que sintetiza os fluxos detalhados no apêndice A.

A Figura 59 representa o reservatório de água tratada de uma ETA, com nível NA_S , e um conjunto moto-bomba fornecendo uma carga hidráulica H_1 para o recalque de uma vazão Q_1 , até um reservatório localizado num setor do sistema, com nível d'água NA_R que, por sua vez, fornece uma carga hidráulica H_2 e uma vazão Q_2 para a rede de distribuição. O trecho mais elevado da rede é sujeito à pressão mínima admissível (P_{MINAD}), que ocorre em regime hidrodinâmico mediante a maior demanda do trecho. Por outro lado, o trecho de menor cota topográfica é sujeito à pressão máxima admissível (P_{MAXAD}), verificada na teoria em regime hidrostático e na prática durante a ocorrência das menores demandas na rede.

A NBR 12218 (ABNT, 1994b) estabelece que a pressão estática em determinado ponto da rede, referenciada ao nível do eixo da via pública, sob condição hidrostática (consumo nulo), deve ser inferior a 500 kPa ($\cong 50$ m), enquanto a pressão dinâmica deve ser de, no mínimo, 100 kPa ($\cong 10$ m). Dentro dos limites de pressão mencionados, deve-se tentar estabelecer a menor carga hidráulica para o atendimento da demanda de uma UA, que irá reduzir o consumo energético caso essa esteja associada a um sistema de bombeamento, e ainda, minimizar as perdas de água associadas a vazamentos e outros inconvenientes na rede.

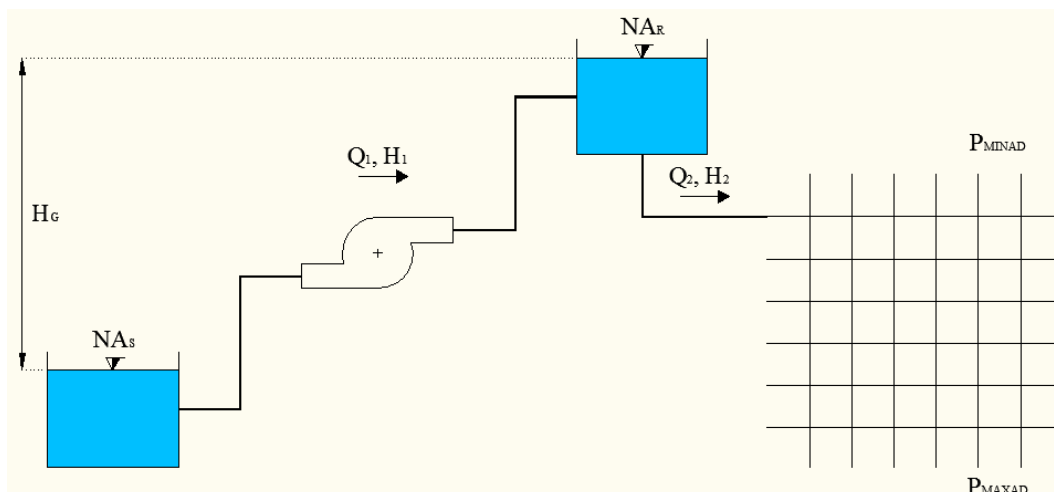


Figura 59 – Esquema genérico de disponibilização de cargas hidráulicas

O indicador de carga hidráulica disponibilizada tem por objetivo comparar o valor mínimo de carga hidráulica requerido para um bom funcionamento do sistema com os valores atualmente fornecidos. Na Figura 59, o indicador pode ser utilizado, dentre outras, para as seguintes análises:

- determinação da mínima altura de elevação H_1 fornecida pela bomba a partir de melhorias na curva do sistema, como por exemplo, substituição de tubulações por outras de maior diâmetro, eliminação de singularidades ou melhoria do coeficiente de perdas de carga através da redução da rugosidade da tubulação;
- determinação dos níveis mínimos do reservatório para atendimento das pressões mínimas nos momentos de maior demanda e, também, a minimização das pressões máximas durante os períodos de mínima demanda, ou ainda, das vazões médias ao longo do período de operação considerado.

3.7.3.1 Definição do valor-alvo do indicador de carga hidráulica disponibilizada

O valor-alvo do indicador de carga hidráulica disponibilizada é numericamente igual à mínima carga hidráulica requerida por determinada UA em determinado momento ou intervalo temporal, atendendo aos limites de pressão e altura necessários ao correto funcionamento do sistema. Fisicamente, pode ser materializado pelas seguintes variáveis:

- A menor altura necessária de elevação de uma bomba ou conjunto de bombas para o

recalque de água até um reservatório com nível d'água máximo H_G (Figura 59);

- No caso de um *booster* para pressurização de setores altos da rede, a menor altura necessária de elevação de uma bomba ou conjunto de bombas para o recalque de água até o ponto de mais elevado e/ou distante da rede, no momento de maior demanda, atendendo o limite estabelecido pela NBR 12218 (ABNT, 1994b) – pressão superior a 10 m;
- No caso de um reservatório fornecendo água para um setor da rede, o menor nível do reservatório necessário para o atendimento do ponto de mais elevado e/ou distante da rede, no momento de maior demanda, atendendo, também, o limite de pressão mínimo de 10 m estabelecido pela NBR 12218 (ABNT, 1994b) – pressão superior a 10 m.

Deve-se salientar que as possibilidades de análise utilizando o indicador de carga hidráulica disponibilizada não se limitam às opções citadas anteriormente. O conceito do indicador pode ser aplicado a diversas outras situações, para análise de componentes e/ou situações específicas, cabendo ao profissional responsável pela sua aplicação definir a forma de carga hidráulica mais representativa da eficiência do sistema.

O valor-alvo do I_{CHD} pode ser obtido, dentre outras, por meio de modelagem e simulação hidráulica, associadas a técnicas de otimização, através das quais se pode variar a carga hidráulica disponibilizada por uma UA e, simultaneamente, verificar os níveis de pressão nos pontos críticos da UA subsequente, de forma a se verificar o atendimento aos limites de pressão. Pode-se, então, definir o I_{CHD} , conforme equação (40).

$$I_{CHD} = \frac{H_A}{H_{OTM}} \cdot 100 \quad (40)$$

sendo:

I_{CHD} indicador de carga hidráulica disponibilizada [%];

H_A carga hidráulica atualmente disponibilizada à UA [m];

H_{OTM} carga hidráulica ótima requerida pela UA, considerando os limites de pressão [m].

Outra importante observação diz respeito à parcela da carga hidráulica considerada no cálculo. Em determinados tipos de análise, pode ser mais conveniente a utilização das parcelas potencial, piezométrica ou cinética, separadamente. Por exemplo: na análise da carga disponibilizada para avaliação de perdas de carga em uma adutora, pode-se considerar somente a parcela cinética/dinâmica referente às perdas durante o cálculo, caso os desníveis

envolvidos sejam desprezíveis; neste caso, o indicador seria calculado através do quociente entre as perdas de carga atuais e otimizadas.

Na análise do superdimensionamento de uma bomba, o indicador pode ser calculado através da relação entre as alturas de elevação da máquina atual e de um modelo ótimo. Para a avaliação de pressões numa rede visando à diminuição de vazamentos, os valores atual e otimizado podem se referir somente à parcela piezométrica da carga hidráulica. Como já mencionado, cabe ao profissional responsável pelo cálculo do indicador determinar a forma de carga hidráulica mais representativa do caso considerado.

3.7.3.2 Interpretação do indicador de carga hidráulica disponibilizada

O indicador de carga hidráulica disponibilizada pode assumir três classes de valor:

- $I_{CHD} > 100\%$: indica que a unidade de análise considerada fornece um excesso de energia hidráulica à unidade subsequente, podendo ser, também, suprida de um excesso de carga hidráulica pela UA localizada imediatamente à montante. Fisicamente, esse excesso pode ser decorrente de conjuntos moto-bomba superdimensionados, perdas de carga excessivas em tubulações e níveis d'água de reservatórios acima da cota necessária para a pressurização das unidades localizadas à sua jusante;
- $I_{CHD} = 100\%$: indica que as cargas hidráulicas fornecidas por determinada UA são adequadas, mantendo as unidades de jusante sobre níveis ideais e pressão, além de minimizar a carga hidráulica fornecida por UAs à sua montante;
- $I_{CHD} < 100\%$: a UA considerada disponibiliza cargas hidráulicas insuficientes para as subseqüentes. Fisicamente, esta situação pode ocorrer devido a conjuntos moto-bomba subdimensionados, níveis d'água de reservatórios insuficientes para a pressurização de setores de distribuição e aumento do coeficiente de perdas de carga de tubulações.

3.7.3.3 Aplicação do indicador de carga hidráulica disponibilizada – estudo de caso 1

O primeiro estudo de caso utilizando o indicador de carga hidráulica disponibilizada foi realizado em um setor de distribuição de água abastecido por um reservatório de água tratada. Este estudo foi conduzido no Serviço Autônomo de Água e Esgoto do município de Passos/MG, tendo por objetivo utilizar o indicador de carga hidráulica disponibilizada para

avaliar o gerenciamento das pressões da rede no bairro Aclimação. Este bairro é, atualmente, abastecido por meio de uma única adutora, cuja origem é o reservatório elevado de água tratada localizado na ETA do sistema. Este reservatório atende não somente ao setor Aclimação, mas também outros integrantes do sistema. Esta situação traz consigo alguns efeitos deletérios do ponto de vista hidráulico e energético:

- menor flexibilidade de operação do reservatório, tendo em vista a necessidade de se atenderem padrões de consumo distintos dos diversos setores, e suas respectivas demandas de carga hidráulica;
- desperdício de energia elétrica, uma vez que os conjuntos moto-bomba responsáveis pelo abastecimento do reservatório devem recalcar água com uma altura de elevação que atenda aos setores mais elevados;
- favorecimento de perdas de água por vazamento devido ao excesso de pressão nos setores mais baixos.

Propõe-se, nesse caso, avaliar a adequação das cargas hidráulicas disponibilizadas ao setor, através do gerenciamento das pressões da rede. Em termos práticos, este gerenciamento pode ocorrer de diversas formas: atendimento do setor Aclimação por meio de um reservatório secundário possivelmente instalado na própria ETA, alimentado por conjuntos moto-bomba que atendam à altura de elevação otimizada, utilização de válvulas redutoras de pressão e, no caso de déficits de pressão, o uso de *boosters*.

Neste tipo de aplicação, o indicador de carga hidráulica disponibilizada permite avaliar duas condições referentes à eficiência hidráulica e energética da rede:

- condição de excesso de pressão: esta condição ocorre geralmente durante as madrugadas, por ocasião das menores demandas da rede. Tal condição representa uma fonte de desperdício de energia elétrica, uma vez que o excesso de pressão em relação à necessária ou admissível é comumente associado a níveis de reservatórios acima dos necessários. A manutenção destes níveis também estão associados ao bombeamento sob alturas de elevação acima das necessárias, resultando em consumos energéticos desnecessários. Em termos hidráulicos, pressões excessivas são indutoras de perdas de água por vazamento, favorecendo desperdícios de água tratada com conteúdo energético agregado;

- condição de déficit de pressão: ocorre simultaneamente a períodos de alta demanda na rede, sobretudo nas áreas mais elevadas desta. Esta condição relaciona-se à baixa eficiência e desempenho hidráulico da rede, uma vez que os consumidores estarão sujeitos a pressões inferiores às admissíveis, o que compromete a qualidade do serviço.

O valor alvo do I_{CHD} , quando aplicado para análise de pressões em redes, será calculado através da definição das menores cargas fornecidas à rede (materializadas por níveis de reservatórios ou pressões fornecidas por bombeamento) necessárias à manutenção dos níveis mínimos de pressão nesta, conforme a variabilidade temporal das demandas. Maiores detalhes deste cálculo são apresentados a seguir.

Considerando a inexistência de monitoramento hidráulico contínuo no setor Aclimação, todas as informações necessárias para o cálculo do indicador foram obtidas através de um modelo implantado no aplicativo EPANET (ROSSMAN, 2000). Para modelagem e calibração do modelo, foram realizadas medições no local, durante um período de 24 horas, sendo os padrões de vazão, nível e pressão obtidos assumidos os médios do sistema. As medições incluíram:

- levantamento de cotas topográficas de nós com GPS topográfico, de forma a se validar informações fornecidas pelo SAAE;
- macromedição da vazão que adentra o setor, por meio de medidor ultrasônico, em intervalos de 30 minutos;
- nível do reservatório;
- pressões em 4 pontos da rede.

As características da rede, procedimentos de medição, modelagem e calibração são apresentados, de forma detalhada, no apêndice D. A Figura 60 apresenta os padrões de nível do reservatório e vazões demandas pelo setor, ambos medidos.

Verifica-se na Figura 60 que não ocorre modulação das cargas de bombeamento através da operação do reservatório atual, tendo em vista que seu nível se eleva durante o período de ponta (18:00 h às 21:00 h). Isso se deve à capacidade insuficiente deste reservatório de atender às demandas de todos os setores abastecidos, incluindo o setor Aclimação.

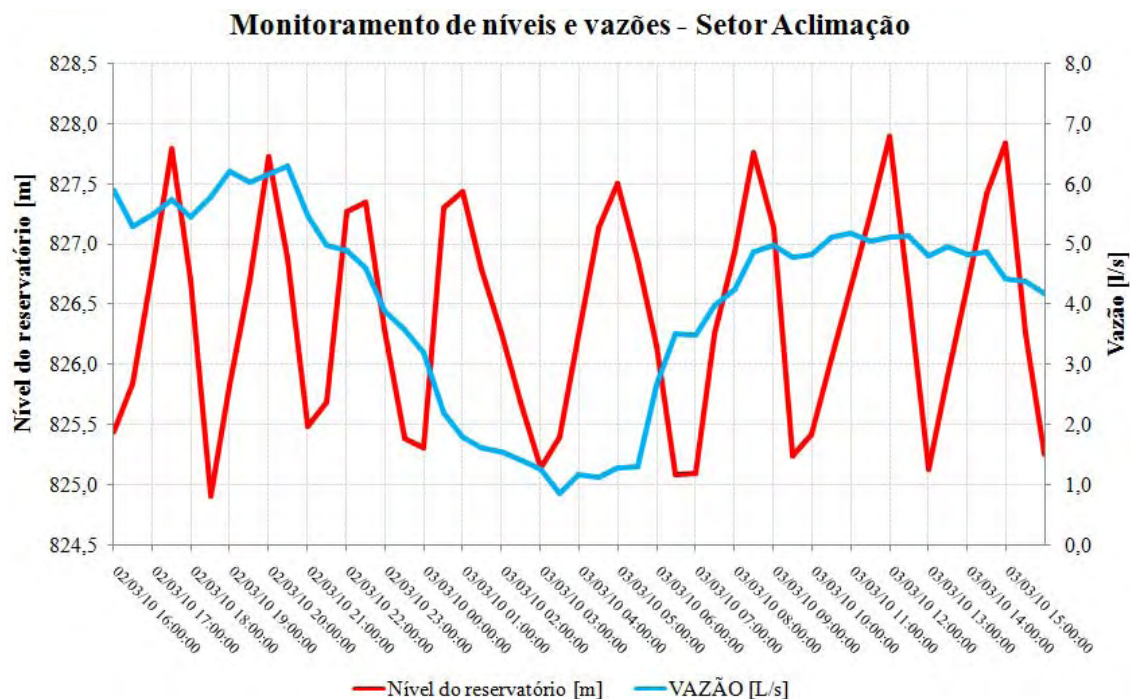


Figura 60 – Padrão de demanda de água e nível do reservatório – Setor Aclimação

O setor estudado é predominantemente residencial, no qual parte do consumo se dá em pontos ligados diretamente à rede e consequentemente submetidos às suas pressões (sobretudo em torneiras e outras ligações localizadas nas áreas externas das residências), sendo o restante associado a reservatórios residenciais individuais (caixas d'água), que mantêm o nível de pressão de pontos de consumo interiores (torneiras, chuveiros, etc) praticamente constante.

No problema estudado, a carga hidráulica disponibilizada ótima é obtida através da simulação dos níveis d'água do reservatório que abastece o setor Aclimação, visando minimizar as pressões médias na rede, ao mesmo tempo em que são atendidos os limites mínimos estabelecidos por norma. Optou-se em resolver o problema por meio de variações de níveis de reservatório tendo em vista sua maior simplicidade; o mesmo efeito poderia ser obtido através da operação de válvulas redutoras de pressão e *boosters*.

Na qualidade de ferramenta de planejamento e tomada de decisões, o indicador de carga hidráulica disponibilizada considera o comportamento hidráulico médio da unidade de análise avaliada, no caso, o setor Aclimação, sendo este volume de controle do problema. Busca-se com isso avaliar a adequação das cargas globais da unidade, considerando o gerenciamento da carga hidráulica no ponto de entrada do setor que, como já mencionado, é abastecido por uma única adutora.

A proposta deste estudo de caso não considera o gerenciamento das cargas de forma mais discretizada dentro da unidade de análise, como por exemplo, a instalação de válvulas

para controle de pressões apenas nas zonas baixas do setor Aclimação, ou a utilização de *boosters* para pressurização de suas zonas altas. Apesar disso, o indicador de carga hidráulica disponibilizada pode ser utilizado para avaliação destas situações de maior discretização da rede, bastando para isso, reduzir o volume de controle de forma a englobar apenas as zonas desejadas.

A restrição deste problema refere-se às pressões mínimas na rede, estabelecidas pela NBR 12218 (ABNT, 1994b), como sendo de 10 m⁵⁰ durante o período de maior consumo. Em função da indisponibilidade de dados do SAAE e impossibilidade de se monitorar a vazão em diversos pontos da rede, foi assumido durante a modelagem que o consumo na rede ocorre de forma homogênea ao longo das 24 horas, ou seja, os horários de máximo e mínimo consumo ocorrem ao mesmo tempo em todos os pontos da rede. Dessa forma, é esperado que as mínimas pressões na rede ocorram nos pontos mais elevados (de maiores cotas topográficas), e que, ao se manter as pressões mínimas nestes pontos, o restante da rede também estará sujeito a pressões superiores ao limite mínimo estabelecido. Assume-se, portanto, que o controle (restrições) do problema de otimização pode ser realizado a partir do nó de menor pressão da rede. A partir do modelo hidráulico desenvolvido, foi possível localizar a zona de menor pressão da rede, durante o momento de maior demanda, conforme Figura 61.

Na Figura 61, pode-se verificar a ocorrência de zonas com déficit de pressão, inferiores ao limite de 10 m, representadas pela cor azul. A partir deste mapa, foi identificado o nó crítico em termos de pressões mínimas, sendo ele o J109 (marcado na figura com um círculo vermelho), localizado na cota 804,9 m. A pressão mínima ocorre às 18:30 h, atingindo um valor de 0,56 m. A Figura 62 apresenta o perfil temporal de pressões no nó J109.

⁵⁰ Apesar de a unidade de pressão no Sistema Internacional ser o Pascal (Pa), considera-se nesta tese a terminologia tradicional da engenharia hidráulica. Dessa forma, na maioria das análises e cálculos hidráulicos desenvolvidos, foi utilizado o metro (m) como unidade de pressão, sendo este equivalente à pressão exercida por 1 metro de coluna de água.

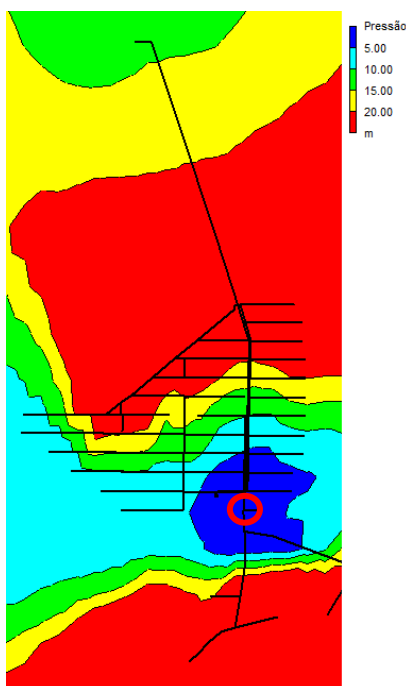


Figura 61 – Zonas de pressão do setor Aclimação durante o período de máxima demanda e menores pressões

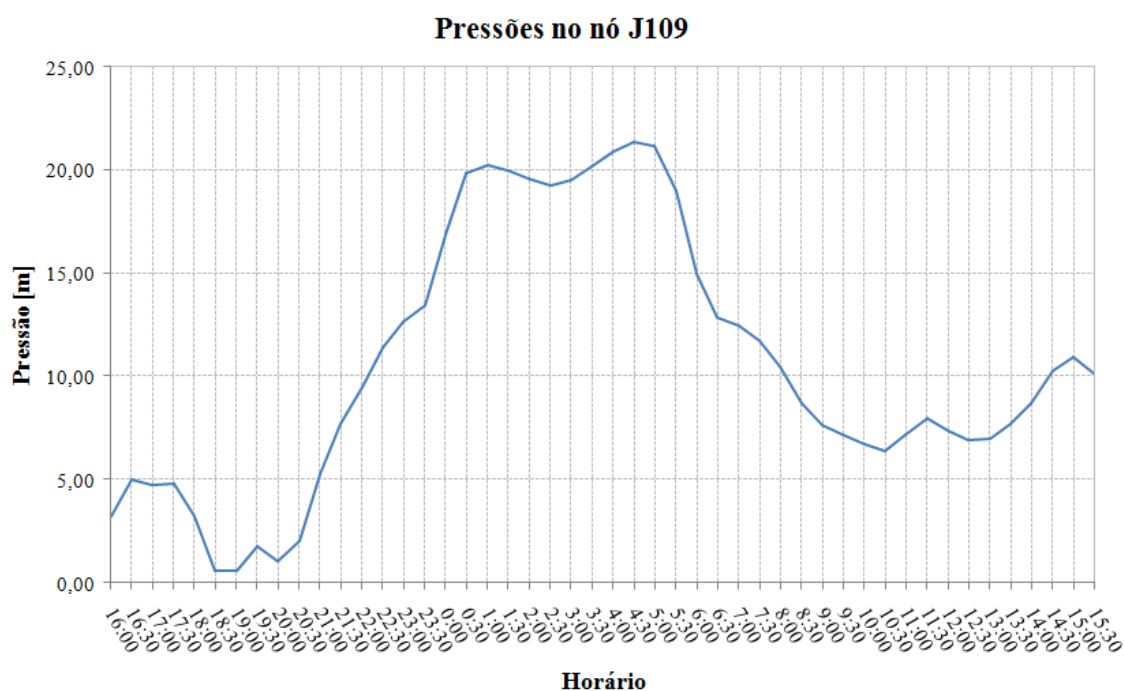


Figura 62 – Perfil temporal de pressões no nó J109 (nó crítico de pressões mínimas)

Percebe-se na Figura 62 que o nó J109 somente apresenta pressões superiores à mínima admissível (10 m) no período entre as 22:00 h e 8:00 horas, quando ocorrem os mínimos consumos. Assim como na análise das zonas de mínima pressão, pode-se identificar os trechos de máxima pressão, mais susceptíveis à vazamentos. As pressões máximas ocorrem durante os períodos de mínima demanda, sendo visualizados na Figura 63.

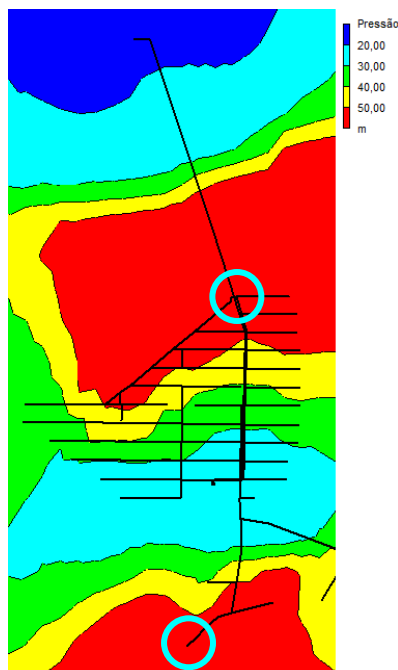


Figura 63 – Zonas de pressão do setor Aclimação durante o período de mínima demanda e maiores pressões

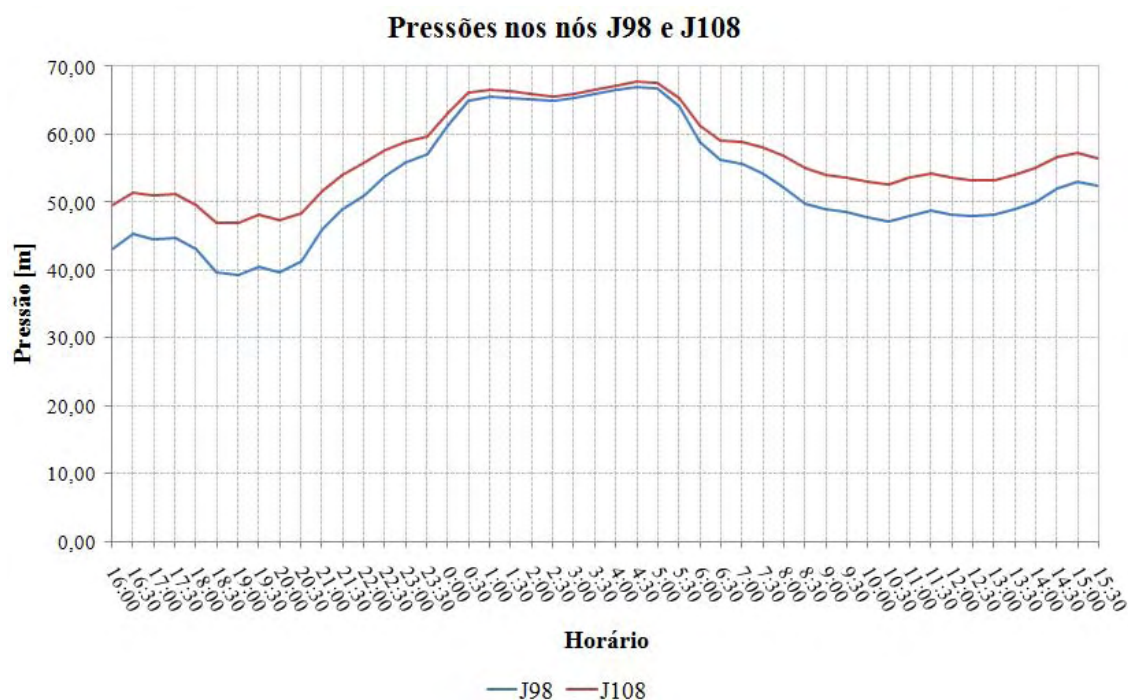


Figura 64 – Perfil temporal de pressões nos nós J98 e J108 (nós críticos de pressões máximas)

Verifica-se na Figura 63 que duas zonas localizadas nos extremos da rede, no sentido norte/sul, apresentam pressões acima do limite de 50 m estabelecido pela NBR 12218. Os nós J98 (localizado no extremo norte da rede) e J108 (extremo sul da rede) são os de maiores pressões da rede (marcados na figura com círculos azuis), localizados, respectivamente, nas cotas 758,9 m e 758,6 m.

Na Figura 64, verifica-se que o nó J108 apresenta pressões excessivas, em relação ao limite de 50 m, durante praticamente todo o dia, com exceção do período de máxima demanda. O nó J98 apresenta pressões excessivas no período noturno e, mesmo durante o período de maior demanda, pressões elevadas, acima de 40 m. As pressões máximas nos nós J98 e J108 são de 67,0 m e 67,7 m, ocorrendo às 4:30 h, durante a madrugada.

Uma vez identificado o nó de mínima pressão, que fornecerá as restrições do problema, pode-se obter o perfil ótimo de cargas disponibilizadas para a rede em questão. O nó J109 é abastecido por uma única adutora, servindo de derivação para o trecho sul do setor Aclimação. O perfil ótimo de cargas disponibilizadas é aquele com as mínimas cargas que mantenham os níveis de pressão no nó crítico (J109) dentro dos limites impostos pelas normas; fisicamente este perfil resultará na manutenção da pressão do nó J109 constante, no valor mínimo admissível de 10,0 m. Com isso, será obtido o perfil teórico que, simultaneamente, minimiza a energia fornecida à rede através de bombeamento e os níveis de vazamento na rede, considerando os níveis mínimos admissíveis.

3.7.3.4 Aplicação do indicador de carga hidráulica disponibilizada – estudo de caso 2

O segundo caso desenvolvido para análise do indicador de carga hidráulica disponibilizada é realizado na captação de água bruta da COPASA/Itajubá, já avaliada através do indicador de operação otimizada de bombeamento. Neste estudo de caso, pretende-se avaliar o excesso de carga hidráulica disponibilizada para o recalque de água bruta até a ETA, devido ao envelhecimento da adutora local. O aumento da rugosidade de tubulações em função de sua idade é normalmente considerado linear pela literatura, embora trabalhos como o de Echávez (1997), que avaliou pequenos tubos (de até 50,8 mm) de cobre e aço, indiquem que tal aumento pode ser de maior magnitude, representado matematicamente por funções parabólicas. Nesse caso, o indicador de carga hidráulica disponibilizada pode ser utilizado para avaliar os possíveis benefícios de um processo de recuperação das adutoras em questão, visando à redução de sua rugosidade e, conseqüentemente, de suas perdas de carga distribuídas.

A reabilitação de adutoras com conseqüente redução de sua rugosidade pode ser realizada de algumas formas básicas, como revestimento de tubulações existentes, substituição ou limpeza. Selvakumar *et al.* (2002) classificam os métodos de reabilitação de tubulações de distribuição de água em revestimento não estrutural e revestimento estrutural, além de avaliarem técnicas de substituição de tubos. Segundo os autores, o revestimento não

estrutural consiste na aplicação de uma fina camada de material resistente à corrosão, como por exemplo, argamassa de cimento ou material epóxi, enquanto o revestimento estrutural envolve a instalação de uma estrutura em contato direto com a parede da tubulação, como por exemplo um tubo secundário de menor diâmetro, inserido no original. Gomes (2009b) destaca, ainda, o uso de *scrapers* e *pigs* para a remoção de incrustações e redução da rugosidade de tubulações.

Conforme mencionado anteriormente, este estudo de caso utilizando o indicador de carga hidráulica disponibilizada visa analisar a possibilidade de se minimizar a carga hidráulica demandada para o bombeamento de água na captação por bombeamento da COPASA/Itajubá, através da redução das perdas de carga de suas adutoras. A partir de ensaios realizados nessa elevatória, descritos na seção 3.7.1.3 durante o desenvolvimento do indicador de operação otimizada de bombeamento, foi possível estabelecer a equação que define a curva do sistema (equação (30)).

Para a simulação da carga hidráulica disponibilizada ótima desta elevatória e adutora, será utilizado o modelo teórico de curva de sistema utilizado na validação da curva ensaiada, também desenvolvido na análise do indicador de operação otimizada de bombeamento, conforme equação (30). Este modelo foi desenvolvido a partir da aplicação da equação universal de perdas de carga (equações (14) e (15)), a partir dos dados físicos das tubulações e singularidades disponibilizados pela COPASA. A modelagem da curva teórica é apresentada no apêndice B.

O modelo teórico desenvolvido considerou a rugosidade da tubulação de 0,0021 m, referente a tubos de ferro fundido revestidos velhos, prevendo os efeitos do envelhecimento da tubulação, de acordo com Araújo *et al.* (1998). Como pode ser verificado na Figura 46, o modelo teórico da tese resultou em alturas superiores às do memorial de projeto da adutora, porém, inferiores às reais obtidas por meio de ensaio, demonstrando que o envelhecimento da tubulação resultou em rugosidades médias superiores às previstas teoricamente.

Não foram identificados durante a pesquisa bibliográfica referências sobre o potencial de redução da rugosidade por meio da aplicação de revestimentos ou uso de *scrapers* ou *pigs*. Dessa forma, a simulação dos efeitos da aplicação destes métodos considerou ser possível a recuperação de valores de rugosidade semelhantes às de tubulações novas, no caso, de ferro fundido com revestimento asfáltico. Segundo Araújo *et al.* (1998), a rugosidade destes tubos novos é de 0,00012 m, sendo este valor utilizado na simulação e comparação com os valores atuais.

3.7.4 INDICADOR DE EFICIÊNCIA HÍDRICA ASSOCIADO ÀS PERDAS DE ÁGUA (IEH)

A avaliação de eficiência relativa mostra-se adequada ao estudo da influência das perdas de água sobre a eficiência de SAAs, tendo em vista que uma meta de eficiência absoluta visando eliminar totalmente tais perdas (resultando em um índice de perdas igual a 0%) é inviável do ponto de vista financeiro (incorrendo na definição de níveis econômicos de vazamentos⁵¹ (*ELLS*) e também considerada impossível em termos físicos e técnicos. Essa impossibilidade física foi expressa por Lambert *et al.* (1999) através do indicador denominado perdas de água anuais inevitáveis (UARL).

De acordo com Venkatesh (2012), a reabilitação de tubulações raramente ocorre exclusivamente para a eliminação de vazamentos, uma vez que a relação custo-benefício da eliminação deste vazamentos (principalmente através da substituição ou reparos em tubos) por si só, não é atrativa do ponto de vista estritamente financeiro.

Com base no exposto, propõe-se um modelo para a determinação de *benchmarks* e metas de redução de perdas de água para SAAs, utilizando a técnica de análise envoltória de dados (DEA). A DEA tem sido aceita como uma das principais técnicas para avaliação de eficiência em sistemas consumidores/produtores de água, como demonstram os trabalhos de Cubbin e Tzanidakis (1998), Thanassoulis (2000), Abbott e Cohen (2009), Byrnes *et al.* (2010). Uma descrição teórica simplificada da DEA, e a apresentação de conceitos a ela relacionados e relevantes ao desenvolvimento do modelo proposto consta do apêndice G.

A definição de *benchmarks* e metas de redução de perdas de água considerando somente índices brutos de perda (relações fracionais entre volumes fornecidos e/ou faturados e volumes introduzidos e/ou produzidos pelo sistema) pode resultar em metas pouco factíveis na prática, em função da heterogeneidade dos sistemas devido a diversos fatores físicos, hidráulicos e externalidades explicativas das perdas de água, além da escala de produção. Nesse sentido, a DEA permite estabelecer *benchmarks* e metas mais realistas, uma vez que analisa a eficiência dos sistemas de forma empírica (através de comparação de dados reais de sistemas semelhantes) e não paramétrica, permitindo considerar múltiplos insumos e produtos de diferentes naturezas, bem como a influência da escala de produção.

A contabilização das perdas de água em SAAs ocorre, geralmente, por meio de balanços hídricos, através dos quais são definidos os volumes de entrada e saída em diversos níveis do

⁵¹ Nível econômico de vazamentos (*ELLS*), é aquele no qual o custo marginal do controle ativo de vazamentos é igual ao custo marginal da água (VENKATESH, 2012).

sistema. A diferença entre o volume total de entrada e os consumos medidos e não autorizados representa as perdas de água totais de um sistema (TABESH *et al.*, 2009), e relações percentuais entre tais volumes são normalmente utilizadas como índices de perdas.

De forma generalizada, o índice de perdas de água clássico (IPA) comumente utilizado para a análise e comparação de eficiência de SAAs é definido através da equação (41).

$$\text{IPA} = \left(1 - \frac{\text{VS}}{\text{VE}}\right) \cdot 100 \quad (41)$$

sendo:

- IPA índice de perdas de água [%];
- VS volume de água saindo (efluente) do sistema ou do nível do sistema considerado [$\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$];
- VE volume de água entrando (afluente) no sistema ou no nível do sistema considerado [$\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$].

Na equação (41), o sistema ou nível do sistema considerado é definido pelos pontos de macro ou micromedição dos volumes de água afluentes e efluentes, definindo a natureza do IPA. O índice de perdas global pode ser calculado pela relação entre o volume total micromedido nas ligações dos consumidores (VS) e o volume total de água bruta afluente (VE), englobando captações e importações de água bruta, por exemplo. A Tabela 24 apresenta exemplos gerais da natureza do IPA em função dos pontos de macro e micromedição.

Tabela 24 – Exemplos de índices de perdas de água clássicos obtido por balanço hídrico em diferentes níveis de um SAAs

Pontos de macro e micromedição		Natureza do IPA
Volume de água afluente (VE)	Volume de água efluente (VS)	
Captação	Entrada da ETA	Índice de perdas na adução de água bruta
Captação	Micromedidores dos consumidores	Índice de perdas global
Entrada da ETA	Saída da ETA	Índice de perdas no tratamento ou de serviço
Saída da ETA	Micromedidores dos consumidores	Índice de perdas na distribuição

Outros indicadores clássicos comumente utilizados para análise de perdas em SAAs buscam inserir proporcionalidade aos volumes perdidos, permitindo a comparação de sistemas, como por exemplo, índices de perdas lineares (volumes perdidos divididos pela extensão da rede), índices de perdas por ligação (volumes perdidos divididos pelo número de

ligações consumidoras), ou ainda, combinações desses indicadores.

Apesar de permitirem avaliar o status e acompanhar a evolução da eficiência de um SAAs isoladamente, os indicadores e índices de perdas de água clássicos são pouco relevantes em termos de comparação e definição de *benchmarks* e metas de redução de perdas, tendo em vista que não consideram as diferenças físicas, de escala e externalidades de cada sistema. Lambert *et al.* (1999) concluíram que a representação de perdas reais de água como uma porcentagem do volume de entrada deve ser rejeitada como indicador de desempenho.

O modelo proposto busca considerar os fatores influentes sobre as perdas de água no cálculo de um índice mais representativo, que permita identificar os melhores sistemas em relação às perdas de água (*benchmarks*). Este índice, numericamente igual à eficiência calculada através da DEA, é denominado índice de eficiência hídrica (IEH), assumindo um valor global através da DEA CCR (IEHCCR) e um valor puramente técnico através da DEA BCC (IEHBCC).

O IEHBCC deve ser interpretado como a eficiência local do sistema de abastecimento, relacionada unicamente ao uso eficiente dos insumos e produtos (no caso, direcionados à análise das perdas de água). O IEHCCR, por sua vez, é uma medida de eficiência global, considerando além da relação entre insumos e produtos, o efeito da dimensão (escala) do sistema sobre sua eficiência.

Assume-se que o IEHBCC, por considerar apenas a eficiência técnica local do sistema, definirá metas de redução de curto prazo; por outro lado, a meta de redução de perdas associada ao IEHCCR pode ser considerada uma meta de médio e longo prazo, uma vez que o ajuste da escala pode envolver, além de alterações físicas e estruturais, questões políticas e jurídicas (por exemplo, por ocasião de associação, fusão, ou cisão de sistemas), num ambiente normalmente regido por contratos e concessões.

A DEA realiza o cálculo de eficiências relativas, ou seja, sistemas que apresentam as maiores eficiências (numericamente iguais a 1) são considerados referências (*benchmarks*), estabelecendo uma fronteira (envelope) de possibilidades e metas de produção para os demais sistemas (ineficientes). Dessa forma, pode-se assumir que o IEH calculado através da DEA estabelece uma meta de redução de perdas viável, tendo em vista que o valor de referência já foi verificado, empiricamente, em um sistema semelhante (*benchmark*).

Resumidamente, são utilizadas as seguintes etapas metodológicas: 1) definição da base de dados; 2) caracterização e pré-seleção das DMUs consideradas na DEA; 3) caracterização da tecnologia de produção das DMUs; 4) identificação dos principais fatores influentes sobre as perdas de água através de revisão da literatura; 5) associação dos fatores influentes

identificados à base de dados disponível para seleção dos *inputs* e *outputs*; 6) seleção das DMUs; 7) análise envoltória de dados; 8) avaliação dos resultados da DEA e definição de *benchmarks*; 9) comparação dos resultados da DEA com os índices clássicos de perdas de água.

3.7.4.1 Disponibilidade de dados e indicadores e seleção das DMUS

A base de dados utilizada para a análise envoltória de dados é aquela disponibilizada pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) (BRASIL, 2012b), sendo 2010 o ano base considerado. Os dados foram extraídos do aplicativo “Séries Histórica 2010”, disponibilizado pelo SNIS e posteriormente exportados para planilha eletrônica.

Para que os *benchmarks* obtidos através do estudo sejam representativos, buscou-se um conjunto de sistemas com características mais homogêneas, optando-se por considerar apenas prestadores de serviços de água de abrangência local. Segundo o SNIS (BRASIL, 2012b), prestadores de serviços de abrangência local são aqueles que atendem ao município em que está sediado e, eventualmente e quase sempre em caráter não oficial, frações de municípios adjacentes, englobando os serviços municipais (públicos ou privados). Através dessa delimitação, foram excluídos prestadores de serviços de abrangência regional e microrregional, sujeitos a uma maior heterogeneidade de condições operativas e físicas.

O Estado de São Paulo foi assumido como área de estudo devido à sua relevância econômica e demográfica no Brasil. O Estado ocupa uma área de aproximadamente 249 mil km², com mais de 40 milhões de habitantes distribuídos em 645 municípios, sendo responsável por 31% do produto interno bruto (PIB) brasileiro (SÃO PAULO, 2012). Segundo projeções do Atlas Brasil de Abastecimento Urbano de Água (BRASIL, 2010a) para o ano de 2015, 64% dos municípios paulistas apresentarão abastecimento de água satisfatório, 26% exigirão ampliação dos sistemas existentes e 10% demandarão novos mananciais. Nesse cenário, no qual 36% dos municípios exigirão um aumento da oferta de água, a redução das perdas pode constituir uma alternativa tecnológica sustentável, evitando o aumento da pressão sobre os mananciais, desperdícios de energia elétrica e emissões de gases estufa, o que torna o presente estudo ainda mais relevante. A demanda para abastecimento urbano do Estado, projetada para 2025, é de 151,77 m³.s⁻¹ (BRASIL, 2010a).

Foram identificados os sistemas locais e microrregionais da bacia que forneceram dados para o SNIS no ano de 2010 a partir do aplicativo “Séries históricas 2010”. Para efeito de análise, foram considerados no conjunto de DMUs os SAAs que possuem índice de

micromedição relativo ao consumo (referência SNIS IN044) igual a 100%, de forma que o volume de água consumido seja efetivamente medido (volume estimado nulo). Excluíram-se sistemas que importam e exportam água, tendo em vista que esses processos alteram significativamente os balanços hídricos do sistema além de, normalmente, resultarem em estruturas físicas (estações de bombeamento, adutoras, dentre outras) diferenciadas.

3.7.4.2 Caracterização da tecnologia de produção

Do ponto de vista físico, considerando estritamente os volumes de água afluentes e efluentes de um sistema de abastecimento de água (DMU), pode-se representar uma DMU em termos de *inputs* e *outputs* através da Figura 65. Considerando os critérios de seleção de DMUs já descritos (índice de hidrometração de consumo de 100%, importação e exportação nulas de água), pode-se compor o fluxograma da Figura 65 a partir dos dados e indicadores existentes na base de dados SNIS (BRASIL, 2012b).

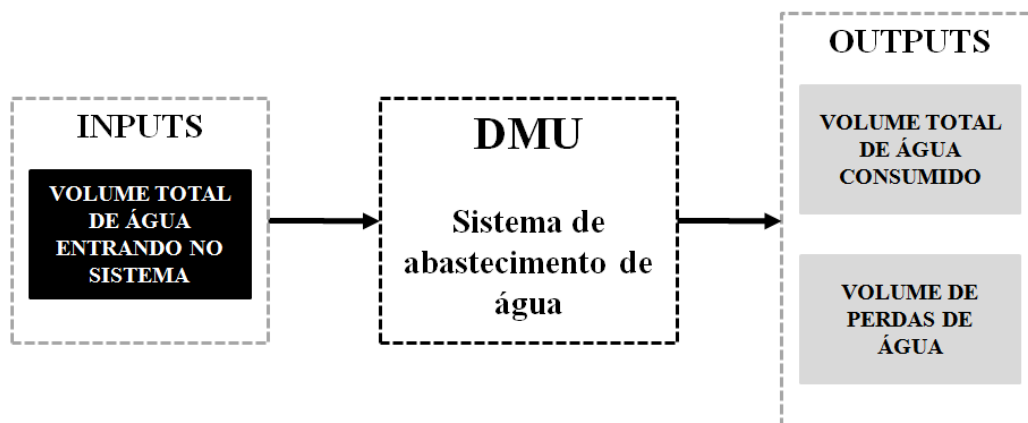


Figura 65 – Representação física global dos *inputs* e *outputs* hídricos de um SAA

A Figura 66 apresenta o esquema físico de fluxos hídricos para uma DMU desenvolvido através da interpretação dos indicadores do SNIS e suas respectivas definições. Na Figura 66, os indicadores cuja descrição é precedida pelas letras “AG” são aqueles apresentados explicitamente no banco de dados do SNIS (BRASIL, 2012b), e os demais são propostos pelos autores para a adequada representação da tecnologia de produção do ponto de vista hídrico. Convencionou-se que os blocos pretos representam entradas (*inputs*) e os blocos cinzas representam saídas (*outputs*).

Na Figura 66, os blocos ETA e UTS representam, respectivamente, estação de

tratamento de água e unidade de tratamento simplificado. Verifica-se na Figura 66 que o SNIS não apresenta explicitamente o volume de água bruta captada pelo sistema (VABC), mesmo sendo esse um importante indicador em termos de gestão de recursos hídricos na bacia hidrográfica. Este valor pode ser obtido através de balanço hídrico através da equação (42).

$$VABC = AG006 + AG024 \quad (42)$$

sendo:

VABC volume de água bruta captada [$1.000 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$];

AG006 volume de água produzido [$1.000 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$];

AG024 volume de água de serviço [$1.000 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$].

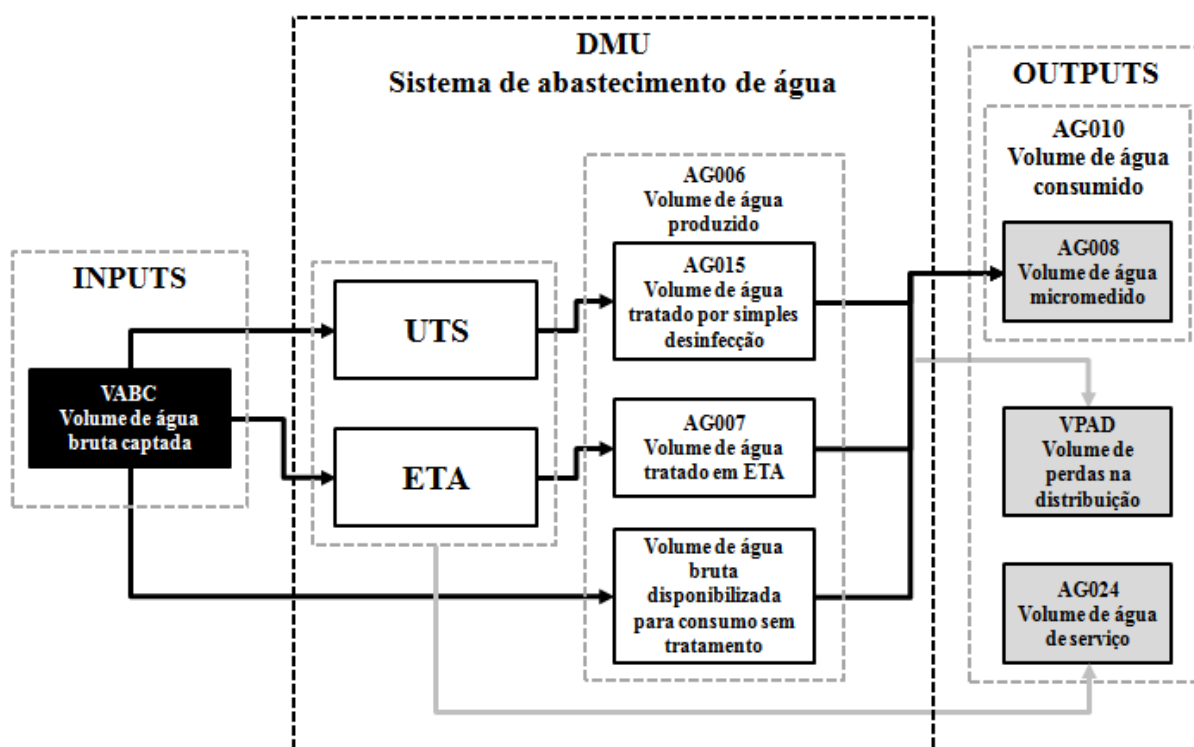


Figura 66 – Representação física global dos inputs e outputs hídricos em um SAA, conforme dados disponíveis no SNIS

Em função dos dados disponibilizados pelo SNIS (BRASIL, 2012b), não é possível quantificar as perdas de água na captação e adução de água bruta. Ainda a partir do fluxograma da Figura 66 é possível calcular o volume de perdas de água na distribuição (VPAD), através da equação (43).

$$VPAD = AG006 - AG008 \quad (43)$$

sendo:

VPAD	volume de perdas de água na distribuição [$1.000 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$];
AG006	volume de água produzido [$1.000 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$];
AG008	volume de água micromedido [$1.000 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$].

Assume-se nesse trabalho que o volume de água de serviço (AG024) é, também, uma perda de água. Através da Figura 66, identificam-se como *input* hídrico físico o volume VABC e AG018, e outputs hídricos físicos os volumes AG010 (numericamente igual ao AG008 devido aos critérios de seleção de DMUs considerados), AG024 e VPAD.

3.7.4.3 Fatores que influenciam as perdas de água em SAAS

Nesta seção, foram investigados na literatura os principais fatores que influenciam a probabilidade de ocorrência e a magnitude das perdas de água por vazamento, associando-os a indicadores existentes na base de dados do SNIS (BRASIL, 2012b). Exemplos destes fatores são: idade e material das tubulações, tipos de juntas, pressões, carga de tráfego sobre as vias, tipo e movimentação do solo (MORAIS; ALMEIDA, 2007).

Ao investigar modelos estatísticos para a análise de rupturas em tubulações de sistemas de abastecimento de água, Yamijala *et al.* (2009) consideraram variáveis de diversas naturezas: diâmetro, comprimento, material e idade de tubulações, pressões, características da ocupação do solo acima das tubulações (áreas residenciais, comerciais, industriais, rurais, dentre outras), características físicas do solo e condições meteorológicas. O indicador SNIS mais representativo das características físicas das tubulações é o AG005 (extensão da rede de água, em km), definido como o comprimento total da rede de distribuição de água, incluindo adutoras, subadutoras e redes distribuidoras e excluindo ramais prediais, operada pelo prestador de serviços, no último dia do ano de referência.

Hidraulicamente, a principal variável explicativa dos índices de perdas de água em um sistema de abastecimento é a pressão, sendo os vazamentos considerados como demandas regidas pela pressão (GIUSTOLISI *et al.*, 2008; CABRERA *et al.* 2010). De acordo com Ulanicki (2000), o gerenciamento da pressão é eficaz tanto em termos corretivos (eliminação e redução dos vazamentos existentes) quanto preventivos (redução da possibilidade de surgimento de novos vazamentos) no tocante às perdas de água em sistemas de distribuição, além de economicamente efetivo.

A pressão em redes de distribuição de água é definida inicialmente por suas

características topográficas: sistemas localizados em áreas com elevados gradientes altimétricos, ao contrário de regiões planas, tendem a apresentar zonas de baixa e alta pressão, sendo estas últimas mais susceptíveis a vazamentos. Apesar de sua importância na análise hidráulica de perdas de água, pressões ou outros indicadores diretamente associados normalmente não estão disponíveis em bancos de dados para *benchmarking* de sistemas de abastecimento de água, incluindo o SNIS, o que inviabiliza sua utilização no estudo.

3.7.4.4 Definição dos *inputs* e *outputs*

A seleção das variáveis para composição dos *inputs* e *outputs* ocorreu com base em três critérios complementares: 1) variáveis que melhor caracterizam as perdas de água no processo de disponibilização, considerando fluxos físicos descritos na seção 3.7.4.2; 2) variáveis explicativas auxiliares que representam os fatores influentes sobre a ocorrência e magnitude de perdas de água e que também que permitam, de certa maneira, considerar as heterogeneidades dos sistemas e normalizar os fluxos com base em suas características específicas; tais fatores foram identificados através da análise da base de dados disponível e sua comparação com os fatores influentes verificados na literatura, conforme seção 3.7.4.3; e 3) disponibilidade de dados na base SNIS (BRASIL, 2012b).

Apresenta-se a seguir o modelo funcional através da qual os fluxos hídricos físicos e fatores influentes sobre as perdas de água serão considerados na DEA.

Apesar de constituir *outputs* indesejáveis em termos físicos (Figura 66), assume-se que, em termos funcionais, as perdas de água são *inputs* hídricos. Tal hipótese é assumida visando determinar, durante a DEA, *benchmarks* de perdas de água que fornecerão metas de redução de perdas para as DMUs ineficientes. Fisicamente, tais metas são alcançadas através da redução dos *inputs* de água mantendo-se o mesmo nível de atendimento (*outputs*). Em outras palavras, as perdas de água são consideradas parcelas desagregadas do volume total de água fornecida ao sistema.

A consideração de *outputs* indesejáveis na DEA, como no caso das perdas de água, tem sido comumente associada à medição de eficiência ambiental (vide, por exemplo, Zhou *et al.*, 2008b e Song *et al.*, 2012). Funcionalmente, a consideração de *outputs* indesejáveis como *inputs* permite representar a eficiência do sistema de acordo com a proposta metodológica do trabalho, sendo uma metodologia comumente utilizada na literatura sobre DEA, por exemplo, por Zhang *et al.* (2008) e Madlener *et al.* (2009). De fato, ao se considerar as perdas de água como *inputs* no modelo de DEA orientado a *inputs*, os SAAs com menores índices de perda

tendem a se aproximar das DMUs eficientes do ponto de vista puramente técnico. O volume de perdas de água (VPA) é calculado através da equação (44).

$$\text{VPA} = \text{VPAD} + \text{AG024} \quad (44)$$

sendo:

- VPA volume de perdas de água [$1.000 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$];
 VPAD volume de perdas de água na distribuição [$1.000 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$];
 AG024 volume de água de serviço [$1.000 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$].

O *output* auxiliar considerado é a extensão da rede de água (referência SNIS AG005), utilizado para representar a dispersão geográfica e escala espacial de atendimento do serviço, conforme a literatura. O comprimento de adutoras é um dos fatores-chave para a determinação de indicadores de perdas de água mais realistas, segundo Lambert *et al.* (1999).

No âmbito da eficiência hídrica considerada no trabalho, a função adicional do *output* AG005 é a de considerar a maior susceptibilidade às perdas por vazamento devido à grande extensão da rede, além de expressar, indiretamente, a qualidade da rede. Essa condição pode ser exemplificada ao se considerar dois sistemas com os mesmos volumes micromedidos e perdas na distribuição, porém, com extensões de rede diferentes. Comparando esses sistemas, pode-se inferir que a rede de maior extensão apresenta um menor índice de perdas lineares (perdas por km de rede) sendo, proporcionalmente, mais eficiente que a rede menor.

A revisão da literatura indicou uma série de outros fatores influentes sobre as perdas de água em sistemas de abastecimento, porém, sua indisponibilidade na base SNIS (BRASIL, 2012b), e incompatibilidades funcionais em relação ao modelo proposto, impedem sua consideração no estudo. Optou-se em não considerar o número de conexões ou sua densidade no modelo DEA, apesar dessas variáveis estarem presentes no banco de dados SNIS (BRASIL, 2012b) e serem consideradas em alguns trabalhos da literatura como influentes sobre as perdas de água. Além disso, conexões são, fisicamente, pontos de maior vulnerabilidade a vazamentos na rede.

Essa opção é decorrente do fato de serem consideradas tais variáveis não funcionais no contexto da DEA, e que sua inclusão como input ou output poderia comprometer o cálculo da eficiência hídrica. Isso porque dois sistemas idênticos, com os mesmos volumes captados, volumes consumidos e comprimentos de rede, podem apresentar diferentes densidades de conexões, caso essas possuam níveis de consumo (volumes médios consumidos por conexão) e padrões de consumo (variação das demandas ao longo do tempo) diferentes. A Figura 67

apresenta o fluxograma funcional de inputs e outputs considerado no modelo de DEA proposto.

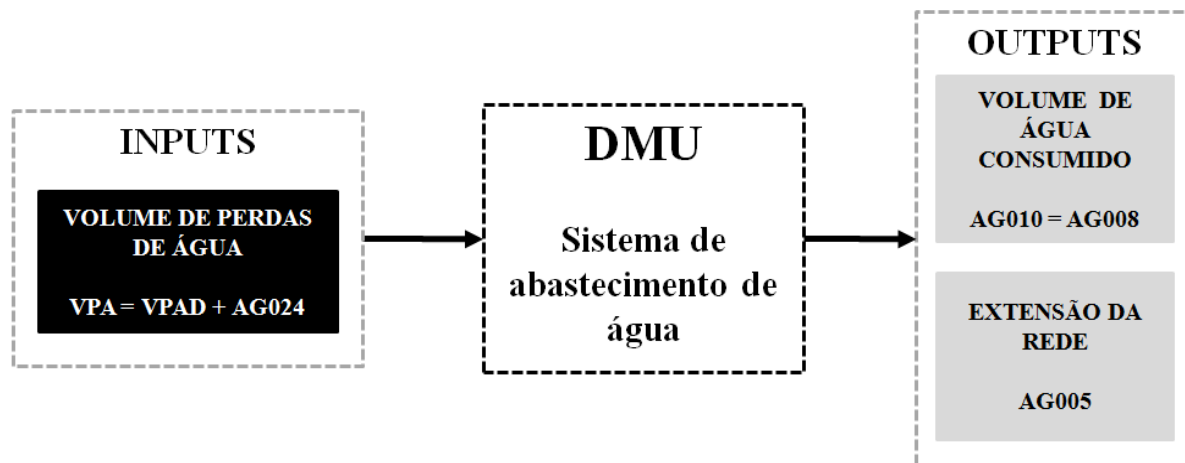


Figura 67 – Modelo funcional de inputs e outputs proposto para DEA

Os seguintes sistemas apresentaram todos os indicadores considerados e atenderam aos critérios de seleção deste estudo, sendo considerados, então, como DMUs: Altinópolis, Américo Brasiliense, Andradina, Araçoiaba da Serra, Ariranha, Atibaia, Barretos, Bebedouro, Brodowski, Cajobi, Cândido Mota, Capivari, Castilho, Catanduva, Cerquilha, Cordeirópolis, Guaiçara, Guapiaçu, Guaratinguetá, Iacanga, Ibitinga, Ilha Solteira, Ipeúna, Itajobi, Itapira, Itu, Ituverava, Jaboticabal, Jaguariúna, José Bonifácio, Junqueirópolis, Leme, Limeira, Louveira, Matão, Moji Mirim, Morro Agudo, Nova Castilho, Nova Europa, Nova Odessa, Orlandia, Ourinhos, Palestina, Palmital, Panorama, Parisi, Pedreira, Penápolis, Pindorama, Piracicaba, Pirangi, Pirassununga, Pompéia, Promissão, Rafard, Ribeirão Preto, Rio Claro, Salto, Santa Adélia, Santa Bárbara D'Oeste, Santa Branca, Santa Fé do Sul, Santa Rita do Passa Quatro, Santo Antônio de Posse, São Carlos, São Sebastião da Gramma, Sorocaba, Tabapuã, Tabatinga, Taiúva, Valinhos. Dois sistemas foram eliminados do conjunto inicial de DMUs, por apresentarem dados discrepantes: Águas de Lindóia, cuja extensão da rede em relação aos volumes produzidos é significativamente superior à dos demais sistemas, e São João de Iracema, cujo índice de perdas de água se aproximou de 0% (0,4%).

A Tabela 25 apresenta as características básicas dos *inputs* e *outputs* considerados; a Tabela 26 apresenta as variáveis de cálculo de cada *input* e *output*; a Tabela 27, por sua vez, apresenta um resumo das principais estatísticas dos *inputs* e *outputs*. Segundo Cooper *et al.* (2007), a quantidade de DMUs consideradas (n) deve ser igual ou maior que o maior valor obtido entre o produto do número de *inputs* (m) e *outputs* (s), ou o triplo da soma do número

de insumos (m) e produtos (s). No caso estudado, $n = 71$, $m = 1$ e $s = 2$, valores estes enquadrados no critério proposto por Cooper *et al.* (2007). A Tabela 28 apresenta a matriz de correlação entre os *inputs* e *outputs* utilizados.

Tabela 25 – *Inputs* e *outputs* considerados

Função	Variável	Unidade	Sigla
<i>Input</i>	Volume de perdas de água	1.000 m ³ .ano ⁻¹	VPA
<i>Output</i>	Volume de água consumido	1.000 m ³ .ano ⁻¹	AG010
	Extensão da rede	km	AG005

Tabela 26 – Equações necessárias ao cálculo dos *inputs* e *outputs*

Função	Sigla	Variáveis associadas	Equação para cálculo
<i>Input</i>	VPA	VPAD, AG024	VPA = VPAD + AG024
<i>Output</i>	AG010	-	-
	AG005	-	-

Tabela 27 – Principais estatísticas dos *inputs* e *outputs* considerados

	<i>INPUT</i>	<i>OUTPUTS</i>	
	VPA [1.000 m ³ .ano ⁻¹]	AG005 [km]	AG010 [1.000 m ³ .ano ⁻¹]
Mínimo	15,00	5,65	85,80
Média	3.887,33	287,49	5.078,12
Máximo	43.083,00	1.792,00	51.712,00
Desvio padrão	7.240,89	360,80	8.570,81

Tabela 28 – Matriz de correlação entre *inputs* e *outputs*

VARIÁVEL	VPA	AG005	AG010
VPA	1,000		
AG005	0,882	1,000	
AG010	0,941	0,929	1,000

Verifica-se na Tabela 27 que os *inputs* e *outputs* apresentam grande dispersão em relação às suas médias, mesmo considerando apenas serviços de abrangência local. A Tabela 28 demonstra que os *inputs* e *outputs* considerados apresentam forte correlação positiva entre si. A alta correlação entre as variáveis, que poderia comprometer a capacidade discriminatória da eficiência durante a DEA, não representa uma evidência de inadequação do conjunto de *inputs* e *outputs* considerados, conforme proposto por Dyson et al. (2001). Pode ser verificado nos resultados da análise que, apesar da alta correlação das variáveis, a DEA foi capaz de discriminar satisfatoriamente as DMUs eficientes das ineficientes. A discriminação insatisfatória ocorre quando muitas DMUs são consideradas eficientes, ao contrário do que ocorre no presente estudo, no qual sete DMUs são eficientes no modelo BCC, e apenas duas

no modelo CCR.

3.7.4.5 Seleção do modelo de DEA

Optou-se por utilizar a orientação a *inputs* na DEA assumindo-se que a eficiência hídrica do sistema é obtida através da redução da apropriação de água dos mananciais (representada pelos volumes de água perdido) mantendo-se os mesmos níveis de atendimento. Futuros estudos podem considerar a orientação a *outputs*, de forma a se avaliar, por exemplo, o gerenciamento hídrico pelo lado da demanda, ou a adoção de programas de conservação e uso racional da água pelos consumidores. Decidiu-se também considerar simultaneamente os modelos CCR-CRS e BCC-VRS de forma a se avaliar a eficiência global do sistema, a eficiência puramente técnica e a influência da escala na eficiência, sendo essa uma prática comum na literatura, como apresentado no apêndice G.

A análise envoltória de dados é realizada através de um processo de otimização por programação linear, conforme descrito a seguir. Seja n a quantidade de DMUs, cada uma delas identificada por DMU_j ($j = 1, 2, 3, \dots, n$). Cada DMU utiliza uma quantidade “ m ” de *inputs* x_{ij} ($i = 1, 2, 3, \dots, m$) produzindo uma quantidade “ s ” de *outputs* y_{rj} ($r = 1, 2, 3, \dots, s$). Matematicamente, a eficiência técnica (Ef) de uma DMU, que representará, nesse estudo, o índice de eficiência hídrica, é definida pela equação (45).

$$Ef = IEH = \frac{\text{soma ponderada dos outputs}}{\text{soma ponderada dos inputs}} = \frac{\sum_{r=1}^s u_r \cdot y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i \cdot x_{ij}} \quad (45)$$

O modelo básico de análise envoltória de dados é o CCR-CRS, que calcula a eficiência de uma DMU_o (unidade em análise) de um conjunto de n unidades atribuindo pesos (u_r e v_i) que maximizam suas eficiências individuais, de acordo com a equação (46), e sujeita às restrições das equações (47) e (48).

$$\max_{u,v} Ef = \frac{\sum_{r=1}^s u_r \cdot y_{ro}}{\sum_{i=1}^m v_i \cdot x_{io}} \quad (46)$$

$$\frac{\sum_{r=1}^s u_r \cdot y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i \cdot x_{ij}} \leq 1 \text{ sendo } j=1,2,3,\dots,n \quad (47)$$

$$u_r, v_i \geq 0 \quad (48)$$

Esse problema de maximização fracional, que pode ser convertido em um problema de programação linear através da equação (49) e sujeito às restrições das equações (50) a (52), é conhecido como forma de multiplicadores (primal) CCR (CRS) orientada a *inputs*.

$$\max_{u,v} z = \sum_{r=1}^s u_r \cdot y_{ro} \quad (49)$$

$$\sum_{i=1}^m v_i \cdot x_{io} = 1 \quad (50)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r \cdot y_{rj} \leq \sum_{i=1}^m v_i \cdot x_{ij} \text{ sendo } j = 1,2,3,\dots,n \quad (51)$$

$$u_r, v_i \geq 0 \quad (52)$$

A forma CCR de envelope consiste em um problema equivalente (dual) à forma de multiplicadores. Seja X um vetor de *inputs* ($X = x_j$) e Y um vetor de *outputs* ($Y = y_j$), θ uma variável real e λ um vetor não negativo ($\lambda = \lambda_j$). A forma de envelope (dual) do modelo CCR é dada pela equação (53), sujeita às equações (54) a (56).

$$\min_{\theta, \lambda} \theta \quad (53)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} \cdot \lambda_j \leq \theta \cdot x_{io} \text{ sendo } i=1,2,3,\dots,m \quad (54)$$

$$\sum_{j=1}^n Y_{rj} \cdot \lambda_j \leq \theta \cdot y_{ro} \text{ sendo } r=1,2,3,\dots,s \quad (55)$$

$$\lambda_j \geq 0 \text{ sendo } j=1,2,3,\dots,n \quad (56)$$

O modelo BCC (VRS) é obtido a partir do modelo CCR, adicionando um fator de escala

(μ) à forma de multiplicadores (equações (57) a (61)) e uma restrição adicional (equação (66)) à forma de envelope (equações (62) a (66)).

$$\max_{u, v, \mu} z_{BCC} = \sum_{r=1}^s u_r \cdot y_{ro} + \mu \quad (57)$$

$$\sum_{i=1}^m v_i \cdot x_{io} = 1 \quad (58)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r \cdot y_{rj} \leq \sum_{i=1}^m v_i \cdot x_{ij} \text{ sendo } j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (59)$$

$$u_r, v_i \geq 0 \quad (60)$$

$$\mu \text{ é livre} \quad (61)$$

$$\min_{\theta_{BCC}, \lambda} \theta_{BCC} \quad (62)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} \cdot \lambda_j \leq \theta \cdot x_{io} \text{ sendo } i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (63)$$

$$\sum_{j=1}^n Y_{rj} \cdot \lambda_j \leq \theta \cdot y_{ro} \text{ sendo } r = 1, 2, 3, \dots, s \quad (64)$$

$$\lambda_j \geq 0 \text{ sendo } j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (65)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1. \quad (66)$$

Após calcular as eficiências individuais, as DMUS com máxima eficiência (a máxima eficiência possível durante a DEA é numericamente igual a 1) estabelecem a fronteira de possibilidades de produção (envelope). Em outras palavras, a distância de cada DMU até a fronteira eficiente corresponde à sua ineficiência. Adicionalmente, a DEA indica os fatores-chaves para o aumento da eficiência através da discretização da influência ponderada de cada *input* e *output* na eficiência global da DMU.

A natureza do retorno de escala (crescente ou decrescente) é definida através do cálculo da fronteira DEA não crescente, e sua comparação com a fronteira VRS: retornos crescentes

ocorrem nos pontos onde as fronteiras não coincidem, enquanto retornos decrescentes ocorrem nos pontos onde as fronteiras não crescentes e VRS são iguais (COELLI, 1996).

A DEA foi realizada computacionalmente através dos aplicativos Sistema Integrado de Apoio à Decisão (SIAD) (ÂNGULO MEZA *et al.*, 2005) e DEAP 2.1 (COELLI, 1996).

3.7.4.6 Definição de *benchmarks* e metas de redução de perdas de água

Os sistemas de abastecimento de referência em termos de perdas de água foram assumidos como aqueles definidos eficientes através da DEA (IEHCCR E IEHBCC iguais a 100%). Sistemas CCR eficientes (IEHCCR = 100%) são *benchmarks* globais enquanto os BCC eficientes (IEHBCC = 100%) são *benchmarks* locais. As metas de redução de perdas de água de cada modelo são definidas através da comparação radial entre a eficiência da DMU considerada e seu respectivo *benchmark*, sendo o valor alvo de *inputs* (perdas de água) calculado automaticamente pelas ferramentas computacionais utilizadas. As metas referentes ao modelo CCR são consideradas metas de longo prazo, enquanto aquelas atreladas ao modelo BCC são assumidas de curto prazo.

Uma vez estabelecidos os valores alvo de perdas de água (VAPA), pode-se calcular o índice de perdas de água alvo (IPAA) através da abordagem tradicional, conforme equação (67). O IPAA e VAPA definirão as metas globais (IPAACCR E VAPACCR) e locais (IPAABCC e VAPABCC) de redução.

$$IPAA = \left(1 - \frac{AG010}{AG010 + VAPA} \right) \cdot 100 \quad (67)$$

sendo:

- IPAA índice de perdas de água alvo [%];
- AG010 volume de água consumido [1.000 m³.ano⁻¹];
- VAPA volume de perdas de água alvo [1.000 m³.ano⁻¹].

Para a caracterização dos sistemas de referência e menos eficientes, bem como para a comparação dos índices de eficiência hídrica com os índices de perdas de água tradicionais, tais índices tradicionais foram calculados utilizando as equações (68) e (69).

$$IPA = \left(1 - \frac{AG010}{VABC} \right) \cdot 100 \quad (68)$$

sendo:

IPA índice de perdas de água tradicional [%];
 AG010 volume de água consumido [$1.000 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$];
 VABC volume de água bruta captada [$1.000 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$].

$$\text{IPL} = \frac{\text{VABC} - \text{AG010}}{\text{AG005}} \quad (69)$$

sendo:

IPL índice de perdas lineares [$1.000 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$];
 AG010 volume de água consumido [$1.000 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$];
 AG005 extensão da rede de água [km].

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados da modelagem dos indicadores de eficiência hidráulica e energética propostos. Quando possível, os resultados dos casos estudados para a avaliação dos indicadores são comparados com resultados presentes na literatura.

4.1 INDICADOR DE OPERAÇÃO OTIMIZADA DE BOMBEAMENTO

As Tabelas 29 e 30 apresentam os resultados da otimização de bombeamento para os dois pontos de operação da estação elevatória de água bruta da COPASA/Itajubá.

Tabela 29 – Resultados da otimização – ponto de operação 1

PONTO 1	SITUAÇÃO	OTIMIZADO
Q_{DS} [L.s ⁻¹]	174,8	174,8
H_{DS} [m]	102,70	102,70
Q_1 [L.s ⁻¹]	174,8	174,8
H_1 [m]	102,82	102,70
n_1 [rpm]	1772,0	1771,2
η_{B1} [%]	78,3%	78,3%
P_{HID1} [kW]	176,31	176,11
P_{EIXO1} [kW]	225,24	224,99
η_{M1} [%]	95,08%	95,09%
η_{IF} [%]	100,0%	97,0%
P_{EL1} [kW]	236,90	243,94
Q_3 [L.s ⁻¹]	-	-
H_3 [m]	-	-
n_3 [rpm]	-	-
η_{B3} [%]	-	-
P_{HID3} [kW]	-	-
P_{EIXO3} [kW]	-	-
η_{M3} [%]	-	-
η_{IF} [%]	-	-
P_{EL3} [kW]	-	-
P_{ELTOT} [kW]	236,90	243,94

Tabela 30 – Resultados da otimização – ponto de operação 2

PONTO 2	SITUAÇÃO	OTIMIZADO
$Q_{DS} [L.s^{-1}]$	235,8	235,8
$H_{DS} [m]$	114,9	114,9
$Q_1 [L.s^{-1}]$	138,4	132,71
$H_1 [m]$	114,9	114,9
$n_1 [rpm]$	1772,0	1761,4
$\eta_{B1} [\%]$	77,1%	76,4%
$P_{HID1} [kW]$	156,04	149,59
$P_{EIXO1} [kW]$	202,48	195,72
$\eta_{M1} [\%]$	95,6%	95,6%
$\eta_{IF} [\%]$	100,0%	97,0%
$P_{EL1} [kW]$	211,82	210,96
$Q_3 [L.s^{-1}]$	98,3	103,09
$H_3 [m]$	114,9	114,9
$n_3 [rpm]$	1772,0	1780,0
$\eta_{B3} [\%]$	62,3%	63,4%
$P_{HID3} [kW]$	110,81	116,20
$P_{EIXO3} [kW]$	177,77	183,36
$\eta_{M3} [\%]$	95,6%	95,6%
$\eta_{IF} [\%]$	100,0%	97,0%
$P_{EL3} [kW]$	186,02	197,68
$P_{ELTOT} [kW]$	397,84	408,64

A partir das potências simuladas e apresentadas nas Tabelas 29 e 30, foram elaborados perfis de cargas elétricas médios para os dias úteis, sábados e domingos, conforme Figuras 68 a 70.

Com base nos perfis de carga apresentados, foi calculado o consumo médio mensal, cujos valores são apresentados a seguir.

- Consumo energético atual (C_{ELA}) 160.490,0 kWh
- Consumo energético otimizado (C_{ELO}) 165.034,3 kWh

Uma vez calculados os valores de potência máxima e consumos, atuais e otimizados, é calculado o indicador de operação otimizada de bombeamento, nas suas parcelas potência e consumo:

- $$I_{OOBP} = \frac{\text{Min}(P_{ELTOTjm})}{P_{ELTOTAjm}} \cdot 100 = \frac{408,64}{397,84} \cdot 100 = 102,7\%$$

- $$I_{\text{OoBC}} = \frac{C_{\text{ELO}}}{C_{\text{ELA}}} \cdot 100 = \frac{165.034,30}{160.490,00} \cdot 100 = 102,8\%$$



Figura 68 – Perfil horário de cargas elétricas na captação de Itajubá – dias úteis

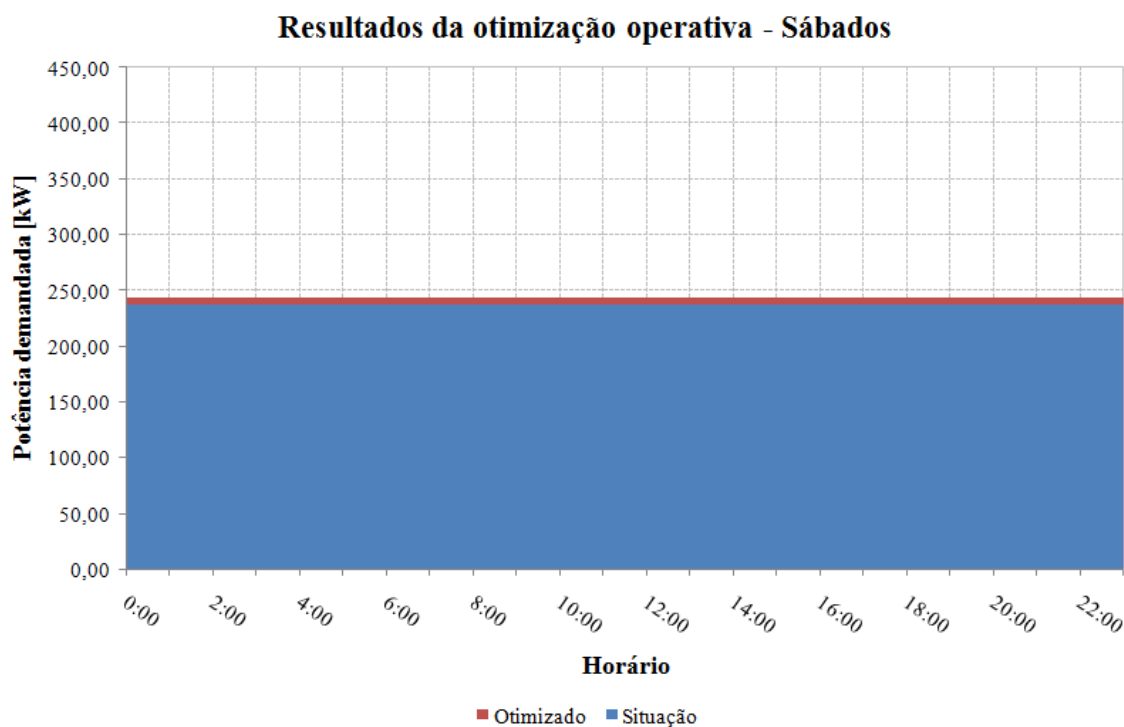


Figura 69 – Perfil horário de cargas elétricas na captação de Itajubá – sábados

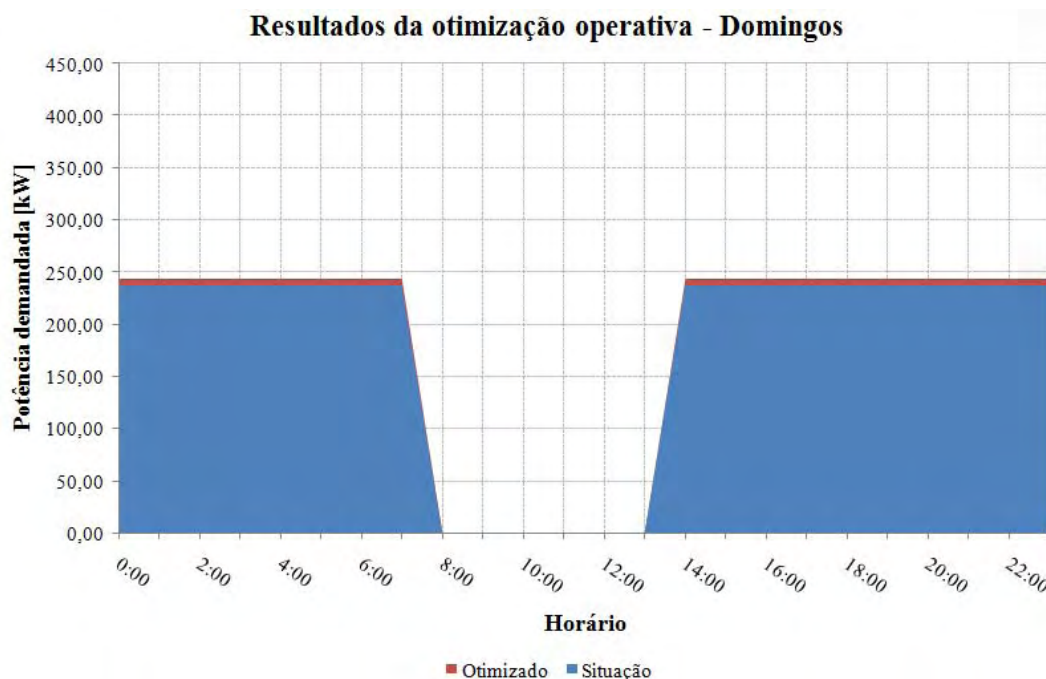


Figura 70 – Perfil horário de cargas elétricas na captação de Itajubá – domingos

Analisando os resultados do I_{OEB} obtidos, segundo a interpretação do indicador apresentada na seção 3.7.1.2, verifica-se que o sistema de bombeamento da COPASA/Itajubá analisado opera em seu ponto de máxima eficiência, considerando os perfis de bombeamento atuais. O fato de o sistema operar em apenas dois pontos, em dois valores discretos de vazão, apresenta grande influência sobre esse resultado, tendo em vista que os dois conjuntos moto-bomba operam muito próximos aos pontos de máxima eficiência. Os valores dos indicadores demonstram que a utilização de conversores de frequência representaria uma redução de 3% na eficiência atual do sistema (vale lembrar que, no caso estudado, não foram consideradas as influências da variação da velocidade sobre o rendimento dos motores).

Apesar de o caso de otimização operativa do bombeamento estudado, conforme modelado, ter demonstrado que este sistema da COPASA/Itajubá já opera num estado próximo ao ótimo, alguns trabalhos presentes na literatura indicam grandes potenciais de conservação de energia em SAAs através do uso de conjuntos moto-bomba com rotação variável. A XENERGY (1998⁵² *apud* BRASIL, 2007d) quantifica esse potencial de conservação numa faixa de 30% a 80% do consumo de energia, enquanto a NYSERDA (2010) estima o potencial de conservação de energia associado ao uso de conjuntos moto-bomba com rotação variável entre 10% e 50%.

⁵² XENERGY. **United States industrial motor systems market opportunities assessment**. Burlington: XENERGY, 1998 *apud* BRASIL. Ministério de Minas e Energia; Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2030**. v. 12. Brasília: MME; EPE, 2007d.

Deve-se ressaltar que, conceitualmente, o I_{OEB} assume os perfis de vazão atuais em seu cálculo. Estes perfis podem não ser os ótimos, do ponto de vista hidráulico e energético, uma vez que através do conhecimento dos perfis de consumo de água e da operação de reservatórios associados, pode-se definir um perfil ótimo de bombeamento que minimize o consumo e demanda de energia. Vislumbrando-se trabalhos para a continuidade da presente pesquisa, pretende-se associar ao indicador de otimização de bombeamento um módulo que considere a associação das estações elevatórias à operação otimizada de reservatórios, que irá definir não somente o esquema ótimo de bombeamento, mas também o perfil de vazões relacionado às demandas, níveis e volumes úteis dos reservatórios.

4.2 INDICADOR DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA HIDRÁULICA

A partir da metodologia descrita na seção 3.7.2, foi proposto um modelo de indicador de recuperação de energia hidráulica, testado a partir do caso da COPASA/Itajubá. Com base nos dados e modelagem desenvolvida para o caso, foram obtidos os seguintes valores do indicador. A parcela consumo foi calculada tendo como período de análise um mês, considerando, para tal, o consumo médio mensal descrito na Tabela 23.

- $$I_{REHP} = \frac{P_{HELMÁX}}{D_{EL}} \cdot 100 = \frac{55,6}{32,3} \cdot 100 = 172,1\%$$
- $$I_{REHD} = \frac{P_{HELP}}{D_{EL}} \cdot 100 = \frac{52,1}{32,3} \cdot 100 = 161,3\%$$
- $$I_{REHC} = \frac{EHE_P}{CEE} \cdot 100 = \frac{37.505}{13.461} \cdot 100 = 278,6\%$$

Conforme a interpretação do indicador apresentada na seção 3.7.2.2, os valores acima indicam que o sistema de adução de água bruta da Serra dos Toledos poderia tornar a ETA de Itajubá autossuficiente em termos energéticos, por ocasião da instalação de um sistema de recuperação de energia hidrelétrica. O potencial de geração deste sistema é superior à demanda e consumo da ETA, tendo em vista que todas as parcelas do indicador apresentaram valores significativamente superiores a 100%.

A parcela potência do indicador (I_{REHP}) demonstra que a implantação do sistema hidrelétrico no final do sistema de adução de água bruta da Serra dos Toledos pode suprir

totalmente a demanda da ETA, caso a operação desse sistema permita sincronizar a potência gerada com a demanda da ETA. Nesse caso, verificou-se que a potência hidrelétrica máxima passível de geração excede em 72,1% a demanda da ETA. Considerando a análise de perdas de carga desenvolvida na seção 3.7.2.3, verificou-se que a máxima potência gerada ocorre com uma vazão ligeiramente superior à mínima aduzida pelo sistema (57 l.s^{-1}), demonstrando que a microcentral hidrelétrica poderia atender à demanda da ETA mesmo durante o período de estiagem.

A parcela demanda (I_{REHD}), que leva em consideração a vazão média do sistema, também indicou a capacidade de pleno atendimento à demanda da ETA, inclusive com um excedente de potência de 61,3%.

A parcela consumo (I_{REHC}) apresentou o maior valor dentre todas, 278,6%, indicando que, além de atender totalmente ao consumo da ETA, o sistema de recuperação de energia hidrelétrica é capaz de fornecer um excedente energético de 178,6%.

O caso estudado demonstrou-se bastante peculiar, em função do enorme excedente energético potencialmente gerado pelo sistema de recuperação de energia proposto. Esse cenário favorável pode ser atribuído, principalmente, ao grande desnível topográfico existente entre a captação da Serra dos Toledos e a ETA de Itajubá. Esse desnível proporciona a possibilidade de atendimento da demanda e consumo da ETA, mesmo com as vazões características do sistema, da ordem de dezenas de litros por segundo. Por outro lado, a grande distância entre esses dois pontos, resultando numa tubulação com mais de 7 km de extensão, acarretou enormes perdas de carga, sendo este um significativo fator limitante da capacidade de recuperação de energia hidrelétrica.

A forma percentual de apresentação do resultado do indicador é adequada para a análise de gestores técnicos de SAAs, e também para um melhor entendimento por parte de tomadores de decisão com menor conhecimento tecnológico (caso, por exemplo, de gestores financeiros). Através de simples operações matemáticas, estes indicadores podem ser convertidos em valores de energia, demanda e unidades financeiras (considerando as classes tarifárias vigentes), permitindo a análise da viabilidade e/ou atratividade da implantação do sistema de recuperação de energia.

Em termos práticos, uma vez aplicado o indicador de recuperação de energia hidráulica e constatada a capacidade de recuperação, estudos de engenharia mais detalhados devem ser desenvolvidos visando-se verificar, por exemplo, a resistência das tubulações à operação sob alta pressão (tendo em vista que muitas adutoras de água bruta utilizam dispositivos de alívio de pressão), necessidade e custos de obras civis e, até mesmo, a possibilidade de substituição

das tubulações, de forma a se obter uma maior potência através da redução das perdas de carga ou garantir sua resistência à nova pressão, tudo isso a partir de uma análise dos custos de investimento e evitados na compra de energia.

Conforme mencionado na seção 3.7.2, foi aprovada recentemente pela ANEEL a resolução normativa nº 482 (BRASIL, 2012a), que define regras para acesso de micro e minicentrals à rede elétrica interligada. Esta resolução é de grande relevância no contexto do indicador de recuperação de energia, tendo em vista que, na existência de excedentes energéticos como no caso estudado, outras unidades do SAA poderiam ser beneficiadas pela recuperação de energia hidrelétrica.

Um exemplo deste benefício pode ser visualizado na própria COPASA/Itajubá, cujo maior consumo e demanda são atribuídos ao sistema de recalque de água bruta na captação do Rio Sapucaí. A possibilidade de se deduzir demandas e consumos dessa captação por meio de microgeração na ETA pode desonerar de forma ainda mais significativa o sistema como um todo, tendo em vista que a captação do Rio Sapucaí obedece a classe tarifária horosazonal verde A4. Através de estudos detalhados dos perfis de geração hidrelétrica da ETA e cargas da captação, poderia ser definido um perfil ótimo de operação conjunta dos dois sistemas, minimizando o consumo/demanda e, conseqüentemente, as despesas com energia da COPASA. O caso estudado para avaliação do indicador de recuperação de energia hidráulica mostrou-se bastante favorável, tendo em vista que, além de suprir as necessidades da ETA, o sistema proposto resultaria na possibilidade de geração de um excedente energético, possivelmente utilizado para suprir outras unidades da COPASA/Itajubá.

É difícil definir valores de referência gerais para o potencial de recuperação de energia hidráulica em SAAs, tendo em vista que este potencial é altamente variável em função das condições de cada sistema (principalmente devido à topografia do SAA considerado e o arranjo de suas estruturas). Kucukali (2010a,b), por exemplo, avaliou o potencial de recuperação de energia hidrelétrica de 45 barragens de abastecimento de água da Turquia, concluindo que este conjunto de barragens pode produzir 173 GWh por ano de eletricidade, sem impactos ambientais, uma vez que todas as estruturas para adução de água já existem.

4.3 INDICADOR DE CARGA HIDRÁULICA DISPONIBILIZADA

São apresentados a seguir os resultados dos dois estudos de caso desenvolvidos para análise do indicador de carga hidráulica disponibilizada.

4.3.1 CASO 1: REDE DE DISTRIBUIÇÃO DO SETOR ACLIMAÇÃO

A partir do modelo hidráulico desenvolvido para o setor Aclimação, foram realizadas simulações para minimização da carga hidráulica disponibilizada, tendo como restrição a manutenção da pressão do nó crítico (J109) em 10 m, pressão mínima definida por norma NBR 12218 (ABNT, 1994b). A Figura 71 apresenta as cargas hidráulicas totais disponibilizadas ao setor atualmente e após otimização.

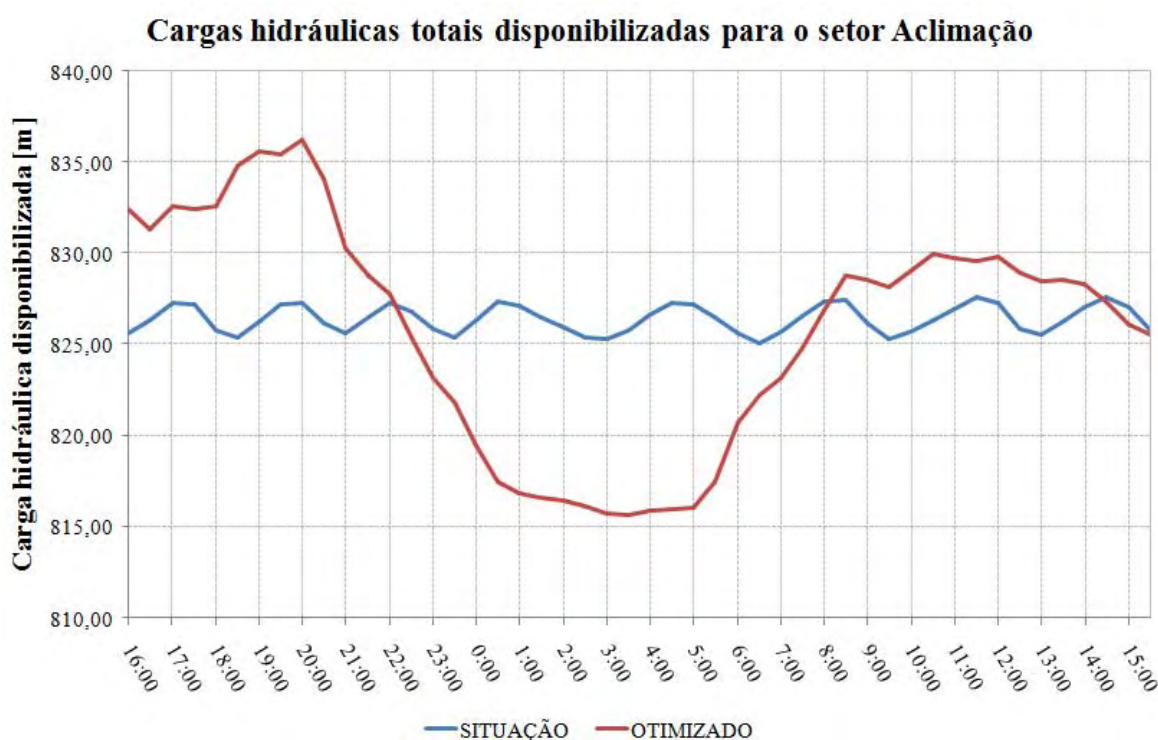


Figura 71 – Perfil horário de cargas hidráulicas disponibilizadas ao setor Aclimação

Na Figura 71, percebe-se que durante os períodos de alta demanda (entre 16 h e 22 h e 8 h e 30 min e 14 h e 30 min) existe um déficit de energia na rede, resultando em pressões inferiores às mínimas admissíveis nas zonas mais altas do setor. Por outro lado, no período de menor demanda (entre 22 h e 8 h) verifica-se a ocorrência de cargas hidráulicas excessivas, que se traduzem em desperdício de energia elétrica devido ao bombeamento e também a intensificação de perdas por vazamento na rede.

Para o cálculo do indicador de carga hidráulica disponibilizada, foi assumida como referência altimétrica a cota 811,60 m, referente à base do reservatório que abastece o setor Aclimação. Subtraindo-se as cargas totais (apresentadas na Figura 71) dessa cota, definem-se as cargas fornecidas. Esta cota foi selecionada em função de sua representatividade em termos

físicos, na qual convencionalmente podem ser instalados dispositivos para o gerenciamento das cargas na rede (bomba para suprimento de pressão suplementar durante períodos de déficit e válvulas para a redução de pressão em períodos de excesso).

A variabilidade das cargas na rede entre seus máximos e mínimos resultaria num valor médio muito próximo ao ótimo, caso a análise para o cálculo do indicador fosse efetuada considerando o período como um todo, mascarando a ineficiência hidráulica do sistema atual. Dessa forma, decidiu-se calcular o indicador de carga disponibilizada separadamente para os períodos de déficit e excesso de carga hidráulica. A partir da equação (40) (seção 3.7.3.1), foram calculados os indicadores de carga hidráulica disponibilizada instantâneos para cada intervalo do período de análise, conforme Tabelas 31 e 32.

Analisando-se a Tabela 31, verifica-se que, durante o período de déficit de carga hidráulica disponibilizada, o indicador de carga hidráulica disponibilizada assume o valor médio de 78,3%, ou seja, faz-se necessário um acréscimo médio de 21,7% na carga disponibilizada na base do reservatório. A altura do reservatório atual não permite tal operação, sendo, então, sugerida a inserção de uma bomba na adutora principal para a suplementação da carga. Essa medida permite que todos os nós da rede sejam atendidos continuamente com uma pressão mínima de 10 m, conforme definido pela norma NBR 12218 (ABNT, 1994b).

Já no período de excesso de pressão, o indicador de carga hidráulica disponibilizada assumiu o valor médio de 215,2%, representando um excesso de carga médio de 115,2%. A altura do reservatório atual também não permite seu deplecionamento até as cotas necessárias à redução da carga até o valor ótimo, sendo então sugerida a implantação de um reservatório secundário em cotas inferiores (sendo esta uma alternativa mais adequada, pois permitiria reduzir a altura de elevação das bombas nesse período) ou a instalação de uma válvula de redução de pressão na adutora (que permitiria a redução das pressões e consequentes perdas de carga, mantendo, porém, as mesmas alturas de elevação das bombas), ou uma combinação de ambas. O uso de turbinas hidráulicas para recuperação do excesso de pressão é uma alternativa secundária, uma vez que exigiria uma maior complexidade em termos de controle para que as cargas mínimas necessárias fossem mantidas.

A partir das simulações dos cenários atual e ótimo no EPANET, algumas repercussões do gerenciamento de pressões do setor Aclimação, de acordo com os valores definidos durante o cálculo do I_{CHD} , podem ser analisadas. A Figura 72 apresenta as pressões medianas na rede, sendo esta variável considerada, aqui, uma medida do comportamento geral da rede.

Tabela 31 – Indicador de carga hidráulica disponibilizada – período de déficit de pressão

PERÍODO DE DÉFICT		
CARGA DISPONIBILIZADA [m]		
SITUAÇÃO	OTIMIZADA	I _{CHD}
14,04	20,82	67,4%
14,73	19,7	74,7%
15,70	20,98	74,8%
15,65	20,81	75,2%
14,21	20,99	67,7%
13,77	23,23	59,3%
14,67	24,02	61,1%
15,61	23,87	65,4%
15,70	24,66	63,7%
14,58	22,52	64,8%
13,99	18,73	74,7%
14,88	17,17	86,7%
15,71	16,19	97,0%
15,22	13,79	
14,24	11,58	
13,75	10,26	
14,71	7,85	
15,77	5,91	
15,51	5,27	
14,92	5,00	
14,37	4,81	
13,81	4,55	
13,67	4,11	
14,22	4,05	
15,08	4,25	
15,72	4,33	
15,58	4,46	
14,91	5,87	
14,02	9,12	
13,50	10,62	
14,07	11,57	
14,99	13,22	
15,75	15,32	
15,84	17,17	92,3%
14,58	16,92	86,2%
13,73	16,52	83,1%
14,14	17,4	81,2%
14,74	18,36	80,3%
15,34	18,16	84,5%
15,98	18	88,8%
15,65	18,24	85,8%
14,27	17,37	82,2%
13,92	16,89	82,4%
14,69	16,98	86,5%
15,44	16,75	92,2%
16,02	15,74	
15,45	14,53	
14,16	13,96	
MÉDIA DÉFICT		78,3%
		21,7%

Tabela 32 – Indicador de carga hidráulica disponibilizada – período de excesso de pressão

PERÍODO DE EXCESSO		
CARGA DISPONIBILIZADA [m]		
SITUAÇÃO	OTIMIZADA	I _{CHD}
14,04	20,82	
14,73	19,7	
15,70	20,98	
15,65	20,81	
14,21	20,99	
13,77	23,23	
14,67	24,02	
15,61	23,87	
15,70	24,66	
14,58	22,52	
13,99	18,73	
14,88	17,17	
15,71	16,19	
15,22	13,79	110,4%
14,24	11,58	123,0%
13,75	10,26	134,0%
14,71	7,85	187,3%
15,77	5,91	266,8%
15,51	5,27	294,3%
14,92	5,00	298,4%
14,37	4,81	298,8%
13,81	4,55	303,6%
13,67	4,11	332,6%
14,22	4,05	351,1%
15,08	4,25	354,9%
15,72	4,33	362,9%
15,58	4,46	349,4%
14,91	5,87	254,0%
14,02	9,12	153,7%
13,50	10,62	127,1%
14,07	11,57	121,7%
14,99	13,22	113,4%
15,75	15,32	102,8%
15,84	17,17	
14,58	16,92	
13,73	16,52	
14,14	17,4	
14,74	18,36	
15,34	18,16	
15,98	18,00	
15,65	18,24	
14,27	17,37	
13,92	16,89	
14,69	16,98	
15,44	16,75	
16,02	15,74	101,8%
15,45	14,53	106,3%
14,16	13,96	101,4%
MÉDIA EXCESSO		215,2%
		115,2%

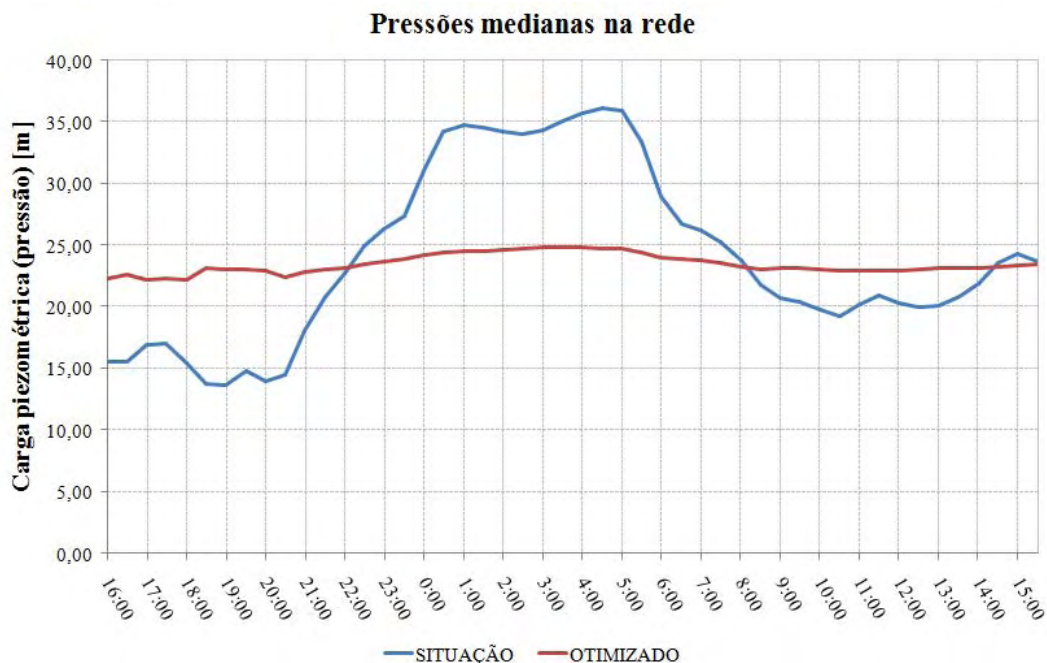


Figura 72 – Perfil horário de pressões medianas no setor Aclimação

Com base na Figura 72, percebe-se que pressões da ordem de 23,0 m seriam representativas da rede durante todo o período de análise, num cenário otimizado. No cenário atual, distinguem-se os períodos de déficit e de excesso de pressão. No período de maior demanda, 50% dos nós da rede apresentam pressões abaixo da faixa de 15,0 m, próxima ao valor mínimo admissível de 10,0 m. Já no período de mínima demanda, verificam-se pressões medianas na faixa de 35,0 m, na média 12,0 m acima do valor ótimo.

A Figura 73 apresenta as frequências de não-excedência de pressões na rede às 18:30 h, momento quando ocorrem as menores pressões. Como se pode observar, verifica-se que atualmente cerca de 45% dos nós da rede apresentam pressões inferiores ao mínimo admissível de 10,0 m durante o período de mínimas pressões. Com a carga hidráulica otimizada, todos os nós apresentam, pelo menos, 10,0 m de pressão nesse momento.

A Figura 74 apresenta as frequências de excedência de pressões na rede às 4 h e 30 min, momento quando ocorrem as maiores pressões. Percebe-se que, mediante a operação atual do sistema, aproximadamente 25% dos nós da rede apresentam pressões superiores ao limite admissível de 50,0 m durante o período de máximas. Segundo o perfil de cargas disponibilizadas ótimo, essa porcentagem é reduzida para apenas 5% dos nós.

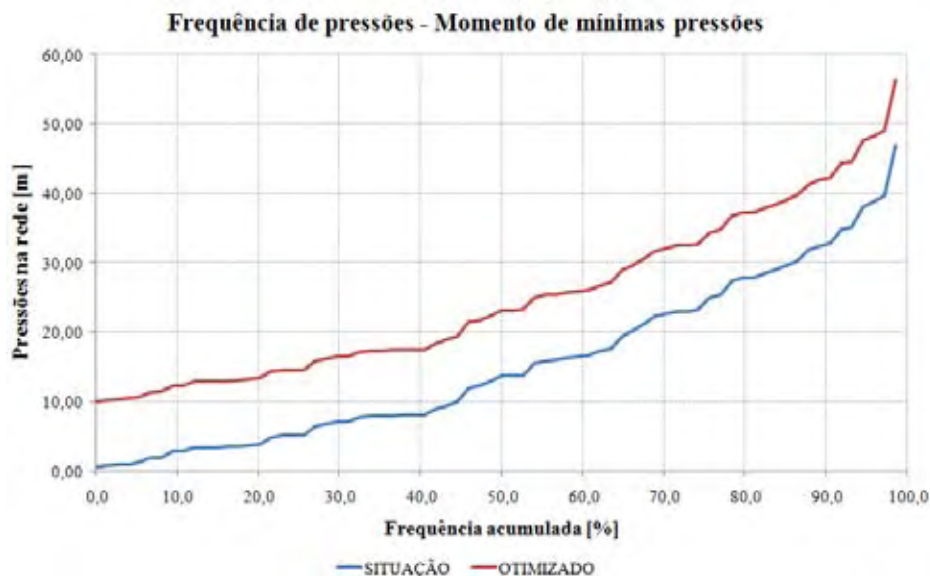


Figura 73 – Frequência de não-excedência de pressões, momento de mínimas pressões

Este caso estudado demonstrou que o indicador de carga hidráulica disponibilizada abordou não somente a eficiência no Setor Aclimação, mas também, indiretamente, a qualidade do serviço (efetividade), assumindo a característica de um indicador de desempenho. Isso ocorreu à medida em que o indicador identificou períodos no qual ocorre um déficit de pressão na rede, durante os quais os consumidores localizados em trechos mais elevados da rede estão sujeitos a pressões inferiores às mínimas admissíveis. As principais implicações da carga hidráulica ótima em SAAs referem-se à minimização das alturas de elevação de bombas (e consequente redução do seu consumo energético) e também das perdas de água devido à redução de pressões.

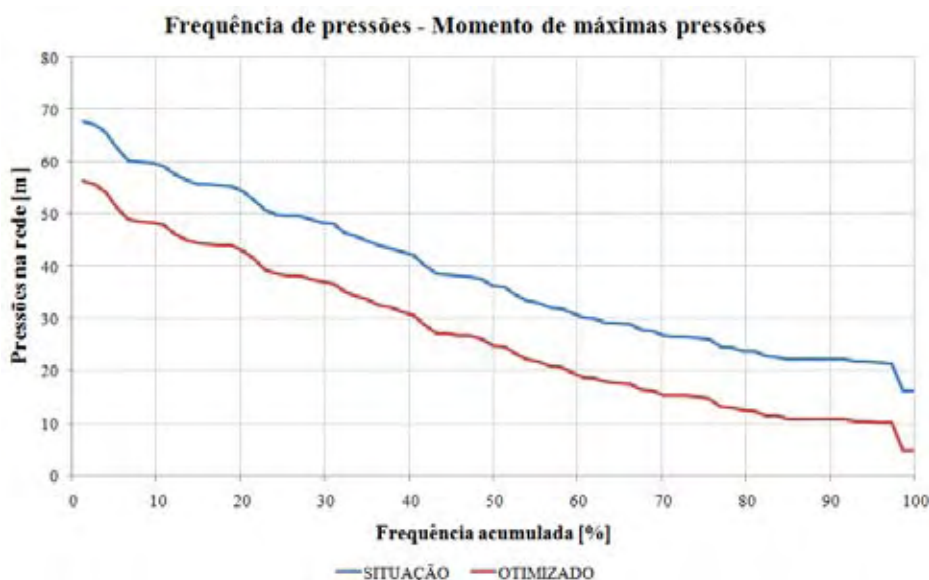


Figura 74 – Frequência de excedência de pressões, momento de máximas pressões

Alguns trabalhos relatam os resultados advindos deste tipo de medida. Marunga *et al.* (2006) monitoraram pressões e vazões em um setor da rede de distribuição de água da cidade de Mutare (Zimbabwe), para quantificar os efeitos da redução de pressão através de VRPs sobre as taxas de vazamento. Segundo os autores, uma redução de 35% na pressão resultou em uma redução de 25% nas taxas de vazamentos.

Girard e Stewart (2007) avaliaram os efeitos da detecção de vazamentos, redução da pressão através de VRPs e modulação da vazão sobre as vazões mínimas noturnas (um indicador comumente utilizado na análise de vazamentos em redes) numa área experimental de Gold Coast (Queensland/Australia). Estas práticas reduziram a vazão mínima noturna na área de 6,2 l.s⁻¹ para 3,25 l.s⁻¹ (redução de 47,6%). A organização *Alliance to Save Energy* (Alliance, 2007) reportou os seguintes resultados de ações de gerenciamento de pressão na cidade de Emfuleni (África do Sul): economia de energia de 14.000 MWh.ano⁻¹, economia de de água de 8.106 m³.ano⁻¹, emissões evitadas de gases estufa de 12.000 toneladas. O tempo de retorno destas ações de gerenciamento de pressão foi inferior a 3 anos.

4.3.2 CASO 2: ADUTORA DE RECALQUE DA CAPTAÇÃO DA COPASA/ITAJUBÁ

Conforme propostas metodológicas apresentadas na seção 3.7.3, foi realizada a simulação da curva do sistema considerando a redução da rugosidade atual da tubulação (curva ensaiada) para 0,00012 m, assumindo-se a utilização de procedimentos de reabilitação da mesma. Com base nesse novo valor e na altura real obtida por meio de ensaio, foi possível definir as curvas de carga disponibilizada atual e otimizada, conforme Figura 75.

A curva do sistema otimizada, considerando a redução das perdas de carga através da redução da rugosidade das tubulações para o valor de 0,00012 m, é representada pela equação (70).

$$H_{DSO} = 265,395 \cdot Q_{DS}^2 + 0,132 \cdot Q_{DS} + 80,39 \quad (70)$$

sendo:

H_{DSO} altura otimizada demandada pelo sistema [m];

Q_{DS} vazão demandada pelo sistema [m³.s⁻¹].

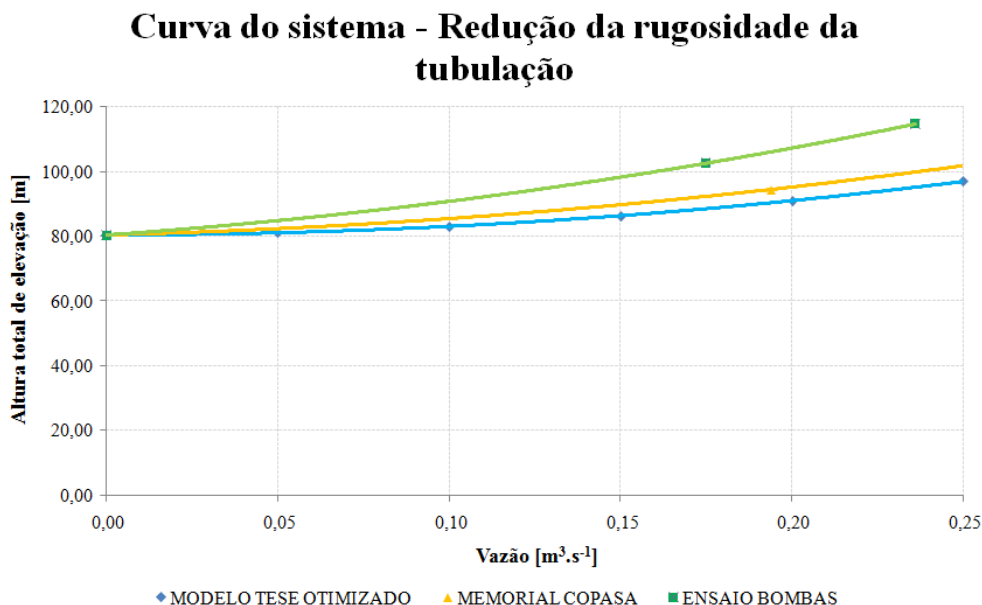


Figura 75 – Minimização da carga hidráulica disponibilizada para a adutora de água bruta da COPASA/Itajubá, captação do Rio Sapucaí

Conforme descrito na seção 3.7.1.3, o sistema de bombeamento de água bruta da captação do Rio Sapucaí, COPASA/Itajubá, opera atualmente em dois pontos distintos, definidos por pares de vazão e alturas de elevação, a saber:

- Ponto 1: vazão de $174,8 \text{ l.s}^{-1}$ e altura de elevação de 102,7 m;
- Ponto 2: vazão de $235,9 \text{ l.s}^{-1}$ e altura de elevação de 114,9 m.

Com base na curva otimizada do sistema (equação (70)), foram calculadas as novas alturas de elevação para o padrão de operação atual:

- Ponto 1: vazão de $174,8 \text{ l.s}^{-1}$ e altura de elevação de 88,52 m;
- Ponto 2: vazão de $235,9 \text{ l.s}^{-1}$ e altura de elevação de 95,18 m.

Assumindo o perfil semanal atual de demandas do sistema, já abordado e descrito na seção 3.7.1.3, foram estabelecidos os padrões de altura de elevação atual e otimizado, conforme Figuras 76 a 78.

Para o cálculo do indicador de carga hidráulica disponibilizada, foram consideradas as cargas médias semanais, representadas pelas médias aritméticas das cargas representadas nos perfis das Figuras 76 a 78.

- $$I_{\text{CHD}} = \frac{H_A}{H_{\text{OTM}}} \cdot 100 = \frac{84,69}{71,73} \cdot 100 = 118,06\%$$

O valor do indicador de 118,06% demonstra que o atual nível de perdas de carga da adutora elevatória de água bruta da COPASA/Itajubá representa um desperdício de 18,06% em relação ao seu valor médio ótimo, obtido através da redução da rugosidade da tubulação para um valor de 0,00012 m, correspondente ao valor de rugosidade previsto para tubos de aço novos. O desperdício de energia devido a tais perdas de carga é da mesma ordem de 18,06%, dada a relação linear entre potência consumida e altura de elevação dos conjuntos moto-bomba.

O valor do indicador demonstra também que o projeto e seleção dos conjuntos moto-bomba envolveram o seu superdimensionamento, possivelmente objetivando o atendimento a aumentos da demanda e também o envelhecimento da tubulação. Esta prática tradicional é uma significativa causa de ineficiência energética em sistemas de bombeamento, descrita, por exemplo, por Savar *et al.* (2009).

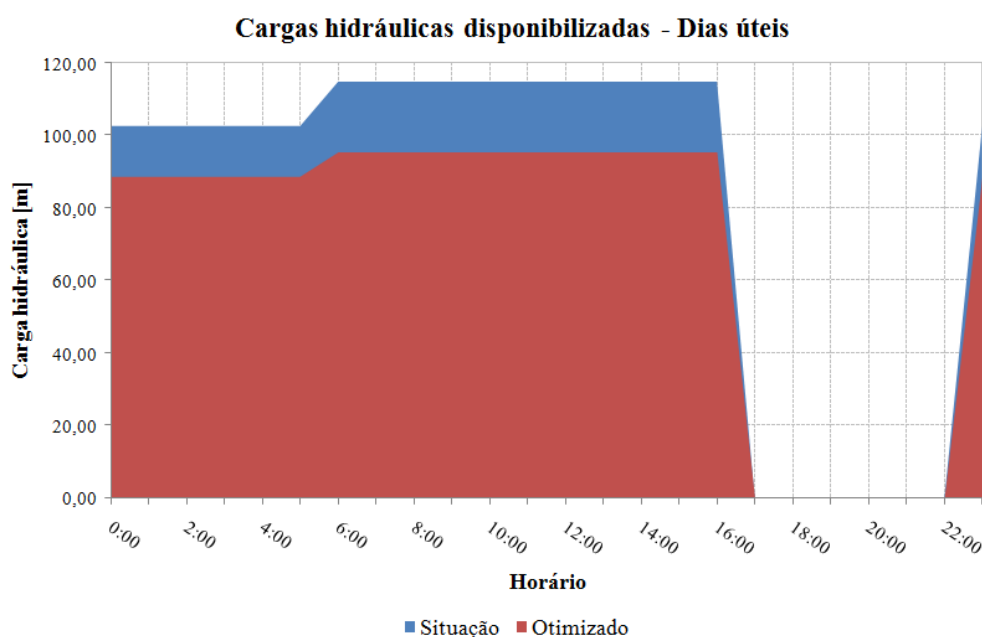


Figura 76 – Perfil de carga hidráulica disponibilizada para a adutora de água bruta da COPASA/Itajubá, captação do Rio Sapucaí – dias úteis

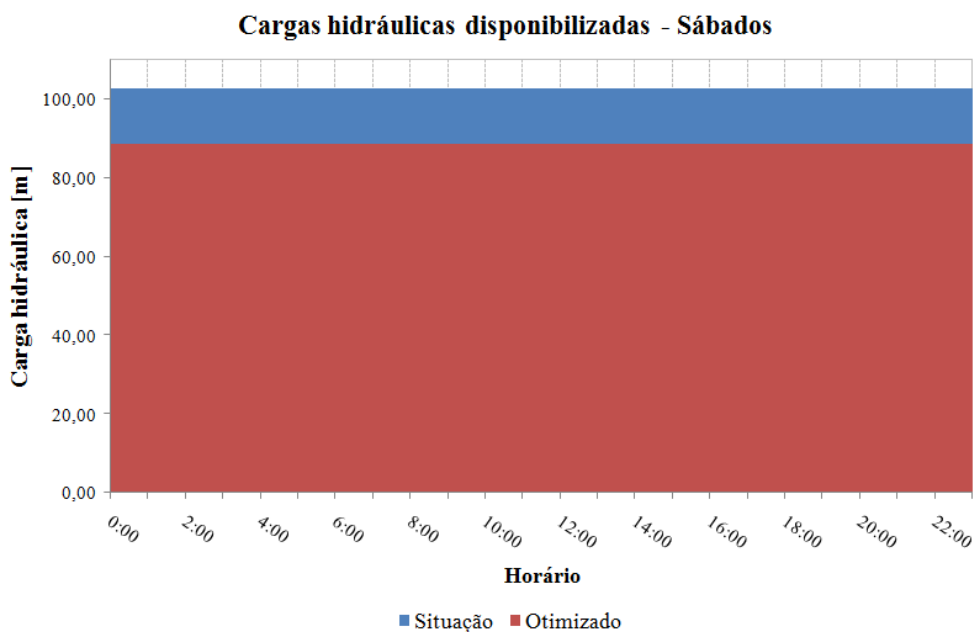


Figura 77 – Perfil de carga hidráulica disponibilizada para a adutora de água bruta da COPASA/Itajubá, captação do Rio Sapucaí – sábados

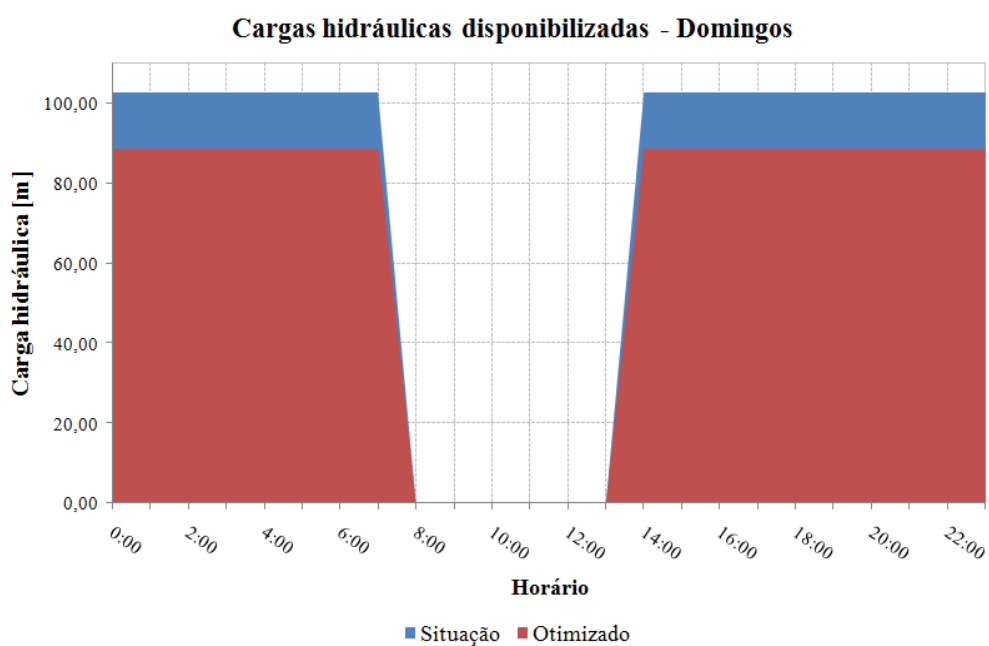


Figura 78 – Perfil de carga hidráulica disponibilizada para a adutora de água bruta da COPASA/Itajubá, captação do Rio Sapucaí – domingos

4.4 INDICADOR DE EFICIÊNCIA HÍDRICA

A Tabela 33 apresenta os resultados das eficiências calculadas através da DEA. As três primeiras colunas apresentam as eficiências hídricas globais (CCR), puramente técnicas (BCC) e de escala das DMUS. A coluna 4 identifica o tipo de retorno de escala (crescente,

decrecente ou constante) de cada DMU. As colunas 5 e 6 indicam as DMUs de referência (eficientes) segundo o modelo CCR, enquanto as colunas 7 a 9 indicam as DMUs eficientes segundo o modelo BCC.

As DMUs avaliadas apresentaram, na média, baixas eficiências hídricas globais ($IEHCCR_M$ de 33,7%) e puramente técnicas ($IEHBCC_M$ de 41,4%). O baixo valor de $IEHBCC_M$ demonstra que a tecnologia de produção dos SAAs de abrangência local do Estado de São Paulo é bastante precária, sendo que em média 58,6% das perdas de água poderiam ser eliminadas por meio de melhorias nos processos desenvolvidos entre a captação e os micromedidores dos consumidores.

A eficiência de escala média (84,2%) demonstra que, em se mantendo a mesma tecnologia de produção, os volumes médios de perdas de água nos sistemas podem ser reduzidos em 15,8% através da adequação das dimensões dos sistemas. Essa adequação pode ser feita, por exemplo, por meio de fusões de sistemas vizinhos ou pela setorização da operação de sistemas superdimensionados, de acordo com a natureza dos retornos de escala (crescentes ou decrescentes).

A partir dos resultados verifica-se 59% dos sistemas com retornos decrescentes de escala, 24% com retornos crescentes e 17% operando na escala correta.

Tabela 33 – Resultados da DEA

DMU	Eficiência técnica CCR (IEHCCR)	Eficiência puramente técnica BCC (IEHBCC)	Eficiência de escala	Retorno de escala	Benchmarks CCR		Benchmarks BCC	
Altinópolis	30,1%	34,4%	87,5%	DRS	TBP	TBP	JB	TBP
Américo Brasileiro	20,6%	20,6%	100,0%	-	SRPQ	TBP	SRPQ	PRs
Andradina	14,3%	18,3%	78,1%	DRS	SRPQ	TBP	LMR	JB
Araçoiaba da Serra	39,3%	50,4%	78,0%	DRS	TBP		LMR	JB
Ariranha	17,5%	17,6%	99,3%	IRS	SRPQ	TBP	SRPQ	PRs
Atibaia	14,3%	19,0%	75,2%	DRS	SRPQ	TBP	LMR	JB
Barretos	69,5%	93,1%	74,7%	DRS	SRPQ	TBP	LMR	JB
Bebedouro	19,5%	28,6%	68,1%	DRS	SRPQ	TBP	LMR	JB
Brodowski	20,3%	20,3%	100,0%	-	SRPQ	TBP	SRPQ	PRs
Cajobi	50,2%	52,4%	95,9%	IRS	SRPQ		SRPQ	PRG
Cândido Mota	34,5%	36,9%	93,4%	DRS	SRPQ	TBP	SRPQ	JB
Capivari	22,5%	29,5%	76,1%	DRS	SRPQ	TBP	LMR	JB
Castilho	29,4%	29,4%	99,9%	-	SRPQ	TBP	SRPQ	PRs
Catanduva	26,3%	33,6%	78,1%	DRS	SRPQ	TBP	SRPQ	JB
Cerquillo	37,4%	48,2%	77,5%	DRS	SRPQ	TBP	LMR	JB
Cordeirópolis	53,1%	55,3%	96,0%	DRS	SRPQ	TBP	SRPQ	TBP
Guaiaçara	66,4%	66,7%	99,6%	IRS	SRPQ	TBP	SRPQ	PRs
Guapiacu	25,5%	25,6%	99,7%	IRS	SRPQ	TBP	SRPQ	PRs
Guaratinguetá	17,8%	25,9%	68,8%	DRS	SRPQ	TBP	LMR	JB
Iacanga	20,2%	21,4%	94,8%	IRS	SRPQ		SRPQ	PRG
Ibitinga	22,3%	31,4%	71,1%	DRS	SRPQ	TBP	LMR	JB
Ilha Solteira	21,3%	23,9%	89,1%	DRS	SRPQ	TBP	SRPQ	TBP
Ipeúna	53,0%	53,5%	98,9%	IRS	TBP		TBP	PRs
Itajobi	22,8%	22,9%	99,7%	IRS	SRPQ	TBP	SRPQ	PRs

Tabela 33 – Resultados da DEA (continuação)

DMU	Eficiência técnica CCR (IEHCCR)	Eficiência puramente técnica BCC (IEHBCC)	Retorno de escala	Benchmarks CCR		Benchmarks BCC	
Itapira	24,2%	31,1%	DRS	SRPQ	TBP	LMR	JB
Itu	17,4%	24,1%	DRS	SRPQ	TBP	LMR	JB
Ituverava	33,0%	42,9%	DRS	SRPQ	TBP	LMR	JB
Jaboticabal	15,5%	19,6%	DRS	SRPQ	TBP	SRPQ	JB
Jaguariúna	24,8%	29,5%	DRS	SRPQ	TBP	LMR	JB
José Bonifácio (JB)	87,8%	100,0%	DRS	SRPQ	TBP	JB	
Junqueiropolis	23,1%	24,3%	DRS	SRPQ	TBP	SRPQ	JB
Leme	8,2%	11,0%	DRS	SRPQ	TBP	LMR	JB
Limeira (LMR)	72,4%	100,0%	DRS	SRPQ	TBP	LMR	
Louveira	22,9%	29,6%	DRS	TBP		LMR	JB
Matão	28,2%	38,6%	DRS	SRPQ	TBP	LMR	JB
Moji Mirim	19,2%	25,9%	DRS	SRPQ	TBP	LMR	JB
Morro Agudo	8,4%	8,4%	-	SRPQ	TBP	SRPQ	PRS
Nova Castilho (NC)	90,8%	100,0%	IRS	SRPQ	TBP	NC	
Nova Europa	13,1%	13,6%	IRS	SRPQ		SRPQ	PRG
Nova Odessa	23,3%	30,9%	DRS	SRPQ	TBP	LMR	JB
Orlandia	6,3%	6,6%	DRS	SRPQ	TBP	SRPQ	JB
Ourinhos	15,3%	22,6%	DRS	SRPQ	TBP	LMR	JB
Palestina	42,6%	42,6%	IRS	SRPQ	TBP	SRPQ	TBP
Palmital	17,5%	17,5%	-	SRPQ	TBP	SRPQ	PRS
Panorama	37,8%	37,9%	IRS	SRPQ	TBP	SRPQ	PRS
Parisi (PRS)	97,6%	100,0%	IRS	SRPQ	TBP	PRS	
Pedreira	29,6%	40,8%	DRS	TBP		LMR	JB
Penapolis	35,7%	43,0%	DRS	SRPQ	TBP	SRPQ	JB

Tabela 33 – Resultados da DEA (continuação)

DMU	Eficiência técnica CCR (IEHCCR)	Eficiência puramente técnica BCC (IEHBCC)	Eficiência de escala	Retorno de escala	Benchmarks CCR			Benchmarks BCC		
Pindorama	24,0%	24,0%	99,8%	-	SRPQ	TBP	SRPQ	PRS	TBP	TBP
Piracicaba	12,0%	55,9%	21,4%	DRS	SRPQ	TBP	SRC	LMR		
Pirangi (PRG)	90,8%	100,0%	90,8%	IRS	SRPQ	TBP	PRG			
Pirassununga	21,7%	28,9%	74,9%	DRS	SRPQ	TBP	LMR	JB		
Pompéia	14,6%	14,6%	100,0%	-	SRPQ	TBP	SRPQ	TBP	PRS	PRS
Promissão	55,3%	58,8%	94,1%	DRS	SRPQ	TBP	SRPQ	JB		TBP
Rafard	68,9%	69,3%	99,4%	IRS	TBP		TBP	PRS		
Ribeirão Preto (RP)	10,4%	100,0%	10,4%	DRS	SRPQ	TBP	RP			
Rio Claro	24,4%	33,3%	73,1%	DRS	SRPQ	TBP	SRPQ	LMR		JB
Salto	19,5%	25,9%	75,2%	DRS	SRPQ	TBP	LMR	JB		
Santa Adélia	9,9%	9,9%	99,6%	-	SRPQ	TBP	SRPQ	TBP		PRS
Santa Bárbara D'Oeste	28,9%	39,4%	73,3%	DRS	SRPQ	TBP	LMR	JB		
Santa Branca	8,2%	8,3%	99,5%	-	SRPQ	TBP	SRPQ	PRS		TBP
Santa Fé do Sul	23,8%	26,4%	90,1%	DRS	SRPQ	TBP	SRPQ	JB		TBP
Santa Rita do Passa Quatro (SRPQ)	100,0%	100,0%	100,0%	-	SRPQ		SRPQ			
Santo Antonio de Posse	20,8%	20,8%	100,0%	-	SRPQ	TBP	SRPQ	PRS		TBP
São Carlos	14,1%	20,1%	69,8%	DRS	SRPQ	TBP	LMR	JB		
São Sebastião da Gramma	41,7%	41,8%	99,8%	IRS	SRPQ	TBP	SRPQ	PRS		TBP
Sorocaba (SRC)	16,2%	100,0%	16,2%	DRS	SRPQ	TBP	SRC			
Tabapuã (TBP)	100,0%	100,0%	100,0%	-	TBP		TBP			
Tabatinga	31,0%	31,1%	99,7%	IRS	SRPQ	TBP	SRPQ	PRS		TBP
Taiuva	72,0%	72,7%	99,1%	IRS	TBP		TBP	PRS		
Valinhos	38,9%	56,9%	68,3%	DRS	SRPQ	TBP	LMR	JB		

Tabela 33 – Resultados da DEA (continuação)

DMU	Eficiência técnica CCR (IEHCCR)	Eficiência puramente técnica BCC (IEHBCC)	Eficiência de escala	Retorno de escala	<i>Benchmarks</i> CCR	<i>Benchmarks</i> BCC
MÉDIA (IEH _M)	33,7 %	41,4 %	84,2 %	-	-	-
DESVIO PADRÃO	24,4 %	27,7 %	18,5 %	-	-	-

Nota: Em negrito, sistemas *benchmarks*. DRS = retornos decrescentes de escala; IRS = retornos crescentes de escala.

4.4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS MAIS EFICIENTES (*BENCHMARKS*)

Os dois maiores sistemas avaliados, Ribeirão Preto e Sorocaba, apesar de BCC eficientes, não podem ser utilizados como *benchmarks*. Isso ocorre em função da grande escala de seus *inputs* e *outputs* em relação às outras DMUs, de forma que esses sistemas só foram comparados entre si para o estabelecimento da eficiência puramente técnica, conduzindo ambos à fronteira BCC, ainda que em termos práticos ambos apresentem elevados índices de perdas de água e perdas lineares.

Os casos de “falsa eficiência” de Ribeirão Preto e Sorocaba podem ser identificados a partir da proposta de Charnes et al. (1985) definida por De Witte e Marques (2010) como “*peer count index*”, que consiste na quantidade de vezes que uma DMU foi utilizada como *benchmark* para DMUs ineficientes. O “*peer count index*” é considerado um método básico para ranqueamento na DEA, segundo Adler et al. (2002). No caso estudado, Ribeirão Preto e Sorocaba são *benchmarks* somente para si próprias, e no caso de Sorocaba, para Piracicaba (sistema com baixa eficiência), não servindo de referência para as demais DMUs. A Figura 79 ilustra os casos de falsa eficiência BCC dos sistemas de Ribeirão Preto (RP) e Sorocaba (SCB). A Tabela 34 apresenta as características dos sistemas considerados efetivamente *benchmarks*.

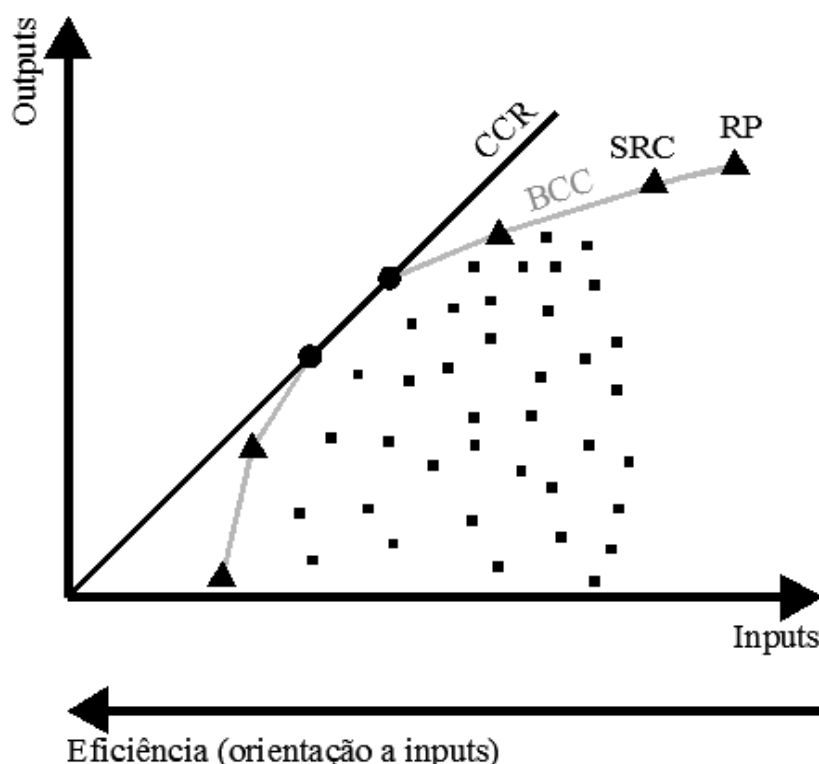


Figura 79 – Ilustração do caso de falsa eficiência BCC dos sistemas de Sorocaba (SRC) e Ribeirão Preto (RP)

Tabela 34 – Caracterização dos sistemas *benchmarks*

DMU	Eficiência técnica CCR (IEHCCR)	Eficiência puramente técnica BCC (IEHBCC)	Eficiência de escala	Retorno de escala	Natureza jurídica	População total atendida [habitantes]	Índice de perdas de água (IPA)	Índice de perdas lineares (IPL) $[10^3 \frac{m^3}{km \cdot ano}]$	Tipo de manancial*	Situação até 2015*
José Bonifácio	87,8%	100,0%	87,8%	DRS	Administração pública direta	29.684	15%	2,76	Subterrâneo (100%)	Satisfatória
Limeira	72,4%	100,0%	72,4%	DRS	Empresa privada	267.785	16,2%	3,45	Superficial ($\cong 100\%$) Subterrâneo ($< 1\%$)	Satisfatória
Nova Castilho	90,8%	100,0%	90,8%	IRS	Administração pública direta	746	14,9%	2,65	Subterrâneo (100%)	Satisfatória
Parisi	97,6%	100,0%	97,6%	IRS	Administração pública direta	1.643	13,7%	2,48	Subterrâneo (100%)	Satisfatória
Pirangi	90,8%	100,0%	90,8%	IRS	Administração pública direta	9.528	9,2%	3,26	Subterrâneo (100%)	Satisfatória
Santa Rita do Passa Quatro	100,0%	100,0%	100,0%	-	Administração pública direta	23.806	8,0%	3,06	Superficial (100%)	Requer novo manancial
Tabapuã	100,0%	100,0%	100,0%	-	Administração pública direta	10.559	18,0%	2,25	Subterrâneo (100%)	Satisfatória
Média dos Benchmarks	91,3%	-	91,3%	-	-	49.107,29	13,6%	2,84	-	-
Desvio padrão dos benchmarks	9,7%	-	9,7%	-	-	97.023,64	3,7%	0,43	-	-
Média das 71 DMUs	33,7%	41,4%	84,2%	-	-	69.005,35	37,8%	11,94	-	-
Desvio padrão das 71 DMUs	24,4%	27,7%	18,5%	-	-	110.585,07	14,1%	8,99	-	-

* Segundo Atlas Brasil: abastecimento urbano de água: panorama nacional (BRASIL, 2010a)

Os sistemas de Santa Rita do Passa Quatro e Tabapuã são considerados *benchmarks* globais (IEHCCR = 100%), ou seja, apresentam proporcionalmente pequenos volumes de perdas de água (*input*) em relação aos volumes disponibilizados e à extensão da rede, além de operarem na escala mais conveniente. Santa Rita do Passa Quatro apresenta o menor índice bruto de perdas (IPA = 8,0%) entre todos os *benchmarks*, ao passo que Tabapuã, apesar de apresentar o pior índice bruto de perdas de água entre os *benchmarks* (IPA = 18,0%), possui o melhor índice de perdas lineares ($IPL = 2,25 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$), indicando que sua rede é proporcionalmente a mais eficiente hidráulicamente. Esse caso demonstra como a utilização do IEH em substituição aos índices clássicos (IPA e IPL) permite considerar as diferenças e externalidades do sistema para a definição de índices mais realistas.

Em relação à natureza jurídica dos sistemas avaliados, 33 dos sistemas (46%) são de administração pública direta, 5 são empresas privadas (7%), 31 são autarquias (44%) e 2 são sociedades de economia mista com administração pública (3%). Os dois sistemas CCR eficientes (Santa Rita do Passa Quatro e Tabapuã) são de administração pública direta. Dos sete sistemas BCC eficientes, seis são administração pública direta e apenas um privado (Limeira). Os resultados do modelo DEA desenvolvido neste trabalho, que não considerou *inputs* ou *outputs* financeiros, demonstram que no caso das perdas de água, empresas públicas podem utilizar água de forma racional e eficiente, tendo em vista que 86% dos sistemas definidos como *benchmark* (Tabela 34) são dessa natureza. A análise também revela que 71% dos sistemas *benchmark* captam água em mananciais subterrâneos e 29% utilizam mananciais predominantemente superficiais.

As projeções para o ano de 2015 (BRASIL, 2010a) demonstraram que apenas o sistema de Santa Rita do Passa Quatro necessitará de um novo manancial. Esta projeção, associada ao fato do sistema ser CCR eficiente, indica que o sistema realmente opera no momento em seu limite técnico, não sendo possível alterar seu nível de atendimento com os mesmos níveis de recurso atualmente utilizados.

O índice de perdas de água médio dos sistemas *benchmarks* é de 13,6%, sendo o menor índice bruto de perdas referente ao município de Santa Rita do Passa Quatro, com 8%. O índice de perdas lineares médio é de $2,84 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$, sendo o menor valor do município de Tabapuã ($2,25 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$).

Assumindo-se que a população atendida é uma variável representativa da dimensão dos sistemas, verifica-se que o uso racional da água em SAAs (representado pelo IEHBCC) independe da dimensão do sistema. Os casos mais emblemáticos dessa constatação são os sistemas de Limeira (atendendo aproximadamente 268 mil habitantes) e Nova Castilho

(atendimento a aproximadamente 750 habitantes), ambos eficientes em termos puramente técnicos.

4.4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS MENOS EFICIENTES

Foram considerados menos eficientes aqueles sistemas cujo IEHCCR foi inferior à média das 71 DMUs (IEHCCR < 33,7%). A Tabela 35 apresenta as características desses sistemas. As eficiências hídras médias dos sistemas menos eficientes revelaram IEHCCR de 19,9%, IEHBCC de 28,3% e eficiência de escala de 80,8%. Tais valores indicam que a baixa eficiência desses sistemas é, majoritariamente, de natureza puramente técnica, sendo o dimensionamento inadequado uma causa secundária da ineficiência.

Dos sistemas menos eficientes, 40% utilizam mananciais exclusivamente subterrâneos, 26% exclusivamente superficiais e os demais utilizam ambos os tipos em diferentes proporções; 15% dos piores sistemas avaliados demandam novos mananciais até o ano de 2015, enquanto 2% requerem ampliação do sistema até o mesmo ano. Tendo em vista o elevado índice de desperdício de água nesses sistemas, presume-se que o gerenciamento e a implantação de ações para redução das perdas de água poderiam postergar a exploração de novos mananciais ou a ampliação dos sistemas existentes.

Em relação à natureza jurídica dos sistemas menos eficientes, 50% deles são autarquias, 41,7% são de administração pública direta, 4,2% são empresas privadas e 4,2% se constituem em sociedades de economia mista com administração pública. Esses resultados sugerem, juntamente à análise dos sistemas *benchmark*, que a natureza jurídica dos sistemas não é por si só um fator determinante da eficiência hídrica, tendo em vista que sistemas privados são a minoria (7%) do conjunto total de 71 DMUs e que sistemas relacionados ao poder público (autarquias e administração pública direta) são a maioria tanto no conjunto de melhores eficiências (*benchmarks*) quanto nos de pior eficiência.

Os resultados presentes na Tabela 35 revelaram, ainda, que 66,7% dos sistemas menos eficientes apresentaram retornos de escala decrescentes (DRS), 12,5% crescentes (IRS) e 20,8% operam em um escala conveniente. Orlândia possui o sistema de menor eficiência hídrica puramente técnica (IEHBCC de 6,6%), perdendo elevados volumes da água captada. O IPA do sistema é de 64,5%, enquanto seu IPL é de $42,77.10^3 \text{ m}^3.\text{km}^{-1}.\text{ano}^{-1}$.

Tabela 35 – Caracterização das DMUS mais ineficientes

DMU	Eficiência técnica CCR (IEHCCR)	Eficiência puramente técnica BCC (IEHBCC)	Eficiência de escala	Retorno de escala	Natureza jurídica	População total atendida [habitantes]	Índice de perdas de água (IPA)	Índice de perdas lineares (IPL) $[10^{-3} \frac{m^3}{km \cdot ano}]$	Tipo de manancial*	Situação até 2015*
Altinópolis	30,1%	34,4%	87,5%	DRS	Administração pública direta	13.636	48,7%	7,46	Subterrâneo (68%) Superficial (32%)	Satisfatória
Américo Brasileiro	20,6%	20,6%	100,0%	-	Administração pública direta	34.217	35,8%	13,00	Subterrâneo (100%)	Satisfatória
Andradina	14,3%	18,3%	78,1%	DRS	Empresa privada	51.649	55,3%	16,38	Subterrâneo (100%)	Satisfatória
Ariranha	17,5%	17,6%	99,3%	IRS	Administração pública direta	8.094	36,9%	16,10	Subterrâneo (100%)	Satisfatória
Atibaia	14,3%	19,0%	75,2%	DRS	Autarquia	106.780	52,5%	16,86	Superficial ($\equiv$ 100%) Subterrâneo (< 1%)	Satisfatória
Bebedouro	19,5%	28,6%	68,1%	DRS	Autarquia	75.030	52,7%	11,54	Superficial (74%) Subterrâneo (261%)	Satisfatória
Brodowski	20,3%	20,3%	100,0%	-	Autarquia	20.617	40,0%	12,40	Subterrâneo (100%)	Requer ampliação
Capivari	22,5%	29,5%	76,1%	DRS	Autarquia	46.134	48,0%	10,10	Subterrâneo (60%) Superficial (40%)	Requer novo manancial
Castilho	29,4%	29,4%	99,9%	-	Administração pública direta	13.586	34,9%	8,20	Subterrâneo (100%)	Satisfatório
Catanduva	26,3%	33,6%	78,1%	DRS	Autarquia	112.056	31,7%	9,97	Subterrâneo (100%)	Satisfatório
Guapiaçu	25,5%	25,6%	99,7%	IRS	Administração pública direta	15.805	30,8%	10,52	Subterrâneo (100%)	Satisfatório
Guaratinguetá	17,8%	25,9%	68,8%	DRS	Sociedade de economia mista com administração pública	112.072	52,3%	12,89	Superficial (100%)	Satisfatório

Tabela 35 – Caracterização das DMUS mais ineficientes (continuação)

DMU	Eficiência técnica CCR (IEHCCR)	Eficiência puramente técnica BCC (IEHBCC)	Eficiência de escala	Retorno de escala	Natureza jurídica	População total atendida [habitantes]	Índice de perdas de água (IPA)	Índice de perdas lineares (IPL) $[10^{-3} \frac{m^3}{km \cdot ano}]$	Tipo de manancial*	Situação até 2015*
Iacanga	20,2%	21,4%	94,8%	IRS	Administração pública direta	10.013	30,1%	16,47	Subterrâneo (100%)	Satisfatório
Ibitinga	22,3%	31,4%	71,1%	DRS	Autarquia	51.057	49,6%	10,09	Subterrâneo (90%) Superficial (10%)	Satisfatório
Ilha Solteira	21,3%	23,9%	89,1%	DRS	Administração pública direta	25.064	41,6%	11,46	Subterrâneo (100%)	Satisfatório
Itajobi	22,8%	22,9%	99,7%	IRS	Administração pública direta	12.142	34,0%	11,60	Subterrâneo (100%)	Satisfatório
Itapira	24,2%	31,1%	77,9%	DRS	Autarquia	68.365	39,0%	10,01	Superficial (100%)	Satisfatório
Itu	17,4%	24,1%	72,1%	DRS	Empresa privada	144.269	47,1%	13,97	Superficial (91%) Subterrâneo (9%)	Requer novo manancial
Ituverava	33,0%	42,9%	76,9%	DRS	Autarquia	36.430	36,4%	7,02	Superficial (100%)	Satisfatório
Jaboticabal	15,5%	19,6%	79,4%	DRS	Autarquia	69.527	48,4%	15,87	NA	NA
Jaguariúna	24,8%	29,5%	83,8%	DRS	Administração pública direta	43.880	38,5%	9,78	Superficial (97%) Subterrâneo (3%)	Satisfatório
Junqueirópolis	23,1%	24,3%	95,0%	DRS	Administração pública direta	15.399	43,0%	10,18	Subterrâneo (100%)	Satisfatório
Leme	8,2%	11,0%	74,8%	DRS	Autarquia	89.862	66,1%	29,32	Superficial (98%) Subterrâneo (2%)	Satisfatório
Louveira	22,9%	29,6%	77,4%	DRS	Administração pública direta	34.318	49,2%	9,82	Superficial (100%)	Requer novo manancial
Matão	28,2%	38,6%	73,1%	DRS	Autarquia	76.786	38,2%	8,34	Subterrâneo (100%)	Requer novo manancial
Moji Mirim	19,2%	25,9%	74,3%	DRS	Autarquia	86.505	45,5%	12,48	Superficial (100%)	Satisfatório

Tabela 35 – Caracterização das DMUS mais ineficientes (continuação)

DMU	Eficiência técnica CCR (IEHCCR)	Eficiência puramente técnica BCC (IEHBCC)	Eficiência de escala	Retorno de escala	Natureza jurídica	População total atendida [habitantes]	Índice de perdas de água (IPA)	Índice de perdas lineares (IPL) $[10^{-3} \frac{m^3}{km \cdot ano}]$	Tipo de manancial*	Situação até 2015*
Morro Agudo	8,4%	8,4%	100,0%	-	Administração pública direta	27.907	60,4%	30,76	Subterrâneo ($\cong$ 100%) Superficial ($<$ 1%)	Satisfatória
Nova Europa	13,1%	13,6%	95,8%	IRS	Administração pública direta	8.625	40,0%	50,40	Subterrâneo (100%)	Satisfatório
Nova Odessa	23,3%	30,9%	75,3%	DRS	Sociedade de economia mista com administração pública	50.681	45,8%	9,85	Superficial (100%)	Requer novo manancial
Orlândia	6,3%	6,6%	95,4%	DRS	Administração pública direta	38.756	64,5%	42,77	Subterrâneo (59%) Superficial (41%)	Satisfatória
Ourinhos	15,3%	22,6%	67,9%	DRS	Autarquia	100.374	57,2%	14,85	Superficial (88%) Subterrâneo (12%)	Satisfatório
Palmital	17,5%	17,5%	100,0%	-	Autarquia	19.427	46,9%	13,87	Subterrâneo (100%)	Satisfatório
Pedreira	29,6%	40,8%	72,5%	DRS	Administração pública direta	41.209	47,0%	7,60	Superficial (100%)	Satisfatório
Pindorama	24,0%	24,0%	99,8%	-	Administração pública direta	14.235	38,7%	10,17	Subterrâneo (100%)	Satisfatório
Piracicaba	12,0%	55,9%	21,4%	DRS	Autarquia	364.571	52,5%	21,18	Superficial ($\cong$ 100%) Subterrâneo ($<$ 1%)	Satisfatória
Pirassununga	21,7%	28,9%	74,9%	DRS	Autarquia	64.216	43,5%	10,97	Superficial (100%)	Satisfatório
Pompéia	14,6%	14,6%	100,0%	-	Autarquia	18.574	57,7%	15,71	Subterrâneo (100%)	Satisfatório
Ribeirão Preto	10,4%	100,0%	10,4%	DRS	Autarquia	603.401	45,4%	29,31	Subterrâneo (100%)	Requer novo manancial
Rio Claro	24,4%	33,3%	73,1%	DRS	Autarquia	186.210	36,0%	10,29	Superficial (100%)	Satisfatório

Tabela 35 – Caracterização das DMUS mais ineficientes (continuação)

DMU	Eficiência técnica CCR (IEHCCR)	Eficiência puramente técnica BCC (IEHBCC)	Eficiência de escala	Retorno de escala	Natureza jurídica	População total atendida [habitantes]	Índice de perdas de água (IPA)	Índice de perdas lineares (IPL) $[10^{-3} \frac{m^3}{km \cdot ano}]$	Tipo de manancial*	Situação até 2015*
Salto	19,5%	25,9%	75,2%	DRS	Autarquia	103.406	43,6%	12,51	Superficial (100%)	Requer novo manancial
Santa Adélia	9,9%	9,9%	99,6%	-	Administração pública direta	13.560	55,7%	26,31	Subterrâneo (100%)	Satisfatório
Santa Bárbara D'Oeste	28,9%	39,4%	73,3%	DRS	Autarquia	178.596	33,1%	8,57	Superficial (100%)	Satisfatório
Santa Branca	8,2%	8,3%	99,5%	-	Administração pública direta	12.140	66,8%	28,93	Superficial (100%)	Satisfatório
Santa Fé do Sul	23,8%	26,4%	90,1%	DRS	Autarquia	29.239	41,0%	10,02	Superficial (95%) Subterrâneo (5%)	Satisfatória
Santo Antonio de Posse	20,8%	20,8%	100,0%	-	Administração pública direta	18.834	41,7%	11,77	Superficial (94%) Subterrâneo (6%)	Satisfatória
São Carlos	14,1%	20,1%	69,8%	DRS	Autarquia	213.061	53,4%	17,06	Subterrâneo (68%) Superficial (32%)	Satisfatória
Sorocaba	16,2%	100,0%	16,2%	DRS	Autarquia	580.498	41,7%	16,42	Superficial (97%) Subterrâneo (3%)	Satisfatória
Tabatinga	31,0%	31,1%	99,7%	IRS	Administração pública direta	12.431	27,9%	8,48	Subterrâneo (100%)	Satisfatório
MÉDIA	19,9%	28,3%	80,8%			84.859,25	45,1%	15,20		
DESVIO PADRÃO	6,6%	17,9%	20,6%			125.781,09	9,5%	8,98		

* Segundo Atlas Brasil: abastecimento urbano de água: panorama nacional (BRASIL, 2010a); NA = dados não disponíveis

4.4.3 DEFINIÇÃO DE METAS DE REDUÇÃO DE ÍNDICES DE PERDAS DE ÁGUA

As metas de redução de perdas de água definidas durante a DEA são apresentadas na Tabela 36. A partir dos resultados apresentados, verifica-se que, em média, os sistemas de abastecimento de água de abrangência local do Estado de São Paulo devem reduzir em 20,8% os índices de perda de água atuais para compatibilizar seu nível tecnológico com o de sistemas semelhantes. Na análise de longo prazo, a partir do ajuste conjunto do nível tecnológico e da escala de produção, essa redução deve ser, em média, de 24,1%, conduzindo os sistemas a índices médios de perda de água de 13,7%, contra os 37,8% verificados atualmente.

Tabela 36 – Metas de redução de perdas de água

DMU	IPA atual	ALVOS CCR Médio e longo prazo		ALVOS BCC Curto prazo	
		IPACCR	ΔIPA	IPABCC	ΔIPA
Altinópolis	48,7%	22,3%	26,5%	24,7%	24,1%
Américo Brasiliense	35,8%	10,3%	25,5%	10,3%	25,5%
Andradina	55,3%	15,1%	40,3%	18,5%	36,8%
Araçoiaba da Serra	45,2%	24,5%	20,7%	29,4%	15,8%
Ariranha	36,9%	9,3%	27,6%	9,3%	27,6%
Atibaia	52,5%	13,6%	38,8%	17,4%	35,1%
Barretos	17,2%	12,6%	4,6%	16,2%	1,0%
Bebedouro	52,7%	17,9%	34,8%	24,2%	28,5%
Brodowski	40,0%	11,9%	28,1%	11,9%	28,1%
Cajobi	14,8%	8,0%	6,8%	8,3%	6,4%
Cândido Mota	30,9%	13,4%	17,6%	14,2%	16,7%
Capivari	48,0%	17,2%	30,8%	21,4%	26,6%
Castilho	34,9%	13,6%	21,3%	13,7%	21,3%
Catanduva	31,7%	10,8%	20,8%	13,5%	18,2%
Cerquillo	34,9%	16,7%	18,2%	20,5%	14,3%
Cordeiropolis	25,2%	15,2%	10,0%	15,7%	9,5%
Guaiçara	19,9%	14,2%	5,7%	14,2%	5,7%
Guapiacu	30,8%	10,2%	20,6%	10,2%	20,6%
Guaratinguetá	52,3%	16,4%	36,0%	22,1%	30,2%
Iacanga	30,1%	8,0%	22,1%	8,4%	21,7%
Ibitinga	49,6%	18,0%	31,6%	23,6%	26,0%
Ilha Solteira	41,6%	13,2%	28,4%	14,5%	27,0%
Ipeúna	30,0%	18,5%	11,5%	18,6%	11,4%
Itajobi	34,0%	10,5%	23,5%	10,6%	23,5%
Itapira	39,0%	13,4%	25,6%	16,6%	22,4%

Tabela 36 – Metas de redução de perdas de água (continuação)

DMU	IPA atual	ALVOS CCR Médio e longo prazo		ALVOS BCC Curto prazo	
		IPACCR	ΔIPA	IPABCC	ΔIPA
Itu	47,1%	13,4%	33,7%	17,7%	29,4%
Ituverava	36,4%	15,9%	20,5%	19,7%	16,7%
Jaboticabal	48,4%	12,7%	35,7%	15,5%	32,9%
Jaguariúna	38,5%	13,4%	25,1%	15,6%	22,9%
Jose Bonifácio	15,0%	13,5%	1,6%	15,0%	0,0%
Junqueiropolis	43,0%	14,9%	28,2%	15,5%	27,5%
Leme	66,1%	13,8%	52,3%	17,6%	48,5%
Limeira	16,2%	12,3%	3,9%	16,2%	0,0%
Louveira	49,2%	18,2%	31,1%	22,3%	27,0%
Matão	38,2%	14,9%	23,3%	19,3%	18,9%
Moji Mirim	45,5%	13,8%	31,7%	17,8%	27,7%
Morro Agudo	60,4%	11,3%	49,1%	11,3%	49,1%
Nova Castilho	14,9%	13,8%	1,1%	14,9%	0,0%
Nova Europa	40,0%	8,0%	32,0%	8,3%	31,7%
Nova Odessa	45,8%	16,5%	29,4%	20,7%	25,1%
Orlândia	64,5%	10,2%	54,3%	10,7%	53,8%
Ourinhos	57,2%	17,0%	40,2%	23,2%	34,0%
Palestina	30,8%	15,9%	14,9%	15,9%	14,8%
Palmital	46,9%	13,4%	33,5%	13,4%	33,5%
Panorama	20,0%	8,6%	11,4%	8,6%	11,4%
Parisi	13,7%	13,5%	0,2%	13,7%	0,0%
Pedreira	47,0%	20,8%	26,2%	26,6%	20,4%
Penapolis	27,1%	11,7%	15,3%	13,8%	13,3%
Pindorama	38,7%	13,1%	25,5%	13,2%	25,5%
Piracicaba	52,5%	11,7%	40,8%	38,2%	14,3%
Pirangi	9,2%	8,4%	0,8%	9,2%	0,0%
Pirassununga	43,5%	14,3%	29,2%	18,3%	25,3%
Pompéia	57,7%	16,6%	41,1%	16,6%	41,1%
Promissão	19,5%	11,8%	7,7%	12,4%	7,0%
Rafard	26,5%	19,9%	6,6%	20,0%	6,5%
Ribeirão Preto	45,4%	8,0%	37,4%	45,4%	0,0%
Rio Claro	36,0%	12,1%	23,9%	15,8%	20,2%
Salto	43,6%	13,1%	30,5%	16,7%	26,9%
Santa Adélia	55,7%	11,0%	44,7%	11,1%	44,6%
Santa Bárbara D'Oeste	33,1%	12,5%	20,6%	16,3%	16,8%
Santa Branca	66,8%	14,2%	52,6%	14,3%	52,5%
Santa Fé do Sul	41,0%	14,2%	26,8%	15,5%	25,5%
Santa Rita do Passa Quatro	8,0%	8,0%	0,0%	8,0%	0,0%
Santo Antonio de Posse	41,7%	13,0%	28,7%	13,0%	28,7%
São Carlos	53,4%	13,9%	39,5%	18,8%	34,7%

Tabela 36 – Metas de redução de perdas de água (continuação)

DMU	IPA atual	ALVOS CCR Médio e longo prazo		ALVOS BCC Curto prazo	
		IPACCR	Δ IPA	IPABCC	Δ IPA
São Sebastião da Grama	21,7%	10,4%	11,4%	10,4%	11,3%
Sorocaba	41,7%	10,4%	31,3%	41,7%	0,0%
Tabapuã	18,0%	18,0%	0,0%	18,0%	0,0%
Tabatinga	27,9%	10,7%	17,2%	10,7%	17,2%
Taiuva	27,7%	21,6%	6,1%	21,8%	5,9%
Valinhos	33,7%	16,5%	17,2%	22,5%	11,3%
MÉDIA	37,8%	13,7%	24,1%	17,0%	20,8%

Os sistemas de abastecimento de água de abrangência local do Estado de São Paulo apresentam, em média, baixas eficiências no que se refere às perdas de água. Apesar dos índices de perda tradicionais serem conhecidos e disponíveis, sua aplicação se limita ao acompanhamento da evolução de um SAA isoladamente, e quando comparados com índices de outros sistemas, não permitem definir metas de redução realistas devido às heterogeneidades entre sistemas.

Como a DEA é uma técnica não paramétrica de determinação de eficiências empíricas (baseada na comparação de insumos e produtos observados), as metas de redução de perdas de água calculadas por essa técnica, conforme o modelo proposto nesse trabalho, são mais realistas do que a simples comparação entre IPAs.

No modelo proposto, considera-se, além dos volumes de entrada e saída do sistema, o comprimento das redes de distribuição como *output* no cálculo da eficiência hídrica. Muitos outros fatores poderiam ser considerados de forma a melhor caracterizar a heterogeneidade dos sistemas, porém, a indisponibilidade de tais informações se mostrou um obstáculo à sua utilização.

4.5 INTEGRAÇÃO E COMPLEMENTARIEDADE ENTRE OS INDICADORES PROPOSTOS

A proposta desta pesquisa contemplou a divisão de SAAs em unidades de análise, o que possibilitou a modelagem de indicadores que representam interações hidráulicas e energéticas específicas e relevantes dos vários componentes de um SAA. Apesar de compacto, o conjunto de quatro indicadores proposto possibilita avaliar a eficiência hidráulica e energética de SAAs de forma bastante abrangente, considerando possibilidades de melhoria em três dimensões:

física, operacional e de projeto. Tendo como referências os fluxos hidráulicos e energéticos globais (Figura 23) e específicos de cada UA (apêndice A), pode-se identificar todas as instâncias da eficiência de um SAA passíveis de análise através dos indicadores apresentados na Tabela 37.

Tabela 37 – Possibilidades de análise de eficiência hidráulica e energética utilizando os indicadores propostos

Indicador	Unidade de análise	Descrição
Indicador de operação otimizada de bombeamento	Todas UAs que possuam conjuntos moto-bomba (captações, ETAs, <i>boosters</i>)	Este indicador possibilita determinar o fluxo energético (eletricidade) ótimo de todas UAs que possuam bombeamento.
Indicador de carga hidráulica disponibilizada	UAs que possuam conjuntos moto-bomba e adutoras	O indicador pode ser utilizado para determinar a altura de elevação ótima de uma estação de bombeamento, permitindo a seleção do conjunto moto-bomba mais eficiente energeticamente. A determinação desta altura ótima pode envolver 1) definição dos níveis de sucção e recalque ótimos, 2) diâmetros ótimos de tubulações, 3) rugosidade ótima de tubulações, dentre outros.
	UAs de reservação e armazenamento de água	O indicador pode ser utilizado para definição de níveis ótimos de reservatórios
	Redes de distribuição	O indicador pode definir os níveis ótimos de pressão na rede, fundamentais para o gerenciamento e combate a perdas de água por vazamento.
Indicador de recuperação de energia hidráulica	ETAs e outras UAs que recebam água por gravidade	O indicador possibilita gerenciar as cargas hidráulicas naturalmente afluentes no SAA ou em determinadas UAs, que normalmente são desconsideradas em termos energéticos.
Indicadores de perdas de água	SAA como um todo	Este indicador determina o fluxo mássico (água) afluente ao SAA e que é efetivamente utilizado, permitindo o estabelecimento de uma meta global de redução do uso da água associado, por exemplo, a outras medidas (como o gerenciamento de pressões, avaliado diretamente ao indicador de carga hidráulica disponibilizada).

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho desenvolveu um conjunto de indicadores de eficiência hidráulica e energética para sistemas de abastecimento de água. A promoção da eficiência, conservação e uso racional destes recursos, sobretudo num setor estratégico como o de abastecimento de água, tem papel fundamental para o desenvolvimento sustentável das cidades.

Verificou-se na literatura que a medição de eficiência e desempenho em sistemas de abastecimento de água é, em geral, realizada de forma relativa (comparativa), sem considerar a eficiência de cada sistema de forma absoluta, como unidade independente e passível de melhorias. Além disso, foram identificadas poucas metodologias e indicadores que abordam, de forma consistente, a eficiência em termos hidráulicos e energéticos, voltadas para a quantificação da eficiência absoluta dos sistemas; por outro lado, inúmeros trabalhos e métodos para análise de desempenho relativo, muitas vezes associados ao processo de *benchmarking*, são relatados na literatura. Na sua maioria, estes trabalhos abordam a eficiência e desempenho de SAAs do ponto de vista corporativo, envolvendo variáveis físicas (insumos, produtos, mão-de-obra) e econômicas (despesas, lucro, dentre outras).

As características do setor de abastecimento de água e dos serviços de saneamento ambiental, na sua maioria inseridos num contexto não competitivo, desestimulam a implantação de sistemas de medição de desempenho, bem como a implantação de medidas voltadas ao aumento da eficiência. Ao contrário da energia elétrica, que representa parcela significativa dos custos totais de exploração e disponibilização de água tratada, a água bruta (principal insumo dos sistemas de abastecimento) ainda é considerada um bem gratuito e abundante. No Brasil, por exemplo, a cobrança pelo uso dos recursos hídricos é uma ferramenta de gestão implantada em poucas bacias hidrográficas, muitas vezes em caráter experimental. A cultura gerencial do setor de abastecimento de água é paradoxal à questão da eficiência. Enquanto o setor corporativo e empresarial se vale cada vez mais de técnicas e ferramentas para um melhor entendimento/gerenciamento da eficiência, o setor de abastecimento de água ainda enfrenta problemas estruturais básicos, como grandes perdas de água devido a vazamentos.

Diante do cenário exposto e da necessidade identificada de se desenvolverem ferramentas para a medição de eficiência hidráulica e energética absoluta em sistemas de abastecimento de água, foram propostos quatro indicadores: indicador de operação otimizada de bombeamento, indicador de recuperação de energia hidráulica, indicador de carga

hidráulica disponibilizada e indicador de eficiência hídrica.

Os indicadores desenvolvidos permitem analisar as diversas interações entre os fluxos de massa (água) e energia (elétrica e hidráulica) entre as diversas unidades de análise de um SAA, sintetizando complexos processos de conversão em valores percentuais, de simples interpretação. Tais indicadores quantificam a diferença entre o nível de utilização atual de água e energia elétrica e hidráulica e o seu nível eficiente, assumindo a manutenção dos mesmos níveis de serviço.

A modelagem do indicador de operação otimizada de bombeamento envolve informações sobre o comportamento hidráulico das bombas e de seu respectivo sistema de recalque (tubulações, reservatórios, dentre outros), sobre o rendimento do motor e sobre a variabilidade temporal da demanda de água. Após a modelagem do problema, técnicas de otimização são utilizadas para calcular o valor-alvo do indicador, correspondente às menores demandas e consumos associados de energia elétrica. No caso estudado, verificou-se que o sistema da COPASA opera de forma eficiente, considerando a operação atual da estação elevatória. Esta operação, porém, não é eficiente, tendo em vista que as bombas operam em modo “liga-desliga”, em dois pontos fixos, e o reservatório de reserva primária não é operado segundo a relação ótima entre bombeamento, armazenamento e consumo. Este fato permite concluir que o indicador de operação otimizada de bombeamento é fortemente influenciado pelo perfil de demanda – e respectivo perfil temporal de bombeamento da estação. O uso de bombas com rotação variável tendo em vista a eficiência energética é especialmente eficiente em situações com grande variação da vazão bombeada. Com isso, espera-se que a operação otimizada do bombeamento resulte em significativa economias de energia quando associada ao perfil ótimo de bombeamento, obtido através da análise conjunta da demanda horária de água dos consumidores e da possibilidade de seu gerenciamento por meio do volume útil de reservatórios.

O indicador de recuperação de energia hidráulica demonstrou que a COPASA/Itajubá possui um elevado potencial para autoprodução de energia hidrelétrica, inclusive com um potencial excedente de aproximadamente 170% em relação ao consumo de sua ETA. Em termos gerais, espera-se que este potencial de recuperação de energia, quantificado pelo indicador, seja bastante variável, não sendo possível estabelecer um valor de referência generalizado. Ainda assim, conclui-se que esta é uma alternativa de conservação de energia que merece maior atenção por parte dos gestores e projetistas de sistemas de abastecimento de água.

O indicador de carga hidráulica disponibilizada é o mais versátil e de modelagem mais

complexa dentre os propostos, podendo ser aplicado em diversos tipos de análise e unidades de um SAA. Dessa forma, a modelagem do indicador exige esforços sinérgicos entre os corpos técnico e gerencial de SAAs, de forma que o indicador representa adequadamente a componente da eficiência hidráulica e energética do sistema considerada, e embase corretamente a tomada de decisões. No primeiro caso de aplicação do indicador, a correta representação das cargas hidráulicas disponibilizadas à rede exigiu a aplicação do indicador em dois períodos distintos: o de maior demanda e menores pressões, e o de menor demanda e maiores pressões. Além disso, as restrições dos níveis de pressão máximo e mínimo durante o cálculo dos valores alvo de cargas hidráulicas disponibilizadas foram determinadas através da definição de nós críticos de pressão (o nó de mínima pressão durante o período de maior demanda, e o nó de máxima pressão durante o período de mínima demanda). O indicador demonstrou um déficit de carga hidráulica da ordem de 22% durante o período de máxima demanda, o que compromete a eficiência hidráulica e a qualidade do serviço fornecido aos consumidores. Por outro lado, um excesso de 115% foi mensurado pelo indicador durante o período de mínima demanda, sendo este excesso associado a desperdícios de energia (na forma de bombeamento excessivo e com alturas de elevação acima das necessárias) e água (uma vez que as vazões de vazamento na rede são mais que proporcionais à pressão).

No segundo caso de aplicação do indicador de carga hidráulica disponibilizada, verificou-se que o envelhecimento da tubulação de recalque da estação de elevatória de água bruta da COPASA/Itajubá resultou em um aumento da ordem de 18% na altura de elevação exigida para o bombeamento, em relação à tubulação com rugosidade compatível com a de uma tubulação nova.

Ressalta-se novamente que os dois casos utilizados para avaliação do indicador de carga hidráulica disponibilizada não são exaustivos, e que o indicador pode ser utilizado em outros tipos de análise, mencionadas na Tabela 37.

O indicador de eficiência hídrica representa uma contribuição para o estabelecimento de indicadores e índices de perdas de água mais consistentes, principalmente no que se refere à comparação entre diferentes sistemas e o estabelecimento de metas de redução de perdas realistas. A consideração da extensão da rede na modelagem do indicador buscou agregar a influência das características hidráulicas, físicas e geográficas dos sistemas sobre os volumes de água perdidos (sobretudo por meio de vazamentos na rede). Ressalta-se, também, que esta abordagem não é exaustiva, e a consideração da variável extensão da rede ocorreu devido à sua disponibilidade em diversas bases de dados sobre sistemas de abastecimento de água, como é o caso da base SNIS utilizada. Outras variáveis, como pressões médias nas redes,

poderiam ser utilizadas para o aperfeiçoamento do indicador de eficiência hídrica, porém, a relativa dificuldade de coleta e a indisponibilidade em bases de dados comprometem seu uso. No estudo de caso conduzido no Estado de São Paulo, constatou-se baixas eficiências hídricas, da ordem de 34% em termos globais e 42% em termos puramente técnicos. Estes resultados reforçam a urgência de se promover o combate às perdas de água em sistemas de abastecimento. Este estudo de caso demonstrou, ainda, que os SAAs do Estado de SP avaliados devem reduzir seus índices de perdas de água atuais médios, de aproximadamente 38%, para cerca de 14%, de forma a se equipararem os níveis tecnológicos de produção e eficiência destes sistemas. A análise envoltória de dados se mostrou uma técnica adequada para o estabelecimento de metas de redução de perdas de água realistas, tendo em vista que é baseada em dados empíricos, e a eficiência calculada a partir da técnica é obtida pela comparação entre sistemas semelhantes (sobretudo no modelo BCC).

Considerando a pirâmide de informação apresentado na Figura 16, os indicadores desenvolvidos são direcionados para gestores dos sistemas, e cumprem, nesse sentido, um papel de comunicação importante. Não é raro que os gestores de mais alto nível hierárquico de SAAs (diretores, presidentes, superintendentes), responsáveis pela tomada de decisões e direcionamento dos recursos financeiros dos sistemas, não tenham formação técnica, ao contrário dos gestores técnicos dos sistemas (normalmente subordinados aos gestores de alto nível hierárquico). A complexidade hidráulica e energética envolvida na otimização desses sistema e no cálculo dos indicadores propostos normalmente é acessível e entendida somente pelos gestores técnicos.

Ao condensar essa complexidade em indicadores percentuais, os indicadores propostos servem de interface entre os dois níveis hierárquicos mencionados, sendo que o valor final do indicador, embasado pela grande quantidade de dados e procedimentos utilizados no seu cálculo, oferece o nível de informação necessário para que os gestores superiores (sem formação técnica) possam tomar decisões e priorizar as medidas de eficiência hidráulica e energética aplicáveis. Em outras palavras, os indicadores propostos apresentam, direta ou indiretamente, a porcentagem de economia de energia possível. Essa porcentagem, associada aos consumos totais do sistema atuais e respectivas tarifas de energia, permitem obter o retorno financeiro da implantação das medidas através de cálculos simples.

Apesar de desenvolvidos para a análise de eficiência absoluta de SAAs, os indicadores propostos nesta tese também permitem análises em termos relativos, como por exemplo através de *benchmarking*. Sendo estes indicadores, *grossa modo*, estabelecidos através da comparação percentual entre a situação de determinada variável hidráulica ou energética e seu

valor ótimo sob estas óticas, os indicadores propostos são implicitamente normalizados durante seu cálculo. Este fato pode ser exemplificado ao se considerar o indicador de carga hidráulica disponibilizada para comparar diversas redes de distribuição distintas, sejam elas de um mesmo sistema ou de diversos sistemas.

Apesar destas redes apresentarem características físicas, topográficas e de demandas distintas, o indicador de carga hidráulica disponibilizada quantifica, para cada rede, a relação entre a carga disponibilizada e seu valor ótimo, sendo este último calculado a partir dos limites operativos da rede. Uma vez que o indicador é apresentado em forma percentual, torna-se possível comparar diretamente o valor obtido para cada rede analisada.

Uma barreira para a aplicação dos indicadores propostos para análises de eficiência relativa reside no fato destes serem aplicados em unidades de análise decompostas para cada sistema de abastecimento de água, ao contrário dos indicadores tradicionais utilizados na literatura para *benchmarking*. No contexto energético e hidráulico, tais indicadores tradicionais, como intensidades energéticas ou índices de perdas de água, são normalmente calculados para sistemas como um todo. Dessa forma, o uso dos indicadores propostos na tese para *benchmarking* deve ser precedido de uma criteriosa definição das unidades de análise (redes de distribuição ou setores de redes de distribuição, estações de bombeamento, adutoras específicas, dentre outras), de forma a se compatibilizar unidades em relação a seus limites e participação dentro do sistema de abastecimento, garantindo a confiabilidade e a consistência da análise de eficiência relativa.

Uma das principais barreiras à implantação de SMDs e indicadores de eficiência hidráulica e energética em SAAs é a ausência ou precariedade de sistemas de gerenciamento de informações, juntamente à inexistência de sistemas físicos de medição e monitoramento hidráulico e energético (sensores, instrumentação e supervisórios). Em situações práticas, muitas vezes tais dados e informações, apesar de existentes, são de difícil acesso, incompletos, desatualizados e apresentados de forma de difícil análise e manipulação (por exemplo, em documentos antigos e manuscritos). Essa barreira extrapola a etapa de desenvolvimento dos indicadores e SMDs, uma vez que o acompanhamento da evolução da eficiência é primordial para a sobrevivência e efetividade do SMD, de forma a se atingirem suas metas estratégicas.

Os setores de abastecimento de água e energia no Brasil continuam utilizando um paradigma antigo de expansão da oferta para atender ao crescimento da demanda. Apesar da expansão da oferta ser importante para o planejamento dos setores, sobretudo a longo prazo e considerando o cada vez mais pujante cenário de pressão sobre os recursos naturais, as

questões relacionadas à eficiência, conservação e uso racional de água energia elétrica devem deixar de ser opções paliativas, ocupando um papel de destaque. Entende-se que a expansão da oferta se justifica somente em cenários de máxima eficiência, e as políticas, estudos e planos de expansão deveriam ser elaborados considerando metas ambiciosas de eficiência e conservação de recursos.

5.1 PERSPECTIVAS, TENDÊNCIAS E OPORTUNIDADES DE PESQUISA PARA FUTUROS TRABALHOS

Muitos estudos sobre economias de escala em sistemas de abastecimento, com abordagem financeira, foram desenvolvidos ao longo das últimas décadas. Novas pesquisas sobre economias de escala e densidade, em termos hidráulicos e energéticos, constituem um importante campo de pesquisas na área, uma vez que podem fornecer subsídios para o dimensionamento ótimo e planejamento da expansão de SAAs, principalmente quando consideradas opções de sistemas distribuídos e/ou comunitários.

De forma complementar, um campo promissor em termos de eficiência e produtividade em sistemas de abastecimento de água, é a análise de economias de escopo, em função principalmente da consolidação do conceito de saneamento ambiental – conjunto de obras, ações e serviços integrados para promoção da saúde pública e qualidade ambiental. Novas pesquisas podem avaliar, sob os pontos de vista econômico, hidráulico, energético, dentre outros, quais são as repercussões em termos de desempenho da integração de atividades como tratamento e distribuição de água, tratamento de esgotos e gerenciamento de resíduos, em contextos locais, regionais e nacionais.

A valoração da água bruta como indutora de eficiência hidráulica e energética em SAAs é um tema com amplas possibilidades para novas pesquisas e, principalmente, de grande aplicabilidade prática, dado o estado embrionário da maioria dos comitês e agências de bacias brasileiras. Tais estudos poderão subsidiar a implantação do mecanismo de cobrança pelo uso de recursos hídricos, sobretudo em bacias hidrográficas em condição de estresse ou escassez, uma vez que, nestas situações, as perdas de água são um fator comprometedor da disponibilidade hídrica para os usos múltiplos. Estudos como os de Byrnes *et al.* (2010) fazem referência à promoção da eficiência em SAAs como mecanismo de adaptação ao estresse e escassez hídrica, citando o exemplo da Austrália.

Novos estudos podem ser desenvolvidos correlacionando eficiência hidráulica e

energética em SAAs e a emissão de gases de efeito estufa, bem como podem ser propostos modelos para enquadramento de ações de eficiência hidráulica e energética nesse nicho específico, dentro das categorias contempladas nos projetos de mecanismos de desenvolvimento limpo (MDL).

Pesquisas análogas à desenvolvida nesta tese podem ser conduzidas tendo como objeto de estudo estações e sistemas de tratamento de esgoto, uma vez que estas são igualmente relevantes e complementares em termos de sustentabilidade de cidades em relação aos SAAs.

Um modelo semelhante ao do indicador de eficiência hídrica proposto, relacionado ao uso racional da água, poderá ser desenvolvido considerando a orientação a *outputs* da DEA. Nessa orientação, considera-se a maximização dos níveis de produtos (*outputs*) mantendo-se os níveis atuais de insumos (*inputs*). Dessa forma, seria possível, por exemplo, avaliar a eficiência do uso final da água, por parte dos consumidores.

A pesquisa teve como uma de suas fronteiras físicas de estudo a entrada dos ramais consumidores de água. Esta fronteira pode ser futuramente estendida de forma a contemplar as unidades consumidoras (residenciais, industriais, dentre outras) na medição de eficiência hidráulica e energética. Medidas de uso racional, eficiência e conservação da água em residências, prédios públicos e industriais podem ser avaliadas sob a ótica da energia agregada economizada, através de abordagens e métodos semelhantes aos utilizados nesta pesquisa.

Fontes alternativas de água, como água de chuva, reuso e dessalinização, constituem um campo recente de pesquisas, e estudos comparativos de sua eficiência hidráulica e energética em relação a fontes convencionais serão de grande aplicabilidade.

Uma relevante contribuição prática para o setor seria a atualização das normas técnicas utilizadas no setor de abastecimento de água pautada em diretrizes e procedimentos voltados à eficiência hidráulica e energética do projeto de SAAs. Nesse sentido, seria fundamental a flexibilização de valores de referência - como por exemplo, as pressões máximas e mínimas admissíveis em redes de distribuição - e também uma maior individualização dos projetos para a promoção da eficiência dos sistemas.

Duas questões se mostram estratégicas no cenário atual: planejamento urbano e cidades sustentáveis. Por que não agregar a questão da eficiência energética e hidráulica à essas questões? Por exemplo: atualmente o projeto de SAAs visam estabelecer os níveis mínimos de serviço (pressões e demandas), ou seja, suas variáveis de projeto visam estabelecer condições hidráulicas e energéticas suficientes para o atendimento. Tais condições geralmente são superiores às ótimas, resultando em desperdícios de energia elétrica, pressões excessivas maior incidência de vazamentos.

A utilização do indicador de carga hidráulica disponibilizada para a análise de projetos de SAAs poderia torná-los eficientes do ponto de vista hidráulico e energético através, por exemplo, da definição de níveis e cotas topográficas de estações de tratamento e reservatórios, escolha do melhor traçado de redes e adutoras, seleção de bombas adequadas às necessidades analisadas. A utilização de técnicas multi-objetivo para conciliar a eficiência energética e hidráulica com outras condicionantes de infraestrutura (por exemplo, malhas viárias) é uma área com grande potencial para estudos.

Futuros estudos podem contemplar a “eficiência sustentável” de SAAs, ou seja, o estabelecimento de cenários ótimos nas esferas ambiental (indiretamente representada pelo contexto hidráulico e energético proposto nessa tese), econômica e social.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOTT, M.; COHEN, B. Productivity and efficiency in the water industry. **Utilities Policy**, Amsterdam, v. 17, p. 233-244, 2009.

ADLER, N.; FRIEDMAN, L.; SINUANY-STERN, Z. Review of ranking methods in the data envelopment analysis context. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 140, n. 2, p. 249-265, 2002.

ALEGRE, H.; HIRNER, W.; BAPTISTA, J. M.; PARENA, R. **Indicadores de desempenho para serviços de abastecimento de água**: versão portuguesa de Performance indicators for water supply services. Tradução Patrícia Duarte, Helena Alegre, Jaime Melo Baptista. Londres: IWA/IRAR/LNEC, 2004.

ALLIANCE TO SAVE ENERGY. **Água e energia**: Aproveitando as oportunidades de efficientização de água e energia não exploradas nos sistemas e água municipais. Washington: ALLIANCE, 2002.

ALLIANCE TO SAVE ENERGY. **WATERGY**: Energy and water efficiency in municipal water supply and wastewater treatment. Washington: ALLIANCE, 2007.

ALMEIDA, M. C.; VIEIRA, P.; RIBEIRO, R. **Uso eficiente da água no sector urbano**. Lisboa: IRAR, 2006.

ALSHARIF, K., FERROZ, E. H., KLEMER, A.; RAAB, R. Governance of water supply systems in the Palestinian Territories: a data envelopment analysis approach to the management of water resources. **Journal of Environment Management**, Amsterdam, v. 87, n. 1, p. 80-94, 2008.

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION RESEARCH FOUNDATION. **Performance benchmarking for water utilities**. Denver: AWWARF, 1996.

ANDERSEN, B.; FAGERHAUG, T. **Performance measurement explained**: designing and implementing your state-of-art system. Winsconsin: ASQ, 2002.

ANGULO MEZA, L.; BIONDI NETO, L.; MELLO, J. C. C. B. S.; GOMES, E. G. ISYDS - Integrated System for Decision Support (SIAD - Sistema Integrado de Apoio à Decisão): a software package for data envelopment analysis model. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 3, p. 493-503, 2005.

ARARAL, E. Improving effectiveness and efficiency in the water sector: institutions, infrastructure and indicators. **Water Policy**, Londres, v. 12, p. 1-7, 2010.

ARAUJO, L. S.; RAMOS, H.; COELHO, S. T. Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management. **Water Resources Management**, Nova Iorque, v. 20, p. 133-149, 2006.

ARAÚJO, R. (Coord.). **Manual de hidráulica**: Azevedo Netto. 8. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12211**: estudos de concepção de sistemas públicos de abastecimento de água. Rio de Janeiro: ABNT, 1992a.

_____. **NBR 12212**: projeto de poço para captação de água subterrânea. Rio de Janeiro: ABNT, 1992b.

_____. **NBR 12213**: projeto de captação de água de superfície para abastecimento público. Rio de Janeiro: ABNT, 1992c.

_____. **NBR 12214**: projeto de sistema de bombeamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro: ABNT, 1992d.

_____. **NBR 12216**: projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro: ABNT, 1992e.

_____. **NBR 12217**: projeto de reservatório de distribuição de água para abastecimento público. Rio de Janeiro: ABNT, 1994a.

_____. **NBR 12218**: projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. Rio de Janeiro: ABNT, 1994b.

_____. **NBR 6400**: bombas hidráulicas de fluxo (Classe C) – Ensaio de desempenho e de cavitação. Rio de Janeiro: ABNT, 1989.

ATTADIA, L. C. L.; MARTINS, R. A. Medição de desempenho como base para evolução da melhoria contínua. **Produção**, São Paulo, v. 13, n. 2, 2003. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-65132003000200004&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 12 dez. 2010.

AUSTRALIAN GOVERNMENT. NATIONAL WATER COMMISSION. **National Performance Framework 2008** - 09 Urban Water Performance Report Auditing Requirements and Audit Report Template. Canberra: Australian Government/NWC, 2009.

_____. **National Water Commission Annual Report 2010–11**. Canberra: Australian Government/NWC, 2011.

BAKKES, J. A.; VAN DEN BORN, G. J.; HELDER, J. C.; SWART, R. J. HOPE, C.W. **An overview of environmental indicators**: State of the art. Nairobi: UNEP, 1994.

BANKER, R. D.; CHARNES, A.; COOPER, W. W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. **Management Science**, Hanover, v. 30, n. 9, p. 1078-1092, 1984.

BARNETSON, B.; CUTRIGHT, M. Performance indicators as conceptual technologies. **Higher Education**, Nova Iorque, v. 40, p. 277-292, 2000.

BARRY, J. A. **WATERGY**: Energy and water efficiency in municipal water supply and wastewater treatment - Cost-effective savings of water and energy. Washington: Alliance to Save Energy, 2007.

BATCHABANI, E.; FUAMBA, M. Optimal Tank Design in Water Distribution Networks: Review of Literature and Perspectives. **Journal of Water Resources Planning and Management**. doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000256. No prelo.

BERNIER, M. A.; BOURRET, B. Pumping energy and variable frequency drives. **ASHRAE Journal**, Atlanta, v. 41, n. 12, p. 37-40, dez. 1999.

BESNER, M.; PRÉVOST, M.; REGLI, S. Assessing the public health risk of microbial intrusion events in distribution systems: Conceptual model, available data, and challenges. **Water Research**, Amsterdam, v. 45, p. 961-979, 2011.

BIAN, Y.; YANG, F. Resource and environment efficiency analysis of provinces in China: a DEA approach based on Sannon's entropy. **Energy Policy**, [S.l.], v. 38, p. 1909-1917, 2010.

BOR, Y. J.; Consistent multi-level energy efficiency indicators and their policy implications. **Energy Economics**, Amsterdam, v. 30, p. 2401-2419, 2008.

BOURGUIGNON, A.; MALLERET, V.; NORREKLIT, H. The American balanced scorecard versus the French tableau de bord: the ideological dimension. **Management Accounting Research**, Amsterdam, v. 15, p. 107-134, 2004.

BOURNE, M.; NEELY, A.; PLATTS, K.; MILLS, J. The success and failure of performance measurement initiatives: Perceptions of participating managers. **International Journal of Operations & Production Management**, Bingley, v. 22, n. 11, p. 1288-1310, 2002.

BRAGA, B. P. F.; FLECHA, R.; PENA, D. S.; KELMAN, J. Pacto federativo e gestão de águas. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, 2008. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142008000200003&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 12 set. 2011.

BRANDT, M.; MIDDLETON, R.; WHEALE, G.; SCHULTING, F. Energy efficiency in the water industry, a Global Research Project. **Water Practice & Technology**, Londres, v. 6, n. 2, 2011.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Atlas Brasil: abastecimento urbano de água: panorama nacional**. Brasília: ANA/Engecorps/COBRAPE, 2010a.

_____. Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe 2011**. Brasília: ANA, 2011a.

_____. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília: ANEEL, 2008a.

_____. Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 19 abr. 2012a, Seção 1, p. 53.

_____. Agência Nacional de Energia Elétrica. BIG – Banco de Informações de Geração.

Brasília, Agência Nacional de Energia Elétrica, 2010. Apresenta informações sobre a capacidade instalada de energia elétrica no Brasil. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp>>. Acesso em: 25 nov. 2010b.

_____. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resoluções do CONAMA**: resoluções vigentes publicadas entre julho de 1984 e novembro de 2008. 2. ed. Brasília: CONAMA, 2008b.

_____. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2010**: Ano base 2009. Rio de Janeiro: EPE, 2010c.

_____. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de saneamento**. 3. ed. Brasília: FUNASA, 2006a.

_____. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nºs 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 8 jan. 2007a, Seção 1, p. 3.

_____. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 8 jan. 1997, Seção 1, p. 4.

_____. Ministério da Saúde. **Portaria MS nº 518/2004**: Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância em Saúde, Coordenação - Geral de Vigilância em Saúde Ambiental. Brasília: Editora do Ministério da Saúde, 2005.

_____. Ministério das Cidades. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento**: diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2009. Brasília: MCIDADES, 2011b.

_____. Ministério das Cidades. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento**: diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2010. Brasília: MCIDADES, 2012b.

_____. Ministério de Minas e Energia; Empresa de Pesquisa Energética. **Matriz Energética Nacional 2030**. Brasília: MME; EPE, 2007b.

_____. Ministério de Minas e Energia; Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília: MME; EPE, 2007c.

_____. Ministério de Minas e Energia; Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2030**. v. 12. Brasília: MME; EPE, 2007d.

_____. Ministério do Meio Ambiente; Secretaria de Recursos hídricos. **Plano Nacional de Recursos Hídricos**: Panorama e estado dos recursos hídricos do Brasil. v. 1. Brasília: MMA; SRH, 2006b.

_____. Ministério do Planejamento e Orçamento; Secretaria Especial de Desenvolvimento Urbano. **Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água**: Documentos técnicos de apoio: Apresentação do Programa. 2. ed. Brasília: MPO; SEDU, 1998.

BUENO, C.; CARTA, J. A. Wind powered pumped hydro storage systems, a means of increasing the penetration of renewable energy in the Canary Islands. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 10, p. 312-340, 2006.

BUI, V. A.; VU, L. T. T.; NGUYEN, M. H. Simulation and optimization of direct contact membrane distillation for energy efficiency. **Desalination**, Amsterdam, v. 259, p. 29-37, set. 2010.

BURGSCHWEIGER, J.; GNÄDIG, B.; STEINBACH, M. C. Optimization models for operative planning in drinking water networks. **Optimization Engineering**, Nova Iorque, v. 10, p. 43-73, 2009.

BURROWS, R.; CROWDER, G. S.; ZHANG, J. Utilization of network modeling in the operational management of water distribution systems. **Urban Water**, Amsterdam, v. 2, p. 83-95, 2000.

BYRNES, J.; CRASE, L.; DOLLERY, B.; VILLANO, R. The relative economic efficiency of urban water utilities in regional New South Wales and Victoria. **Resources and Energy Economics**, Amsterdam, v. 32, p. 439-455, 2010.

CABRERA, E.; PARDO, M. A.; COBACHO, R.; CABRERA JR., E. Energy audit of water networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Washington, v. 136, n. 6, p. 669-677, nov. 2010.

CAMPISANO, A.; CREACO, E.; MODICA, C. RTC of Valves for Leakage Reduction in Water Supply Networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Reston, v. 136, n. 1, p. 138-141, 2010.

CARRIJO, I. B.; REIS, L. F. R. Extração de estratégias operacionais ótimas de sistemas de distribuição de água utilizando algoritmos genéticos multiobjetivo e aprendizado de máquina - Aplicação ao sistema de macro-distribuição de água de Goiânia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p. 161-172, abr. 2006.

CARVALHO, P.; MARQUES, R. C. The influence of the operational environment on the efficiency of water utilities. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 92, n. 10, p. 2698-2707, 2011.

CASTRO, M. B. G.; REMMERSWALL, J. A. M.; BREZET, J. C.; REUTER, M. A. Exergy losses during recycling and the resource efficiency of product systems. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 52, p. 219-233, 2007.

CECCONI, P.; FRANCESCHINI, F.; GALETTO, M. The conceptual link between measurements, evaluations, preferences and indicators, according to the representational theory. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 179, p. 174-185, 2007.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S. A. **Resultados PROCEL 2011**: Ano base

2010. Rio de Janeiro: ELETROBRAS, 2011.

CHARNES, A.; COOPER, W. W.; GOLANY, B.; SEIFORD, L.; STUTZ, J. Foundations of data envelopment analysis for Pareto-Koopmans efficient empirical production functions. **Journal of Econometrics**, Amsterdam, v. 30, n. 1, p. 91–107, 1985.

CHARNES, A.; COOPER, W. W.; RHODES, E. Measuring the efficiency of decision making units. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 2, p. 429-44, 1978.

CHEREMISINOFF, N. P. **Handbook of water and wastewater treatment technologies**. [S. l.]: Butterworth–Heinemann, 2002.

COELLI, T. **A Guide to DEAP Version 2.1: A Data Envelopment Analysis (Computer) Program**, CEPA Working Paper 96/08. Queenslan: Centre for Efficiency and Productivity Analysis, 1996.

COLOMBO, A. F.; KARNEY, B. W. Energy and costs of leaky pipes: Toward comprehensive picture. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Washington, v. 128, n. 6, p. 441-450, nov. 2002.

_____. Impacts of leaks on energy consumption in pumped systems with storage. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Washington, v. 131, n. 2, p. 146-155, mar. 2005.

COOPER, W. W.; SIEFORD, L. M.; TONE, K. **Data envelopment analysis: A comprehensive text with models, application, references and DEA-Solver Software**. 2. ed. Nova Iorque: Springer Science+Business Media, 2007.

CORTON, M. L.; BERG, S. V. Benchmarking Central American water utilities. **Utilities Policy**, Amsterdã, v. 17, p. 267–275, 2009.

COSTA, L. H. M.; CASTRO, M. A. H.; RAMOS, H. Utilização de um algoritmo genético híbrido para operação ótima de sistemas de abastecimento de água. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 187-196, abr. 2010.

COSTA, L. H. M.; RAMOS, H. M.; CASTRO, M. A. H. Hybrid genetic algorithm in the optimization of energy costs in water supply networks. **Water Science & Technology: Water Supply**, Londres, v. 10, n. 3, p. 315-326, 2010.

COULIBALY, H. D.; RODRIGUEZ, M. J. Development of performance indicators for small Quebec drinking water utilities. **Journal of Environmental Management**, [S.l.], v. 73, p. 243-255, 2004.

CUBBIN, J.; TZANIDAKIS, G. Regression versus data envelopment analysis for efficiency measurement: an application to the England and Wales regulated water industry. **Utilities Policy**, Amsterdam, v. 7, n. 2, p. 75–85, 1998.

DE LA TORRE, A. Efficiency optimization in SWRO plant: high efficiency & low maintenance pumps. **Dessalination**, Amsterdam, v. 221, p. 151-157, 2008.

DE WITTE, K.; MARQUES, R. C. Designing performance incentives, an international benchmark study in the water sector. **Central European Journal of Operations Research**, Nova Iorque, v. 18, n. 2, p. 189–220, 2010.

DEBREU, G. The coefficient of resource utilization. **Econometrica**, [S. l.], v. 19, n. 3, p. 273-292, 1951.

DYSON, R. G.; ALLEN, R.; CAMANHO, A. S.; PODINOVSKI, V. V.; SARRICO, C. S.; SHALE, E. A. Pitfalls and protocols in DEA. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 132, p. 245-259, 2001.

ECHÁVEZ, G. Increase in losses coefficient with age for small diameter pipes. **Journal of Hydraulic Engineering**, Reston, v. 123, n. 2, p. 157-159, 1997.

EHRHARDT, D.; JANSON, N. Can regulation improve the performance of government-controlled water utilities?. **Water Policy**, Londres, v. 12, p. 23-40, 2010.

EKER, I.; KARA, T. Operation and control of a water supply system. **ISA Transactions**, Amsterdam, v. 42, n. 3, p. 461–473, 2003.

FANG, H.; ZHANG, J.; GAO, J. Optimal operation of multi-storage tank multi-source system based on storage policy. **Journal of Zhejiang University**, Amsterdam, v. 11, n. 8, p. 571-579, 2010.

FARREL, M. J. The measurement of productive efficiency. **Journal of the Royal Statistical Society**, Londres, v. 120, n. 3, p. 253-290, 1957.

FILION, Y. R. Impact of urban form on energy use in water distribution systems. **Journal of Infrastructure Systems**, Washington, v. 14, n. 4, p. 337-346, 2008.

FIORI, S.; FERNANDES, V. M. C.; PIZZO, H. Avaliação qualitativa e quantitativa do reúso de águas cinzas em edificações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 6, n. 1, p. 19-30, jan. 2006.

FOLAN, P.; BROWNE, J. A review of performance measurement: Towards performance measurement. **Computers in Industry**, Amsterdam, v. 56, p. 663-680, 2005.

FONTANA, N.; GIUGNI, M.; PORTOLANO, D. Losses reduction and energy production in water distribution networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**. Reston, v. 138, n. 3, p. 237-244, 2012.

FRANCESCHINI, F.; GALETTO, M.; MAISANO, D. **Management by measurement: Designing key indicators and performance measurement systems**. Heidelberg: Springer, 2007.

FRANCESCHINI, M.; GALETTO, M.; MAISANO, D.; VITICCHIÈ, L. The condition of uniqueness in manufacturing process representation by performance/quality indicators. **Quality and Reliability Engineering International**, Malden, v. 22, p. 567-580, 2006.

FRIJNS, J.; MIDDLETON, R.; UIJTERLINDE, C.; WHEALE, G. Energy efficiency in the European water industry: learning from best practices. **Journal of Water and Climate**

Change, Londres, v. 3, n. 1, p. 11–17, 2012.

GERBENS-LEENES, P. W.; HOEKSTRA, A. Y.; VAN DER MEER, T. The water footprint of energy from biomass: a quantitative assessment and consequences of an increasing share of bio-energy in energy supply. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 68, p. 1052-1060, 2009.

GHONEIM, A. A. Design optimization of photovoltaic powered water pumping systems. **Energy Conversion & Management**, Amsterdam, v. 47, p. 1449-1463, 2006.

GIBSON, I. H. Variable-speed drives as flow control elements. **ISA Transactions**, Amsterdam, v. 33, n. 2, p. 165-169, 1994.

GIRARD, M.; STEWART, R. A. Implementation of pressure and leakage management strategies on the Gold Coast, Australia: Case study. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Washington, v. 133, n. 3, p. 210-217, 2007.

GIUSTOLISI, O.; SAVIC, D.; KAPELAN, Z. Pressure-driven demand and leakage simulation for water distribution networks. **Journal of Hydraulic Engineering**, Washington, v. 134, n. 5, p. 626-635, 2008.

GLASNOVIC, Z.; MARGETA, J. Optimization of irrigation with photovoltaic pumping system. **Water Resources Management**, Nova Iorque, v. 21, p. 1277-1279, 2007.

GOMES, H. P. **Sistemas de abastecimento de água**: Dimensionamento econômico e operação de redes e elevatórias. 3. ed. João Pessoa: Editora Universitária UFPB, 2009a.

_____. (Org.). **Sistemas de bombeamento**: eficiência energética. João Pessoa: Editora Universitária UFPB, 2009b.

GOMES, H. P.; SALVINO, M. M. **Epanet 2.0 Brasil**: Manual do usuário. João Pessoa: UFPB, 2009.

GOMES, H. P.; SILVA, J. G. Dimensionamento econômico de sistemas de distribuição de água, considerando variáveis as condições de contorno do projeto. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p. 99-110, abr. 2006.

GONZALEZ, R. V. D.; MARTINS, M. F. Melhoria contínua no ambiente ISO 9001:2000: estudo de caso em duas empresas do setor automobilístico. **Produção**, São Paulo, v. 17, n. 3, p. 592-603, dez. 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-65132007000300014&lng=en&nrm=iso>. access on 26 Dec. 2010. doi: 10.1590/S0103-65132007000300014.

GRANICH, W.; ELMORE, A. C. An evaluation of the use of renewable energy to pump water in Sacala las Lomas, Guatemala. **Environmental Earth Sciences**, Amsterdam, v. 61, p. 837-846, 2010.

GUDE, V. G.; NIRMALAKHANDAN, N. Sustainable desalination using solar energy. **Energy Conversion and Management**, Amsterdam, v. 51, p. 2245-2251, nov. 2010.

HAMILTON, K. Policy-driven indicators for sustainable development. In: MEDITERRANEAN BLUE PLAN ENVIRONMENTAL PERFORMANCE INDICATORS WORKSHOP, 1996, Damasco. **Anais...** Damasco: The World Bank, 1996.

HAMMAD, M. Photovoltaic, wind and diesel: A cost comparative study of water pumping options in Jordan. **Energy Policy**, Amsterdam, v. 23, n. 8, p. 723-726, 1995.

HELLAND, B.; ADAMSSON, J. Performance indicators: benchmarking between six cities in Scandinavia. **Aqua**, Londres, v. 47, n. 6, p. 284-288, 1999.

HERING, H. Energy efficiency – a critical view. **Energy**, Amsterdam, v. 31, p. 10-20, 2006.

HERRALA, M. E.; HUOTARI, H.; HAAPASALO, H. J. O. Governance of Finnish waterworks e A DEA comparison of selected models. **Utilities Policy**, Amsterdam, v. 20, n. 1, p. 64-70, 2012.

HERRERA, M.; TORGO, L.; IZQUIERDO, J.; PÉREZ-GARCIA, R. Predictive models for forecasting hourly urban water demand. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 387, n. 1-2, p. 141–150, 2010.

HESPAÑHOL, I. Um novo paradigma para a gestão de recursos hídricos. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 131-158, 2008.

HIRATA, R; SUHOGUSOFF, A; FERNANDES, A. Groundwater resources in the State of São Paulo (Brazil): the application of indicators. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 79, n. 1, mar. 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0001-37652007000100016&lng=en&nrm=iso>. access on 04 Feb. 2011. doi: 10.1590/S0001-37652007000100016.

HOEKSTRA, A. Y.; CHAPAGAIN, A. K. Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. **Water Resources Management**, Nova Iorque, v. 21, p. 35–48, 2007.

HOPPER, N.; BARBOSE, G.; GOLDMAN, C.; SCHLEGEL, J. Energy efficiency as a preferred resource: evidence from utility resource plans in the Western US and Canada. **Energy Efficiency**, v. 2, p. 1-16, 2009.

HU, J.; WANG, S.; YEH, F. Total-factor water efficiency of regions in China. **Resources Policy**, Amsterdam, v. 31, p. 217-230, 2006.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change and Water**. Geneva: IPCC, 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 24510**: activities relating to drinking water and wastewater services - guidelines for the assessment and for the improvement of the service to users. Geneva: ISO, 2007a.

_____. **ISO 24511**: activities relating to drinking water and wastewater services - guidelines for the management of wastewater utilities and for the assessment of wastewater services.

Geneva: ISO, 2007b.

_____. **ISO 24512**: activities relating to drinking water and wastewater services - guidelines for the management of drinking water utilities and for the assessment of drinking water services. Geneva: ISO, 2007c.

_____. **ISO 50001**: energy management systems — Requirements with guidance for use. Geneva: ISO, 2011.

_____. **ISO 9906**: Rotodynamic pumps - Hydraulic performance acceptance tests - Grades 1 and 2. Geneva: ISO, 1999.

JACKSON, T.; KHAN, S.; HAFEEZ, M. A comparative analysis of water application and energy consumption at the irrigated field level. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 97, p. 1477–1485, 2010.

JOWITT, P. W.; XU, C. Optimal valve control in water distribution networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Reston, v. 116, n. 4, p. 455-472, 1990.

KAYA, D.; YAGMUR, E. A.; YIGIT, K. S.; KILIC, F. C.; EREN, S.; CELIK, C. Energy efficiency in pumps. **Energy Conversion and Management**, Amsterdam, v. 49, p. 1662-1673, 2008.

KHANNA, N. Measuring environmental quality: an index of pollution. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 35, p. 191-202, 2000.

KING, C. W.; HOLMAN, A. S.; WEBBER, M. E. Thirst for energy. **Nature Geoscience**, Austin, v. 1, p. 283-296, mai. 2008.

KINGDOM, B. Use of performance indicators and performance benchmarking in the North American water industry – findings from studies recently completed for AWWA and WEF research foundations. **Aqua**, Londres, v. 47, n. 6, p. 269-274, 1998.

KOHUSOYÁ, K.; SALAJ, M. Performance indicators underpin Czech regulation of operating contracts. **Water Utility Management International**, Londres, v. 5.1, n. 12, p. 12-15, mar. 2010.

KOOPMANS, T. C. On the concept of optimal economic growth. **Academiae Scientiarum Scripta Varia**, [S. l.] v. 28, n. 1, p. 225-287, 1965.

KUMAR, A.; KANDPAL, T. C. Renewable energy technologies for irrigation water pumping in India: A preliminary attempt towards potential estimation. **Energy**, Amsterdam, v. 32, p. 861-870, 2007.

LAMBERT, A. O.; BROWN, T. G.; TAKIZAWA, M.; WEIMER, D. A review of performance indicators for real losses from water supply systems. **Aqua**, Londres, v. 48, n. 6, p. 227-237, 1999.

LAMBERT, A. O.; HIRNER, W. **The blue pages**: Losses from water supply systems: Standard terminology and recommended performance measures. Londres: IWA Publishing,

2000.

LARA, D. D.; MERINO, G. G.; PAVEZ, B. J.; TAPIA, J. A. Efficiency assessment of a wind pumping system. **Energy Conversion and Management**, Amsterdam, v. 52, p. 795-803, 2011.

LINARES, P.; LABANDEIRA, X. Energy efficiency: economics and policy. **Journal of Economic Surveys**, Malden, v. 0, n. 0, p. 1-20, 2010.

LINDO SYSTEMS INC. **Lingo user's guide**. Chicago: LINDO Systems Inc., 2011.

LINGIREDDY, S.; WOOD, D. J. Improved operation of water distribution systems using variable-speed pumps. **Journal of Energy Engineering**, Reston, v. 124, n. 3, p. 90-103, 1998.

LIU, S.; BUTLER, D.; MEMON, F. A.; MAKROPOULOS, C.; AVERY, L.; JEFFERSON, B. Impacts of residence time during storage on potential of water saving for grey water recycling system. **Water Research**, Amsterdam, v. 44, n. 1, p. 267-277, jan. 2010.

LUNDBERG, K.; BALFORS, B.; FOLKESON, L. Framework for environmental performance measurement in a Swedish public sector organization. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 17, p. 1017-1024, 2009.

MADLENER, R.; ANTUNES, C. H.; DIAS, L. C. Assessing the performance of biogas plants with multi-criteria and data envelopment analysis. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 197, n. 3, p. 1084-1094, 2009.

MAGALHÃES JÚNIOR, A. P.; CORDEIRO NETTO, O. M.; NASCIMENTO, N. O. Os indicadores como instrumentos potenciais de gesto das águas no atual contexto legal-institucional do Brasil: Resultados de um painel de especialistas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, p. 49-67, out. 2003.

MAHMOUD, E.; EL NATHER, H. Renewable energy and sustainable developments in Egypt: photovoltaic water pumping in remote areas. **Applied Energy**, v. 74, p. 141-147, 2003.

MAKROPOULOS, C. K.; BUTLER, D. Distributed water infrastructure for sustainable communities. **Water Resources Management**, v. 24, p. 2795-2816, 2010.

MALANO, H.; BURTON, M.; MAKIN, I. Benchmarking performance in the irrigation and drainage sector: a tool for change. **Irrigation and Drainage**, Malden, v. 53, p. 119-133, 2004.

MARQUES, R. C.; MONTEIRO, A. J. Application of performance indicators in water utilities management – a case-study in Portugal. **Water Science and Technology**, Londres, v. 44, n. 2, p. 95-102, 2001.

MARQUES, R. C.; SILVA, D. Análise da variação da produtividade dos serviços de água portugueses entre 1994 e 2001 usando a abordagem de malmquist. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 1, abr. 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-

74382006000100008&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 21 set. 2012.

MARUNGA, A.; HOKO, Z.; KASEKE, E. Pressure management as a leakage reduction and water demand management tool: The case of the City of Mutare, Zimbabwe. **Physics and Chemistry of the Earth**, Amsterdam, v. 31, n. 15-16, p. 763-770, 2006.

MAYS, L. **Water distribution systems handbook**. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1999.

MCINNIS, D. A relative-risk framework for evaluating transient pathogen intrusion in distribution systems. **Urban Water Journal**, Amsterdam, v. 1, n. 2, p. 1744-9006, 2004.

MEYERS, S.; KROMER, S. Measurement and verification strategies for energy savings certificates: meeting the challenges of an uncertain world. **Energy Efficiency**, Nova Iorque, v. 1, p. 313-321, 2008.

MOHAN, S.; BABU, K. S. J. Optimal water distribution network design with honey-bee mating optimization. **Journal of Computing in Civil Engineering**, Reston, v. 24, n. 1, p. 117-126, 2010.

MONACHESI, M. G. **Eficiência energética em sistemas de bombeamento**. Rio de Janeiro: ELETROBRAS, 2005.

MONTALVO, I.; IZQUIERDO, J.; SCHWARZE, S.; PÉRES-GARCÍA, R. Multi-objective particle swarm optimization applied to water distribution systems design: An approach with human interaction. **Mathematical and Computer Modelling**, Amsterdam, v. 52, p. 1219-1227, 2010.

MORAIS, D. C.; ALMEIDA, A. T. Group decision-making for leakage management strategy of water network. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 52, n. 2, p. 441-459, 2007.

MORAIS, D. C.; CAVALCANTE, C. A. V.; ALMEIDA, A. T. Priorização de áreas de controle de perdas em redes de distribuição de água. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, v. 30, n. 1, p. 15-32, jan. 2010.

MORENO, M. A.; CARRIÓN, P. A.; PLANELLS, P.; ORTEGA, J. F.; TARJUELO, J. M. Measurement and improvement of the energy efficiency at pumping stations. **Biosystems Engineering**, Amsterdam, v. 98, p. 479 – 486, 2007.

MORENO, M. A.; ORTEGA, J. F.; CÓRCOLES, J. I.; MARTÍNEZ, A.; TARJUELO, J. M. Energy analysis of irrigation delivery systems: monitoring and evaluation of proposed measures for improving energy efficiency. **Irrigation Science**, Nova Iorque, v. 28, p. 445-460, 2010.

MUSHTAQ, S.; MARASENI, T. N.; MAROULIS, J.; HAFEEZ, M. Energy and water tradeoffs in enhancing food security: a selective international assessment. **Energy Policy**, Amsterdam, v. 37, p. 3635-3644, 2009.

NAFEYA, A.S.; SHARAFA, M. A.; RODRÍGUEZ, L. G. Thermo-economic analysis of a combined solar organic Rankine cycle-reverse osmosis desalination process with different

energy recovery configurations. **Desalination**, Amsterdam, v. 261, p. 138-147, out. 2010.

NAUGES, C.; VAN DEN BERG, C. Economies of density, scale and scope in the water supply and sewerage sector: a study of four developing and transition economies. **Journal of Regulatory Economics**, Nova Iorque, v. 34, p. 144–163, 2008.

NAZIF, S.; KARAMOUZ, M.; TABESH, M.; MORIDI, A. Pressure Management model for urban water distribution networks. **Water Resources Management**, Nova Iorque, v. 24, n. 3, p. 437–458, 2010.

NEELY, A.; GREGORY, M.; PLATTS, K. Performance measurement system design: A literature review and research agenda. **International Journal of Operations & Production Management**, Bingley, v. 15, n. 4, p. 80-116, 1995.

NEELY, A.; GREGORY, M.; PLATTS, K. Performance measurement system design: A literature review and research agenda. **International Journal of Operations & Production Management**, Bingley, v. 25, n. 12, p. 1228-1263, 2005.

NEW YORK STATE ENERGY RESEARCH & DEVELOPMENT AUTHORITY. **Water & Wastewater Energy Management: Best Practices Handbook**. Nova Iorque: NYSERDA, 2010.

NICCOLUCCI, V.; BOTTO, S.; RUGANI, B.; NICOLARDI, V.; BASTIANONI, S.; GAGGI, C. The real water consumption behind drinking water: The case of Italy. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 92, p. 2611-2618, 2011.

NUDURUPATI, S. S.; BITITCI, U. S.; KUMAR, V.; CHAN, F.T.S. State of the art literature review on performance measurement. **Computer & Industrial Engineering**, Amsterdam, v. 60, n. 2, p. 279-290, 2011.

ODEH, I.; YOHANIS, Y. G.; NORTON, B. Economic viability of photovoltaic water pumping systems. **Solar Energy**, Amsterdam, v. 80, p. 850-860, 2006.

OIKONOMOU, V.; BECCHIS, F.; STEG, L.; RUSSOLILLO, D. Energy saving and energy efficiency concepts for policy making. **Energy Policy**, Amsterdam, v. 37, p. 4787-4796, 2009.

OULD-AMROUCHE, S.; REKIOUA, D.; HAMIDAT, A. Modelling photovoltaic water pumping systems and evaluation of their CO₂ emissions mitigation potential. **Applied Energy**, Amsterdam, v. 87, p. 3451-3459, 2010.

PALM, J.; THOLLANDER, P. An interdisciplinary perspective on industrial energy efficiency. **Applied Energy**, Amsterdam, v. 87, p. 3255-3261, 2010.

PARENA, R.; SMEETS, E. Benchmarking initiatives in the water industry. **Water Science and Technology**, Londres, v. 44, n. 2, p. 103-110, 2001.

PARMENTER, D. **Key performance indicators: Developing, implementing and using winning KPIs**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.

PATTERSON, M. What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological

issues. **Energy Policy**, Amsterdam, v. 24, n. 5, p. 377-390, 1996.

PEÑA, C. R. Um modelo de avaliação da eficiência da administração pública através do método análise envoltória de dados (DEA). **Revista Administração Contemporânea**, Curitiba, v. 12, n. 1, mar. 2008.

PERARD, E. Private sector participation and regulatory reform in water supply in the Southern Mediterranean region. **Water Policy**, Londres, v. 12, p. 41-65, 2010.

PEREIRA, R. A. C.; FERREIRA, P. C. Efeitos de crescimento e bem-estar da lei de Parceria Público-Privada no Brasil. **Revista Brasileira de Economia**, Rio de Janeiro, v. 62, n. 2, p. 207-219, 2008.

PERROTTO, E.; CANZIANI, R.; MARCHESI, R.; BUTELLI, P. Environmental performance, indicators and measurement uncertainty in EMS context: a case study. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 16, p. 517-530, 2008.

PICAZO-TADEO, A. J.; SÁEZ-FERNÁNDEZ, F. J.; GONZÁLEZ-GÓMEZ, F. Does service quality matter in measuring the performance of water utilities? **Utilities Policy**, Amsterdam, v. 16, n. 1, p. 30-38, 2008.

POPOVA, V.; SHARPANSKYKH, A. Modeling organizational performance indicators. **Information Systems**, Amsterdam, v. 35, p. 505-527, 2010.

PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos Avançados**, São Paulo, 2008, v. 22, n. 63, p. 43-60, 2008.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. 2. ed. São Carlos: EESC-USP, 1999.

PRABHAKAR, S. V. R. K.; ELDER, M. Biofuels and resource use efficiency in developing Asia: back to basics. **Applied Energy**, Amsterdam, v. 86, p. S30-S36, 2009.

PUROHIT, P. Financial evaluation of renewable energy technologies for irrigation water pumping in India. **Energy Policy**, Amsterdam, v. 35, p. 3134-3144, 2007.

PUROHIT, P.; KANDPAL, C. Renewable energy technologies for irrigation water pumping in India: projected levels of dissemination, energy delivery and investment requirements using available diffusion models. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 9, p. 592-607, 2005.

RAMOS, H. M.; KENOV, K. N.; VIEIRA, F. Environmentally friendly hybrid solutions to improve the energy and hydraulic efficiency in water supply systems. **Energy for Sustainable Development**, Amsterdam, v. 15, n. 4, p. 436-442, 2011.

RAMOS, J. S.; RAMOS, H. M. Sustainable application of renewable sources in water pumping systems: Optimized energy system configuration. **Energy Policy**, Amsterdam, v. 37, p. 633-643, 2009.

REDE NACIONAL DE CAPACITAÇÃO E EXTENSÃO TECNOLÓGICA EM SANEAMENTO AMBIENTAL. **Abastecimento de água**: gerenciamento de perdas de água

e energia elétrica em sistemas de abastecimento: guia do profissional em treinamento: nível 2. Salvador: RECESA, 2008.

ROGERS, J. W.; LOUIS, G. E. Conceptualization of a robust performance assessment and evaluation model for consolidating community water systems. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 90, p. 786-797, 2009.

ROMANO, R.; GUERRINI, A. Measuring and comparing the efficiency of water utility companies: A data envelopment analysis approach. **Utilities Policy**, Amsterdam, v. 19, n. 3, p. 202-209, 2011.

ROOKS, J. A.; WALLACE, A. K. Energy efficiency in VSDs. **IEEE Industry Applications Magazine**, [S. l.], v. 10, n. 3. p. 57-61, mai. 2004.

ROSSMAN, L.A. **Epanet 2 users manual**. Cincinnati: United States Environmental Protection Agency, 2000.

SAAL, D. S.; PARKER, D. Productivity and price performance in the privatized water and sewerage companies of England and Wales. **Journal of Regulatory Economics**, Nova Iorque, v. 20, n. 1, p. 61-90, 2001.

SADIQ, R.; RODRIGUEZ, M. J.; TESFAMARIAM, S. Integrating indicators for performance assessment of small water utilities using ordered weighted averaging (OWA) operators. **Expert Systems with Applications**, Amsterdam, v. 37, p. 4881-4891, 2010.

SÃO PAULO. Decreto nº 52.748, de 26 de fevereiro de 2008. Cria Grupo de Trabalho para propor alternativas de aproveitamento dos recursos hídricos da Macro-metrópole de São Paulo. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**, São Paulo, SP, 26 fev. 2008.

_____. Portal do Governo do Estado de São Paulo. Disponível em: <http://www.saopaulo.sp.gov.br/conhecasp/principal_conheca>. Acesso em: 02 out. 2012.

SAVAR, M.; KOZMAR, H.; SUTLOVIC, I. Improving centrifugal pump efficiency by impeller trimming. **Desalination**, Amsterdam, v. 249, p. 654-659, 2009.

SCHAUMANN, G. The efficiency of the rational use of energy. **Applied Energy**, Amsterdam, v. 84, p. 719-728, 2007.

SELVAKUMAR, A.; CLARK, R. M.; SIVAGANESAN, M. Costs for Water Supply Distribution System Rehabilitation. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Reston, v. 128, n. 4, 303-306, 2002.

SHIELDS, D. J.; SOLAR, S. V.; MARTIN, W. E. The role of values and objectives in communicating indicators of sustainability. **Ecological Indicators**, [S.l.], v. 2, p. 149-160, 2002.

SICHE, R.; AGOSTINHO, F.; ORTEGA, E.; ROMEIRO, A. Índices versus indicadores: precisões conceituais na discussão da sustentabilidade de países. **Ambiente & Sociedade**, Campinas, v. 10, n. 2, p. 137-148, jul. 2007.

SINGH, M. R.; UPADHYAY, V.; MITTAL, A. K. Addressing sustainability in

benchmarking framework for indian urban water utilities. **Journal of Infrastructure Systems**, Washington, v. 16, n. 1, p. 81-92, 2010.

SMELSER, N. J.; BALTES, P. B. **International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences**. Amsterdam: Elsevier, 2001.

SONG, M.; AN, Q.; ZHANG, W.; WANG, Z.; WU, J. Environmental efficiency evaluation based on data envelopment analysis: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 16, n. 7, p. 4465-4469, 2012.

SOUZA NETO, F. C. **Bombas: guia avançado**. Rio de Janeiro: ELETROBRAS, 2004.

STAPENHURST, T. **The benchmarking book: A how-to-guide to best practice for managers and practitioners**. Oxford: Elsevier, 2009.

TABESH, M.; YEKTA, A. H. A.; BURROWS, R. An integrated model to evaluate losses in water distribution systems. **Water Resources Management**, Nova Iorque, v. 23, p. 477-492, 2009.

TANAKA, K. Assessment of energy efficiency performance measures in industry and their application for policy. **Energy Policy**, Amsterdam, v. 36, p. 2887-2902, 2008.

TEZZA, R.; BORNIA, A. C.; VEY, I. H. Sistemas de medição de desempenho: uma revisão e classificação da literatura. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 17, n. 1, 2010. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-530X2010000100007&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 12 dez. 2010.

THANASSOULIS, E. The use of data envelopment analysis in the regulation of UK water utilities: Water distribution. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 126, n. 2, p. 436-453, 2000.

TUPPER, H. C.; RESENDE, M. Efficiency and regulatory issues in the Brazilian water and sewage sector: An empirical study. **Utilities Policy**, Amsterdam, v. 12, p. 29-40, 2004.

ULANICKI, B.; BOUNDS, P. L. M.; RANCE, J. P. REYNOLDS, L. Open and closed loop pressure control for leakage reduction. **Urban Water**, [S. l.], v. 2, p. 105-114, 2000.

ULANICKI, B.; KAHLER, J.; COULBECK, B. Modeling the efficiency and power characteristics of a pump group. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Washington, v. 134, n. 1, p. 88-93, jan. 2008.

UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION. WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME. **The United Nations world water development report 3: Water in a changing world**. Paris: UNESCO, 2009.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **Energy demands on water resources**. Pittsburgh: USDOE, 2006.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **Energy tips – motor: Motor Tip Sheet #11**. Pittsburgh: USDOE, 2008.

ÜRGE-VORSATZ, D.; METZ, B. Energy efficiency revisited: how far does it get us in controlling climate change. **Energy Efficiency**, Nova Iorque, v. 2, p. 87-94, 2009.

VAIRAVAMOORTHY, K.; LUMBERS, J. Leakage reduction in water distribution systems: optimal valve control. **Journal of Hydraulic Engineering**, Reston, v. 124, n. 11, p. 1146-1154, 1998.

VAMVAKERIDOU-LYROUDIA, L. S.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. Tank simulation for the optimization of water distribution networks. **Journal of Hydraulic Engineering**, Reston, v. 133, n. 6, p. 625-636, 2007.

VAN DEN BERG, C.; DANILENKO, A. **The IBNET Water Supply and Sanitation Performance Blue Book: The International Benchmarking Network for Water and Sanitation Utilities Databook**. Washington: World Bank Publications, 2010.

VELASCO, M.; PROBST, O.; ACEVEDO, S. Theory of wind-electric water pumping. **Renewable energy**, Amsterdam, v. 29, p. 873-893, 2004.

VENKATESH, G. Cost-benefit analysis – leakage reduction by rehabilitating old water pipelines: Case study of Oslo (Norway). **Urban Water Journal**, Londres, v. 9, n. 4, p. 1-10, 2012.

VIEIRA, F.; RAMOS, H. M. Hybrid solution and pump-storage optimization in water supply system efficiency: A case study. **Energy Policy**, Amsterdam, v. 36, p. 4141-4148, 2008.

_____. Optimization of operational planning for wind/hydro hybrid water supply systems. **Renewable Energy**, Amsterdam, v. 34, n. 3, p. 928–936, 2009.

_____. Optimization of the energy management in water supply systems. **Water Science & Technology**, Londres, v. 9, n. 1, p. 59-65, 2009.

VILELA, O. C.; FRAIDENRAICH, N. A methodology for the design of photovoltaic water supply systems. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, Malden, v. 9, p. 349-361, 2001.

VINHOLIS, M. M. B.; BRANDÃO, H. M. Economia de escala no processo de resfriamento do leite. **Ciência e Agrotecnologia**. Lavras, v.33, n.1, p. 245-251, jan. 2009.

XENERGY. **United States industrial motor systems market opportunities assessment**. Burlington: XENERGY, 1998.

WALTER, M.; CULLMANN, A.; VON HIRSCHHAUSEN, C.; WAND, R.; ZSCHILLE, M. *Quo vadis* efficiency analysis of water distribution? A comparative literature review. **Utilities Policy**, Amsterdam, v. 17, p. 225-232, 2009.

WEI, Y.; LIAO, H.; FAN, Y. An empirical analysis of energy efficiency in China's iron and steel sector. **Energy**, Amsterdã, v. 32, n. 12, p. 2262–2270, 2007.

WORTHINGTON, A. C. **Productivity, efficiency and technological progress in Australia's urban water utilities**. Canberra: National Water Commission, 2011.

YAMIJALA, S; GUIKEMA, S. D.; BRUMBELOW, K. Statistical models for the analysis of water distribution system pipe break data. **Reliability Engineering & System Safety**, Amsterdam, v. 94, n. 2, p. 282-293, 2009.

ZHANG, B.; BI, J.; FAN, Z.; YUAN, Z.; GE, J. Eco-efficiency analysis of industrial system in China: A data envelopment analysis approach. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 68, n. 1-2, p. 306 – 316, 2008.

ZHOU, P.; ANG, B. W.; POH, K. L. A survey of data envelopment analysis in energy and environmental studies. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 189, n. 1, p. 1-18, 2008.

ZHOU, P.; ANG, B. W.; POH, K. L. Measuring environmental performance under different environmental DEA technologies. **Energy Economics**, Amsterdam, v. 30, n. 1, p. 1–14, 2008.

APÊNDICE A – FLUXOGRAMAS ENERGÉTICOS E HIDRÁULICOS DAS UNIDADES DE ANÁLISE DE SAAS

As figuras 80 a 92 apresentam os fluxos energéticos (carga hidráulica e energia elétrica) e de massa (fluxo de água) entre as unidades de análise de SAAs, sendo estes fluxos a base para análise da eficiência hidráulica e energética dos sistemas.

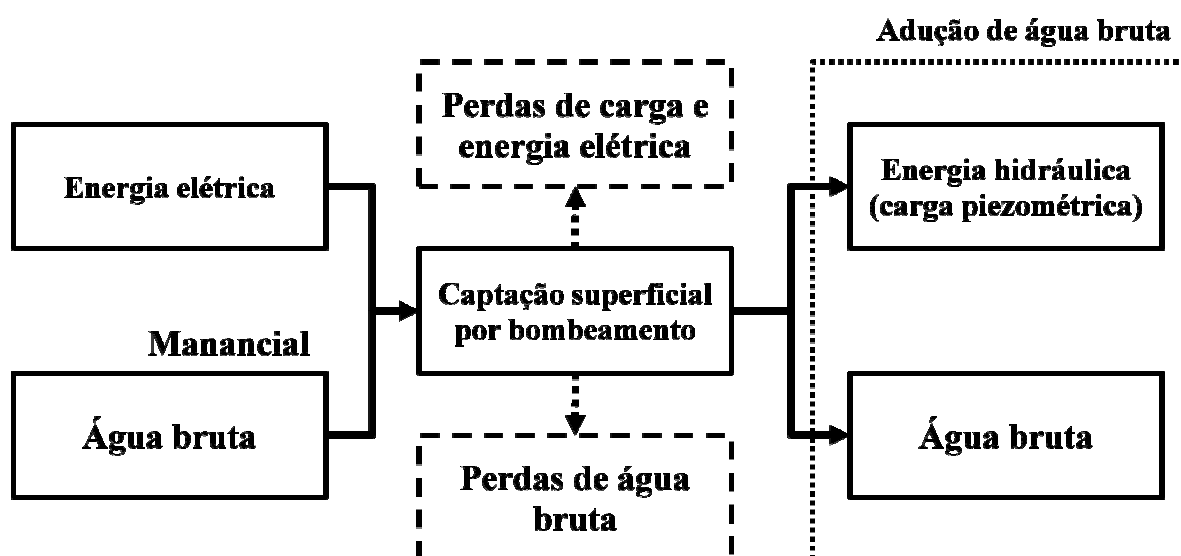


Figura 80 – Fluxos hidráulicos e energéticos em captações superficiais por bombeamento

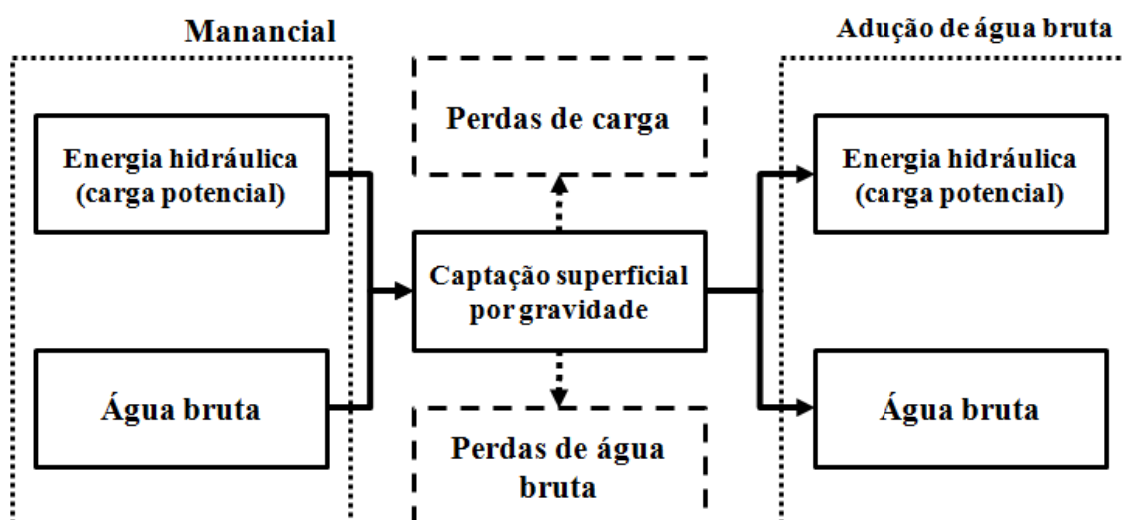


Figura 81 – Fluxos hidráulicos e energéticos em captações superficiais por gravidade

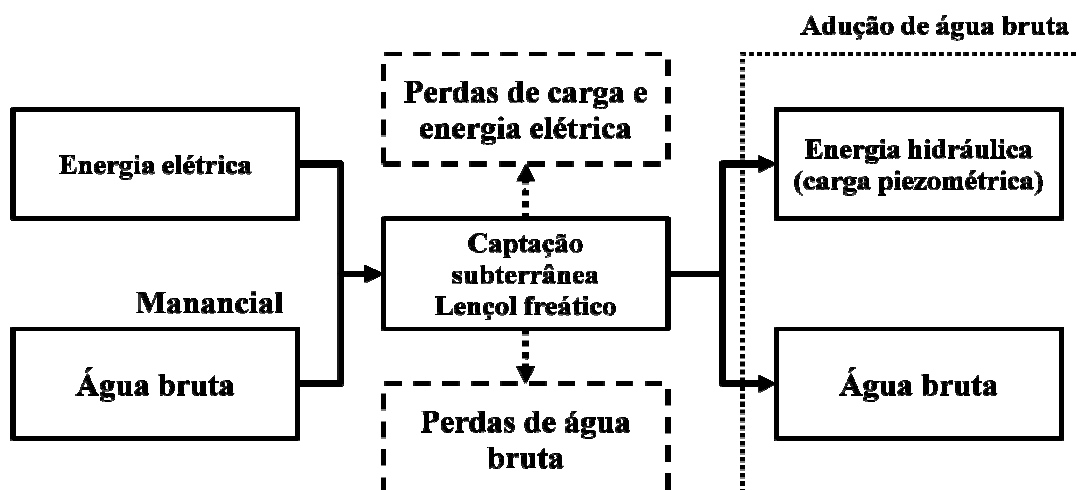


Figura 82 – Fluxos hidráulicos e energéticos em captações subterrâneas em lençóis freáticos

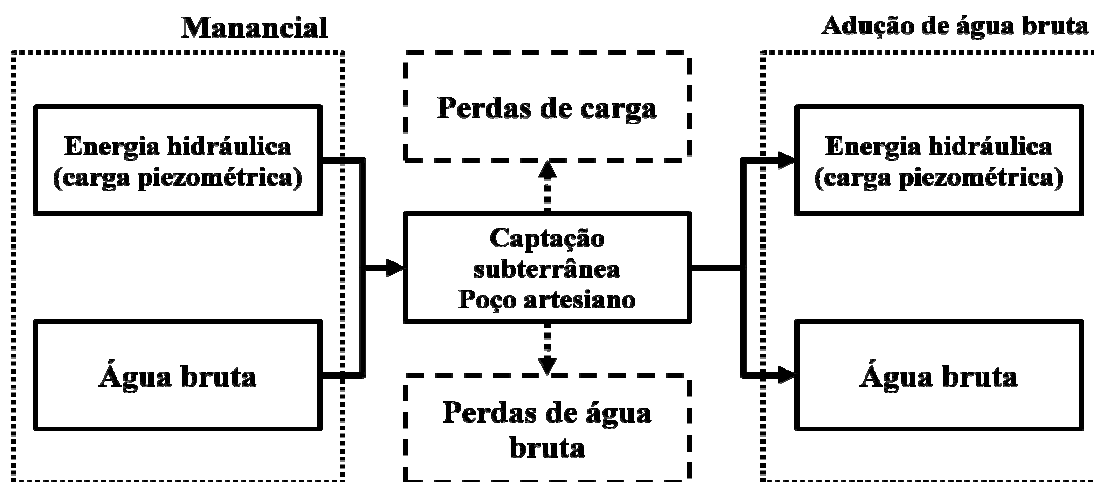


Figura 83 – Fluxos hidráulicos e energéticos em captações subterrâneas em poços artesianos

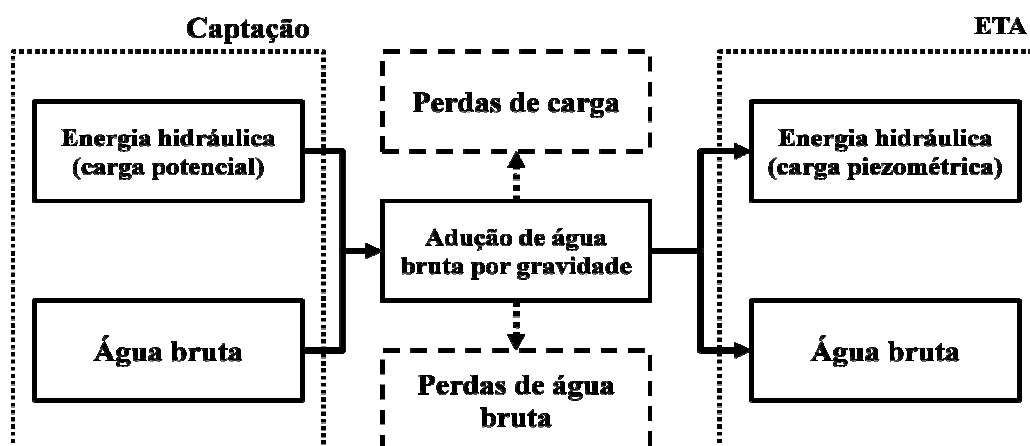


Figura 84 – Fluxos hidráulicos e energéticos em aduções de água bruta por gravidade

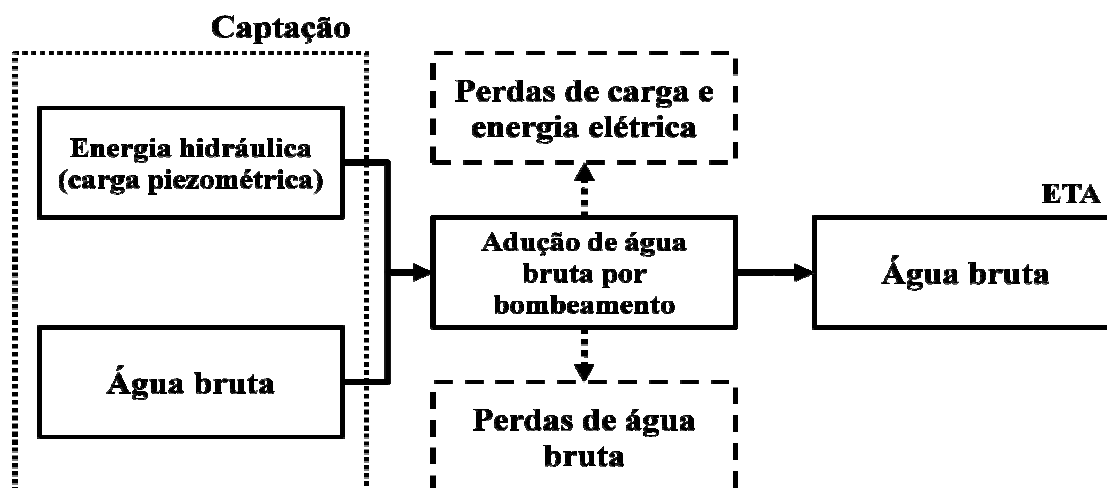


Figura 85 – Fluxos hidráulicos e energéticos em aduções de água bruta por bombeamento

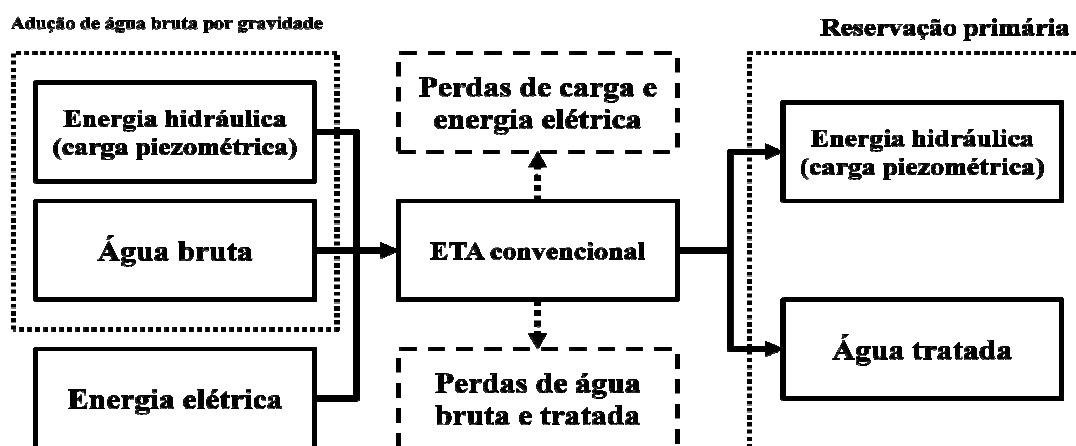


Figura 86 – Fluxos hidráulicos e energéticos em ETAs convencionais, com adução de água bruta por gravidade

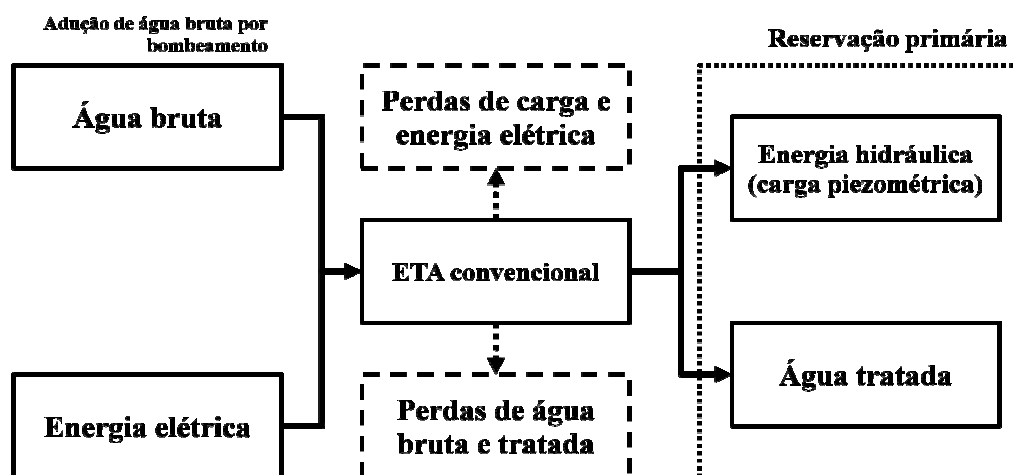


Figura 87 – Fluxos hidráulicos e energéticos em ETAs convencionais, com adução de água bruta por bombeamento

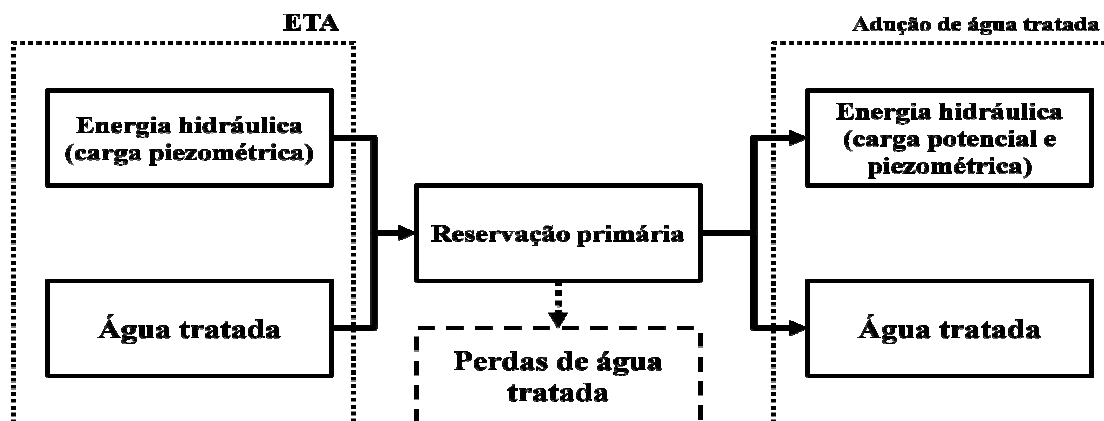


Figura 88 – Fluxos hidráulicos e energéticos na reservação primária

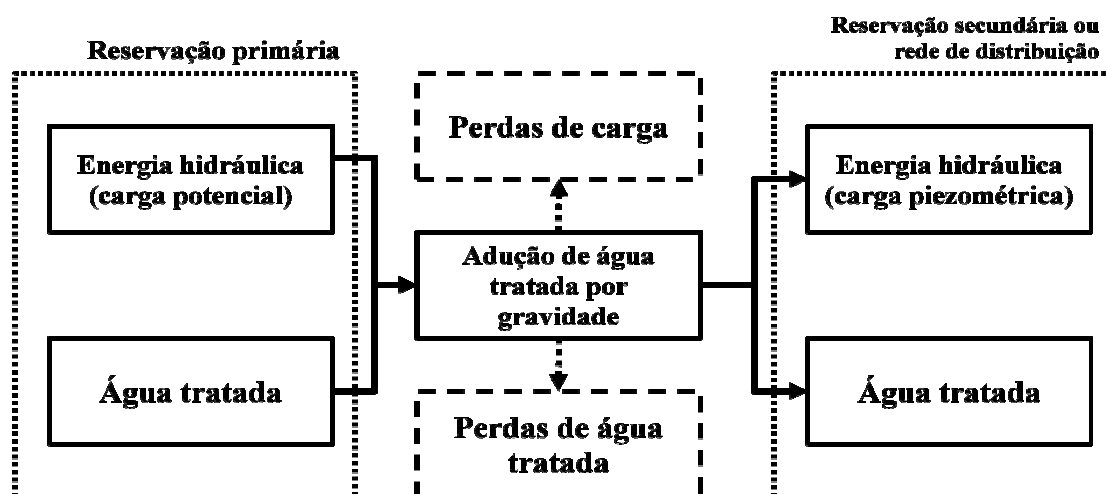


Figura 89 – Fluxos hidráulicos e energéticos na adução de água tratada por gravidade

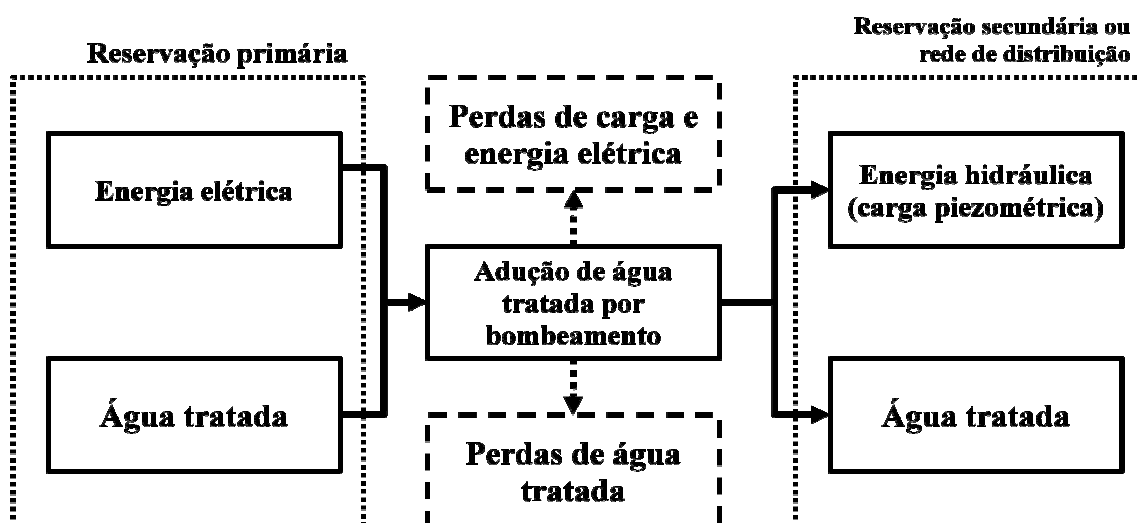


Figura 90 – Fluxos hidráulicos e energéticos na adução de água tratada por bombeamento

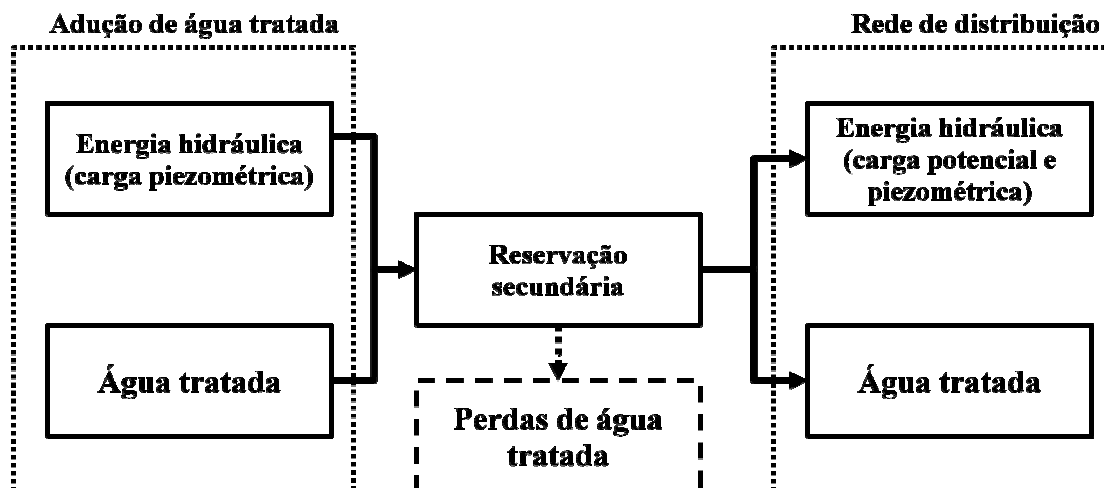


Figura 91 – Fluxos hidráulicos e energéticos na adução da reserva secundária

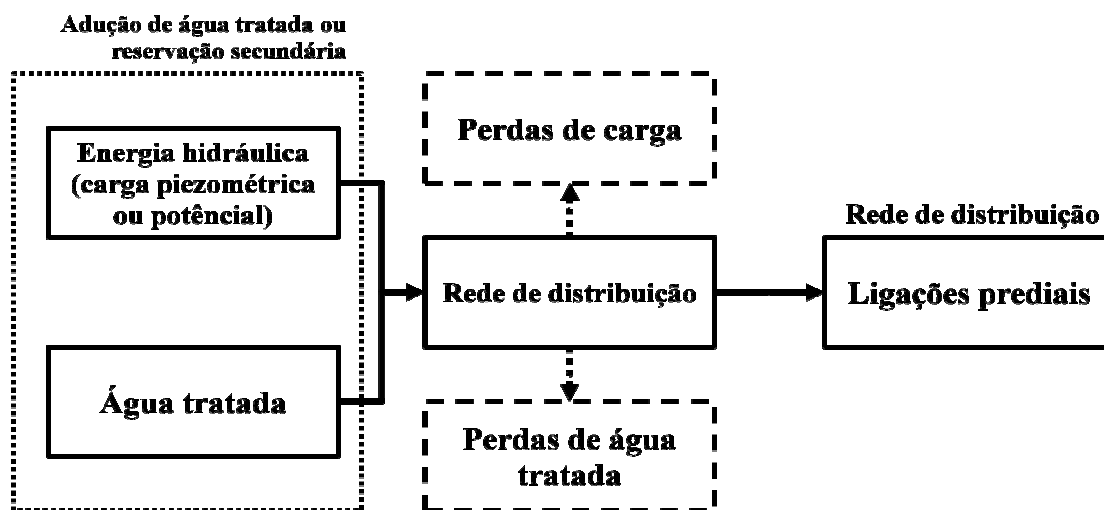


Figura 92 – Fluxos hidráulicos e energéticos na rede de distribuição de água

APÊNDICE B – CÁLCULO DA CURVA DO SISTEMA DE ALTO RECALQUE DA COPASA/ITAJUBÁ

As tabelas 38 e 39 apresentam o modelo para cálculo da altura de elevação do sistema, com base na equação universal das perdas de carga. O modelo foi implementado em Excel, o que permitiu obter os diversos pontos da curva do sistema pela simples alteração do campo “Vazão bombeada”. Os fatores de atrito mantiveram-se praticamente constantes na faixa de vazões analisadas. São apresentadas as tabelas para vazão nula e $0,05\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. As vazões foram variadas com incremento de $0,05\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ para obtenção dos pontos da curva do sistema. As tabelas para as demais vazões simuladas não são apresentadas uma vez que são análogas, com valores alterados automaticamente na planilha através da variação da vazão.

Tabela 38 – Cálculo da altura de elevação do sistema, para vazão nula

ALTURA TOTAL DE ELEVAÇÃO [m]						80,39	
Vazão bombeada [m³.s⁻¹]						0,00	
Vazão bombeada [l.s⁻¹]						0	
NA sucção [m]						839,31	
NA recalque [m]						919,70	
H _G [m]						80,39	
PERDAS DE CARGA LOCALIZADAS - Valores de K conforme Araújo et al. (1998), página 122							
Singularidade	Quantidade	K	Diâmetro nominal [mm]	Vazão [m³.s⁻¹]	Área molhada [m²]	Velocidade [m.s⁻¹]	H _P [m]
Crivo	1	0,75	250	0	0,0491	0,00	0,00
Ampliação gradual (250 x 300 mm)	1	0,30	250	0	0,0491	0,00	0,00
Válvula de retenção	1	2,50	300	0	0,0707	0,00	0,00

Tabela 38 – Cálculo da altura de elevação do sistema, para vazão nula (continuação)

Singularidade	Quantidade	K	Diâmetro nominal [mm]	Vazão [m ³ .s ⁻¹]	Área molhada [m ²]	Velocidade [m.s ⁻¹]	H _P [m]
Registro de gaveta aberto	1	0,20	300	0	0,0707	0,00	0,00
Curva 45°	1	0,20	300	0	0,0707	0,00	0,00
Junção	1	0,40	300	0	0,0707	0,00	0,00
Junção	2	0,40	400	0,00	0,1257	0,00	0,00
Tê de passagem direta	1	0,60	400	0,00	0,1257	0,00	0,00
Tê de saída de lado	1	1,30	350	0	0,0962	0,00	0,00
Registro de gaveta aberto	4	0,20	350	0	0,0962	0,00	0,00
Curva 45°	3	0,20	350	0	0,0962	0,00	0,00
Tê passagem direta	8	0,60	350	0	0,0962	0,00	0,00
Curva 90°	3	0,40	350	0	0,0962	0,00	0,00
Curva 22°	10	0,10	350	0	0,0962	0,00	0,00
Junção	1	0,40	350	0	0,0962	0,00	0,00
Curva 90°	1	0,40	500	0,00	0,1963	0,00	0,00
Curva 45°	2	0,20	500	0,00	0,1963	0,00	0,00
Saída da tubulação	1	1,00	500	0,00	0,1963	0,00	0,00
Perdas de carga localizadas [m]							0,00
PERDAS DE CARGA DISTRIBUÍDAS - TUBULAÇÃO DE SUÇÃO							
			Diâmetro tubulação [mm]	250			
			Diâmetro tubulação [m]	0,25			
			Comprimento da tubulação [m]	5,2			
			Área molhada [m ²]	0,049			

Tabela 38 – Cálculo da altura de elevação do sistema, para vazão nula (continuação)

Vazão [m ³ .s ⁻¹]	0
Velocidade [m/s]	0,0
Viscosidade cinemática da água a 25°C [m ² .s ⁻¹]	0,000000896
Re [1]	0,00E+00
Rugosidade, tubo de ferro fundido revestido velho [m]	0,0021
Rugosidade relativa [1]	0,0084
f [1]	0,036
Perda de carga distribuída na sucção [m]	0,00
PERDAS DE CARGA DISTRIBUÍDAS - TUBULAÇÃO DE RECALQUE	
Diâmetro tubulação [mm]	350
Diâmetro tubulação [m]	0,35
Comprimento da tubulação [m]	3.763,0
Área molhada [m ²]	0,096
Vazão [m ³ .s ⁻¹]	0
Velocidade [m/s]	0,0
Viscosidade cinemática da água a 25°C [m ² .s ⁻¹]	0,000000896
Re [1]	0,00E+00
Rugosidade, tubo de ferro fundido revestido velho [m]	0,0021
Rugosidade relativa [1]	0,0060
f [1]	0,034
Perda de carga distribuída no recalque [m]	0,00

Tabela 39 – Cálculo da altura de elevação do sistema, para vazão $0,05 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

ALTURA TOTAL DE ELEVAÇÃO [m]					81,67		
Vazão bombeada [m³.s⁻¹]					0,05		
Vazão bombeada [L.s⁻¹]					50		
NA sucção [m]					839,31		
NA recalque [m]					919,70		
H _G [m]					80,39		
PERDAS DE CARGA LOCALIZADAS - Valores de K conforme Araújo et al. (1998), página 122							
Singularidade	Quantidade	K	Diâmetro nominal [mm]	Vazão [m³.s⁻¹]	Área molhada [m²]	Velocidade [m.s⁻¹]	H _P [m]
Crivo	1	0,75	250	0,025	0,0491	0,51	0,01
Ampliação gradual (250 x 300 mm)	1	0,30	250	0,025	0,0491	0,51	0,00
Válvula de retenção	1	2,50	300	0,025	0,0707	0,35	0,02
Registro de gaveta aberto	1	0,20	300	0,025	0,0707	0,35	0,00
Curva 45°	1	0,20	300	0,025	0,0707	0,35	0,00
Junção	1	0,40	300	0,025	0,0707	0,35	0,00
Junção	2	0,40	400	0,05	0,1257	0,40	0,01
Tê de passagem direta	1	0,60	400	0,05	0,1257	0,40	0,00
Tê de saída de lado	1	1,30	350	0,025	0,0962	0,26	0,00
Registro de gaveta aberto	4	0,20	350	0,025	0,0962	0,26	0,00
Curva 45°	3	0,20	350	0,025	0,0962	0,26	0,00
Tê passagem direta	8	0,60	350	0,025	0,0962	0,26	0,02
Curva 90°	3	0,40	350	0,025	0,0962	0,26	0,00
Curva 22°	10	0,10	350	0,025	0,0962	0,26	0,00
Junção	1	0,40	350	0,025	0,0962	0,26	0,00
Curva 90°	1	0,40	500	0,05	0,1963	0,25	0,00
Curva 45°	2	0,20	500	0,05	0,1963	0,25	0,00
Saída da tubulação	1	1,00	500	0,05	0,1963	0,25	0,00
Perdas de carga localizadas [m]						0,09	

Tabela 39 – Cálculo da altura de elevação do sistema, para vazão $0,05 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (continuação)

PERDAS DE CARGA DISTRIBUÍDAS - TUBULAÇÃO DE SUÇÃO	
Diâmetro tubulação [mm]	250
Diâmetro tubulação [m]	0,25
Comprimento da tubulação [m]	5,2
Área molhada [m^2]	0,049
Vazão [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	0,025
Velocidade [m/s]	0,5
Viscosidade cinemática da água a 25°C [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]	0,000000896
Re [1]	2,27E+06
Rugosidade, tubo de ferro fundido revestido velho [m]	0,0021
Rugosidade relativa [1]	0,0084
f [1]	0,036
Perda de carga distribuída na sucção [m]	0,01
PERDAS DE CARGA DISTRIBUÍDAS - TUBULAÇÃO DE RECALQUE	
Diâmetro tubulação [mm]	350
Diâmetro tubulação [m]	0,35
Comprimento da tubulação [m]	3.763,0
Área molhada [m^2]	0,096
Vazão [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	0,025
Velocidade [m/s]	0,3
Viscosidade cinemática da água a 25°C [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]	0,000000896
Re [1]	8,29E+05
Rugosidade, tubo de ferro fundido revestido velho [m]	0,0021
Rugosidade relativa [1]	0,0060
f [1]	0,034
Perda de carga distribuída no recalque [m]	1,18

APÊNDICE C – CÁLCULO DA QUEDA LÍQUIDA DA CAPTAÇÃO DE ÁGUA BRUTA DA SERRA DOS TOLEDOS DA COPASA/ITAJUBÁ

A tabela 40 seção apresenta o modelo para cálculo da queda líquida da captação da Serra dos Toledos, com base na equação universal das perdas de carga. O modelo foi implementado em Excel, o que permitiu obter os diversos pontos da curva de queda líquida através da variação do campo “Vazão turbinada”. Os fatores de atrito mantiveram-se praticamente constantes na faixa de vazões analisadas. É apresentada a tabela para São apresentadas as tabelas para vazão média do sistema de $0,07\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. As vazões foram variadas com incremento de $0,01\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ para obtenção dos pontos da curva do sistema. As tabelas para as demais vazões simuladas não são apresentadas uma vez que são análogas, com valores alterados automaticamente na planilha através da variação da vazão.

Tabela 40 – Cálculo da queda líquida da captação da Serra dos Toledos, para vazão $0,07\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$

H _L [m]		113,21					
Vazão turbinada [m ³ .s ⁻¹]		0,070					
Vazão turbinada [l.s ⁻¹]		70,00					
NA jusante [m]		920,64					
NA montante [m]		1143,00					
H _B [m]		222,36					
PERDAS DE CARGA LOCALIZADAS - Valores de K conforme Araújo et al. (1998), página 122							
Singularidade	Quantidade	K	Diâmetro nominal [mm]	Vazão [m ³ .s ⁻¹]	Área molhada [m ²]	Velocidade [m.s ⁻¹]	Hp [m]
Entrada de tubulação	1	1	300	0,07	0,0707	0,99	0,05
Redução gradual (300 x 250 mm)	1	0,15	250	0,07	0,0491	1,43	0,02
Tê de passagem direta	28	0,60	250	0,07	0,0491	1,43	1,74
Registro de gaveta aberto	2	0,20	250	0,07	0,0491	1,43	0,04

Tabela 40 – Cálculo da queda líquida da captação da Serra dos Toledos, para vazão 0,07 m³.s⁻¹ (continuação)

Singularidade	Quantidade	K	Diâmetro nominal [mm]	Vazão [m³.s⁻¹]	Área molhada [m²]	Velocidade [m.s⁻¹]	Hp [m]
Curva 45°	1	0,20	300	0,07	0,0707	0,99	0,01
	2	0,60	300	0,07	0,0707	0,99	0,06
Curva 22°	8	0,10	250	0,07	0,0491	1,43	0,08
Curva 22°	2	0,10	300	0,07	0,0707	0,99	0,01
Curva 90°	3	0,40	250	0,07	0,0491	1,43	0,12
Perdas de carga localizadas [m]							2,09
PERDAS DE CARGA DISTRIBUÍDAS - TRECHO 1							
Diâmetro tubulação [mm]							250
Diâmetro tubulação [m]							0,25
Comprimento da tubulação [m]							6678
Área molhada [m²]							0,049
Vazão [m³.s⁻¹]							0,070
Velocidade [m.s⁻¹]							1,4
Viscosidade cinemática da água a 25°C [m².s⁻¹]							0,000000896
Re [1]							6,37E+06
Rugosidade, tubo de aço soldado velho [m]							0,0024
Rugosidade relativa [1]							0,0096
f [1]							0,037
Perda de carga distribuída na sucção [m]							102,45
PERDAS DE CARGA DISTRIBUÍDAS - TRECHO 2							
Diâmetro tubulação [mm]							300
Diâmetro tubulação [m]							0,3
Comprimento da tubulação [m]							750
Área molhada [m²]							0,071
Vazão [m³.s⁻¹]							0,07

Tabela 40 – Cálculo da queda líquida da captação da Serra dos Toledos, para vazão $0,07 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (continuação)

Velocidade [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]		1,0
Viscosidade cinemática da água a 25°C [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]		0,000000896
Re [1]		3,68E+06
Rugosidade, tubo de aço soldado velho [m]		0,0024
Rugosidade relativa [1]		0,008
f [1]		0,037
Perda de carga distribuída na sucção [m]		4,62

APÊNDICE D – MODELAGEM HIDRÁULICA DE REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA PARA OBTENÇÃO DO INDICADOR DE CARGA HIDRÁULICA DISPONIBILIZADA

A rede considerada como estudo de caso na pesquisa corresponde ao Setor Aclimação do SAAE Passos/MG, no qual são abastecidas 672 unidades consumidoras, que pode ser visualizado na Figura 93. O setor é alimentado por uma única adutora, a partir de um reservatório primário localizado na ETA do sistema. Sua escolha se deu em função da sua isolabilidade em relação a outros setores da rede, e também pela relativa facilidade em se medirem os parâmetros de calibração (vazão e pressões).



Figura 93 – Visão geral do setor Aclimação (fonte: Google Earth)

Na Figura 94, é apresentada a localização do setor Aclimação em relação à ETA e à captação do SAAE Passos. A modelagem da rede teve início com a obtenção da base de dados cadastrais do setor, na qual foram obtidos parâmetros físicos – localização, diâmetro, comprimento e material de tubulações, localização e cotas topográficas de nós, localização e consumos mensais (de janeiro e fevereiro de 2010) em cada unidade consumidora. Nesse sentido, o SAAE Passos se mostrou alinhado com as tendências de modernização do setor de saneamento, tendo em vista que toda sua base cadastral encontra-se estruturada em sistema de

informações geográficas, no caso, o sistema GeoMedia⁵³, cuja interface pode ser apreciada nas Figuras 95 a 97.

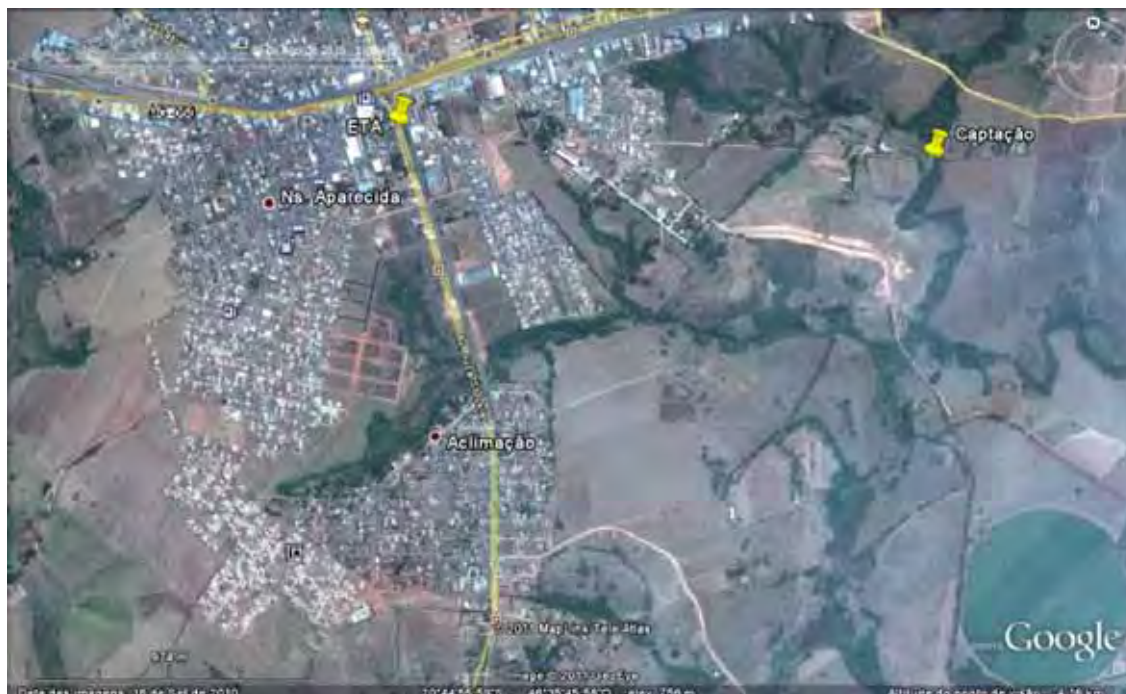


Figura 94 – Localização dos setor Aclimação em relação à ETA e captação (fonte: Google Earth)

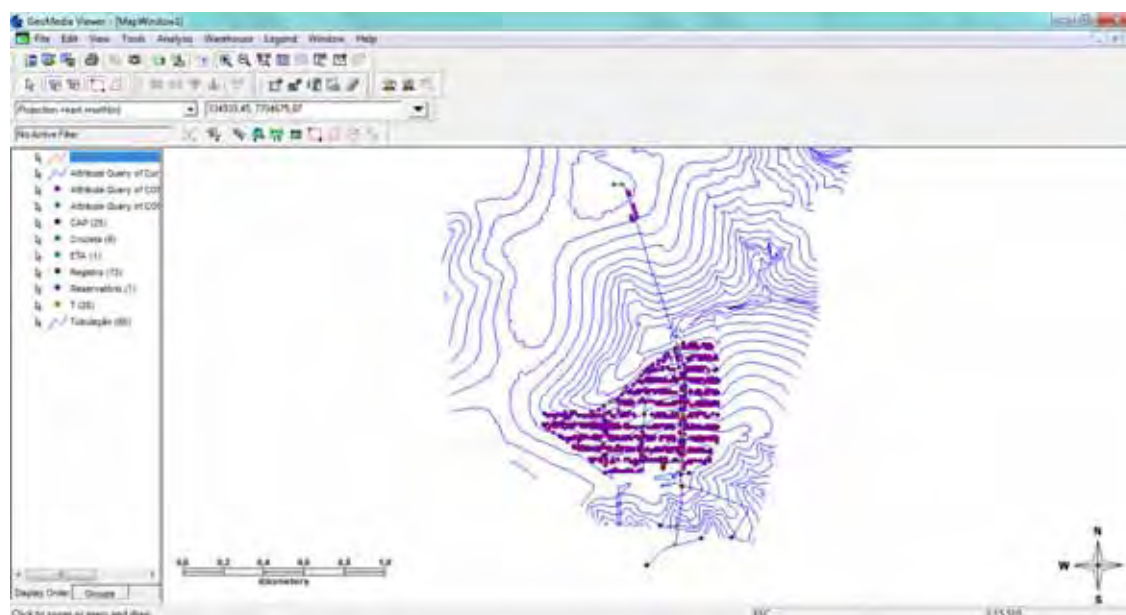


Figura 95 – Setor aclimação ativo na interface GeoMedia

⁵³ <http://www.intergraph.com/>

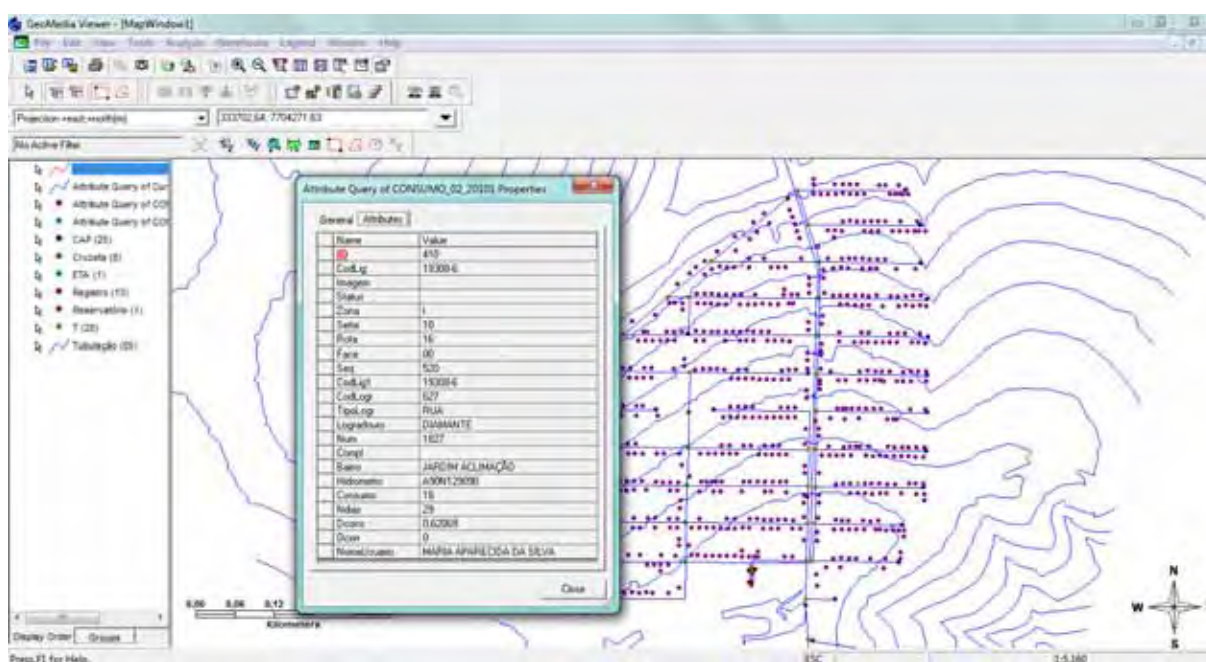


Figura 96 – Exemplo de consulta a atributos de consumo

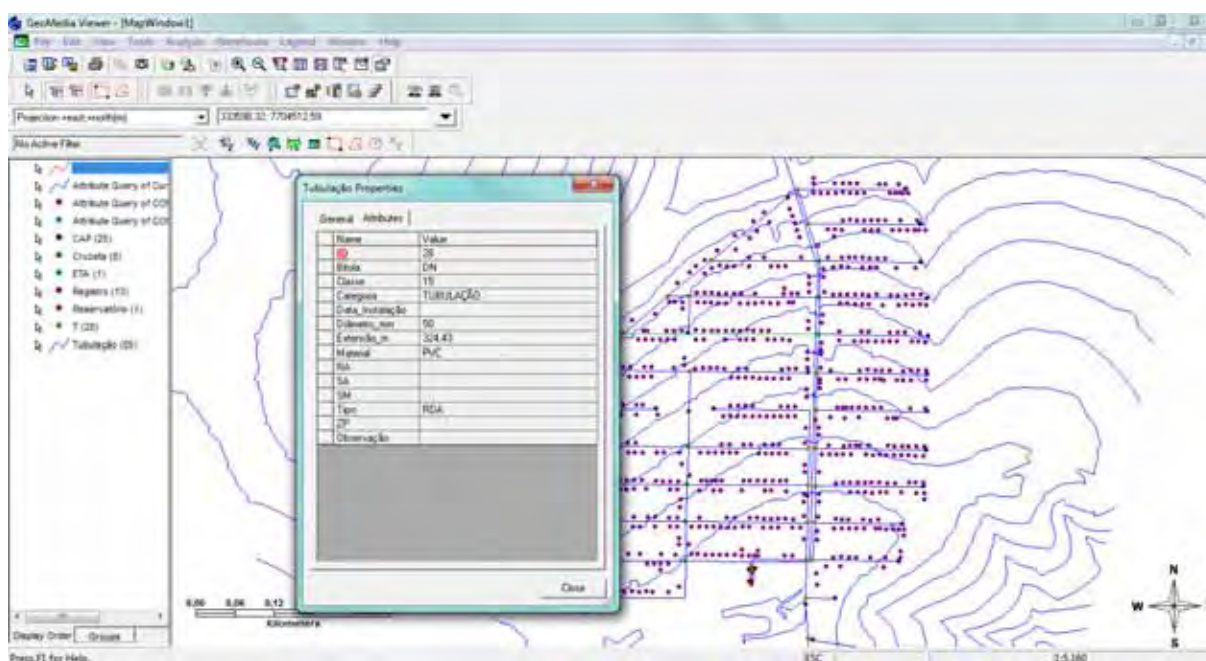


Figura 97 – Exemplo de consulta a atributos físicos de tubulações

As características físicas das tubulações da rede são apresentadas na Tabela 41.

Tabela 41 – Características físicas das tubulações do setor Aclimação

ID	Bitola	Classe	Diâmetro [mm]	Extensão [m]	Material	Tipo
1	DN	15	50	62,45	PVC	RDA
2	DN	15	50	272,96	PVC	RDA
3	DN	15	50	269,66	PVC	RDA
4	DN	15	50	67,86	PVC	RDA
5	DN	15	50	54,24	PVC	RDA
6	DN	15	50	144,72	PVC	RDA
7	DN	15	50	184,73	PVC	RDA
8	DN	15	50	182,27	PVC	RDA
9	DN	15	50	181,40	PVC	RDA
10	DN	15	50	178,86	PVC	RDA
11	DN	15	50	168,48	PVC	RDA
12	DN	15	50	185,74	PVC	RDA
13	DN	15	50	92,65	PVC	RDA
14	DN	15	50	182,04	PVC	RDA
15	DN	15	50	96,82	PVC	RDA
16	DN	15	50	93,50	PVC	RDA
17	DN	15	50	183,10	PVC	RDA
18	DN	15	50	179,51	PVC	RDA
19	DN	15	50	143,85	PVC	RDA
20	DN	15	50	536,93	PVC	RDA
21	DN	15	50	62,30	PVC	RDA
22	DN	15	50	61,47	PVC	RDA
23	DN	15	50	61,80	PVC	RDA
24	DN	15	50	63,47	PVC	RDA
25	DN	15	50	61,63	PVC	RDA
26	DN	15	50	60,37	PVC	RDA
27	DN	15	50	64,42	PVC	RDA
28	DN	15	50	324,43	PVC	RDA
29	DN	15	50	196,11	PVC	RDA
30	DN	15	50	179,70	PVC	RDA
31	DN	15	100	5,94	PVC	AAT
32	DN	15	100	1,98	PVC	RDA
33	DN	15	100	18,99	PVC	RDA
34	DN	15	100	8,44	PVC	RDA
35	DN	20	100	7,99	PVC	AAT
36	DN	15	50	66,29	PVC	RDA
37	DN	15	50	59,61	PVC	RDA
38	DN	15	50	263,76	PVC	RDA
39	DN	15	75	62,38	PVC	RDA
40	DN	15	50	65,87	PVC	RDA
41	DN	15	50	202,28	PVC	RDA
42	DN	15	50	61,49	PVC	RDA
43	DN	15	50	201,62	PVC	RDA
44	DN	15	50	444,25	PVC	RDA
45	DN	15	50	63,04	PVC	RDA
46	DN	15	50	36,12	PVC	RDA
47	DN	15	50	215,93	PVC	RDA
48	DN	15	50	60,98	PVC	RDA
49	DN	15	50	179,07	PVC	RDA
50	DN	15	50	60,12	PVC	RDA

Tabela 41 – Características físicas das tubulações do setor Aclimação (continuação)

ID	Bitola	Classe	Diâmetro [mm]	Extensão [m]	Material	Tipo
51	DN	15	50	96,91	PVC	RDA
52	DN	15	50	101,45	PVC	RDA
53	DN	15	50	142,56	PVC	RDA
54	DN	15	50	191,11	PVC	RDA
55	DN	15	75	58,19	PVC	RDA
56	DN	15	50	217,33	PVC	RDA
57	DN	20	100	1446,38	PVC	AAT
58	DN	20	100	45,90	PVC	AAT
59	DN	15	50	40,05	PVC	RDA
60	DN	15	50	61,11	PVC	RDA
61	DN	15	50	200,20	PVC	RDA
62	DN	15	50	222,48	PVC	RDA
63	DN	15	50	62,11	PVC	RDA
64	DN	15	50	48,14	PVC	RDA
65	DN	15	50	15,61	PVC	RDA
66	DN	20	100	23,04	PVC	AAT
67	DN	15	100	4,98	PVC	RDA
68	DN	15	100	3,25	PVC	AAT
69	DN	15	100	8,61	PVC	AAT
70	DN	15	50	19,10	PVC	RDA
71	DN	15	50	36,43	PVC	RDA
72	DN	15	50	5,53	PVC	RDA
73	DN	15	50	149,91	PVC	RDA
74	DN	15	50	52,99	PVC	RDA
75	DN	15	50	368,81	PVC	RDA
76						
77	DN	15	75	109,11	PVC	RDA
78	DN	15	75	62,09	PVC	RDA
79	DN	15	75	9,74	PVC	RDA
80	DN	15	75	63,91	PVC	RDA
81	DN	15	75	10,09	PVC	RDA
82	DE	15	20	48,09	PVC	RDA
83	DN	15	50	8,04	PVC	RDA
84	DN	15	50	551,76	PVC	RDA
85	DN	15	50	25,23	PVC	RDA
86	DN	15	50	165,32	PVC	RDA
87	DN	20	100	197,00	PVC	AAT
88	DN	20	100	7,80	PVC	AAT
89 (CALIBRAÇÃO)	DN	15	75	55,00	PVC	RDA

A base de dados foi então tabulada, relacionando cada trecho (tubulação) da rede às suas respectivas economias e consumos, o que permitiu determinar o consumo total mensal de cada trecho e, posteriormente, seu consumo médio diário. Foi feita, então, uma ponderação dos consumos diários de cada trecho, de forma a se determinar a participação média de cada um no consumo total do setor, visando à definição de padrões de consumo na rede. Tais informações são apresentadas nas Tabelas 42 e 43.

Tabela 42 – Consumos do setor Aclimação, janeiro 2010

ID	TOTAL JAN/2010 [m ³]	MÉDIA DIÁRIA [l]	PONDERAÇÃO
1	27	900,0	0,24%
2	258	8.600,0	2,33%
3	317	10.566,7	2,86%
4	27	900,0	0,24%
5	54	1.800,0	0,49%
6	204	6.800,0	1,84%
7	199	6.633,3	1,79%
8	275	9.166,7	2,48%
9	227	7.566,7	2,05%
10	353	11.766,7	3,18%
11	336	11.200,0	3,03%
12	258	8.600,0	2,33%
13	34	1.133,3	0,31%
14	176	5.866,7	1,59%
15	32	1.066,7	0,29%
16	73	2.433,3	0,66%
17	284	9.466,7	2,56%
18	282	9.400,0	2,54%
19	1021	34.033,3	9,21%
20	767	25.566,7	6,92%
21	35	1.166,7	0,32%
22	31	1.033,3	0,28%
23	81	2.700,0	0,73%
24	40	1.333,3	0,36%
25	7	233,3	0,06%
26	69	2.300,0	0,62%
27	13	433,3	0,12%
28	322	10.733,3	2,90%
29	315	10.500,0	2,84%
30	135	4.500,0	1,22%
31	0	-	0,00%
32	0	-	0,00%
33	0	-	0,00%
34	0	-	0,00%
35	0	-	0,00%
36	0	-	0,00%
37	0	-	0,00%
38	208	6.933,3	1,88%
39	109	3.633,3	0,98%
40	23	766,7	0,21%
41	253	8.433,3	2,28%
42	23	766,7	0,21%
43	245	8.166,7	2,21%
44	756	25.200,0	6,82%
45	31	1.033,3	0,28%
46	52	1.733,3	0,47%
47	292	9.733,3	2,63%
48	8	266,7	0,07%
49	285	9.500,0	2,57%
50	0	-	0,00%
51	0	-	0,00%
52	0	-	0,00%
53	0	-	0,00%
54	0	-	0,00%
55	0	-	0,00%

Tabela 42 – Consumos do setor Aclimação, janeiro 2010 (continuação)

ID	TOTAL JAN/2010 [m ³]	MÉDIA DIÁRIA [l]	PONDERAÇÃO
56	0	-	0,00%
57	0	-	0,00%
58	0	-	0,00%
59	0	-	0,00%
60	25	833,3	0,23%
61	249	8.300,0	2,25%
62	262	8.733,3	2,36%
63	17	566,7	0,15%
64	47	1.566,7	0,42%
65	0	-	0,00%
66	0	-	0,00%
67	0	-	0,00%
68	0	-	0,00%
69	0	-	0,00%
70	0	-	0,00%
71	0	-	0,00%
72	0	-	0,00%
73	179	5.966,7	1,61%
74	15	500,0	0,14%
75	640	21.333,3	5,77%
76	0	-	0,00%
77	39	1.300,0	0,35%
78	17	566,7	0,15%
79	0	-	0,00%
80	603	20.100,0	5,44%
81	0	-	0,00%
82	0	-	0,00%
83	0	-	0,00%
84	0	-	0,00%
85	0	-	0,00%
86	99	3.300,0	0,89%
87	358	11.933,3	3,23%
88	0	-	0,00%
89 (CALIBRAÇÃO)			
TOTAL	11.087,00	369.566,7	100,0%

Tabela 43 – Consumos do setor Aclimação, fevereiro 2010

ID	TOTAL FEV/2010 [m ³]	MÉDIA DIÁRIA [l]	PONDERAÇÃO
1	28	933,33	0,25%
2	297	9.900,00	2,61%
3	265	8.833,33	2,33%
4	26	866,67	0,23%
5	51	1.700,00	0,45%
6	182	6.066,67	1,60%
7	196	6.533,33	1,72%
8	268	8.933,33	2,35%
9	230	7.666,67	2,02%
10	369	12.300,00	3,24%
11	293	9.766,67	2,57%
12	260	8.666,67	2,28%
13	33	1.100,00	0,29%
14	158	5.266,67	1,39%
15	38	1.266,67	0,33%

Tabela 43 – Consumos do setor Aclimação, fevereiro 2010 (continuação)

ID	TOTAL FEV/2010 [m ³]	MÉDIA DIÁRIA [l]	PONDERAÇÃO
16	58	1.933,33	0,51%
17	297	9.900,00	2,61%
18	296	9.866,67	2,60%
19	1057	35.233,33	9,28%
20	750	25.000,00	6,58%
21	37	1.233,33	0,32%
22	35	1.166,67	0,31%
23	63	2.100,00	0,55%
24	41	1.366,67	0,36%
25	0	-	0,00%
26	57	1.900,00	0,50%
27	15	500,00	0,13%
28	388	12.933,33	3,41%
29	293	9.766,67	2,57%
30	144	4.800,00	1,26%
31	0	-	0,00%
32	0	-	0,00%
33	0	-	0,00%
34	0	-	0,00%
35	0	-	0,00%
36	0	-	0,00%
37	0	-	0,00%
38	219	7.300,00	1,92%
39	111	3.700,00	0,97%
40	19	633,33	0,17%
41	283	9.433,33	2,48%
42	26	866,67	0,23%
43	256	8.533,33	2,25%
44	833	27.766,67	7,31%
45	40	1.333,33	0,35%
46	44	1.466,67	0,39%
47	325	10.833,33	2,85%
48	10	333,33	0,09%
49	283	9.433,33	2,48%
50	0	-	0,00%
51	0	-	0,00%
52	0	-	0,00%
53	0	-	0,00%
54	0	-	0,00%
55	0	-	0,00%
56	0	-	0,00%
57	0	-	0,00%
58	0	-	0,00%
59	0	-	0,00%
60	25	833,33	0,22%
61	241	8.033,33	2,12%
62	270	9.000,00	2,37%
63	13	433,33	0,11%
64	29	966,67	0,25%
65	0	-	0,00%
66	0	-	0,00%
67	0	-	0,00%
68	0	-	0,00%
69	0	-	0,00%
70	0	-	0,00%

Tabela 43 – Consumos do setor Aclimação, fevereiro 2010 (continuação)

ID	TOTAL FEV/2010 [m ³]	MÉDIA DIÁRIA [l]	PONDERAÇÃO
71	0	-	0,00%
72	0	-	0,00%
73	178	5.933,33	1,56%
74	14	466,67	0,12%
75	772	25.733,33	6,78%
76	0	-	0,00%
77	49	1.633,33	0,43%
78	22	733,33	0,19%
79	0	-	0,00%
80	644	21.466,67	5,65%
81	0	-	0,00%
82	0	-	0,00%
83	0	-	0,00%
84	0	-	0,00%
85	0	-	0,00%
86	99	3.300,00	0,87%
87	363	12.100,00	3,19%
88	0	-	0,00%
89 (CALIBRAÇÃO)			
TOTAL	11.393,00	379.766,67	100%

Relacionaram-se as ponderações de janeiro/2010 e fevereiro/2010, a partir das quais foi obtida uma média para cada trecho, assumida, então, como padrão médio de participação de cada trecho no consumo total da rede, conforme Tabela 44:

Tabela 44 – Participação média de cada trecho no consumo do setor Aclimação

ID	TOTAL JAN/2010	TOTAL FEV/2010	MÉDIA
1	0,24%	0,25%	0,24%
2	2,33%	2,61%	2,47%
3	2,86%	2,33%	2,59%
4	0,24%	0,23%	0,24%
5	0,49%	0,45%	0,47%
6	1,84%	1,60%	1,72%
7	1,79%	1,72%	1,76%
8	2,48%	2,35%	2,42%
9	2,05%	2,02%	2,03%
10	3,18%	3,24%	3,21%
11	3,03%	2,57%	2,80%
12	2,33%	2,28%	2,30%
13	0,31%	0,29%	0,30%
14	1,59%	1,39%	1,49%
15	0,29%	0,33%	0,31%
16	0,66%	0,51%	0,58%
17	2,56%	2,61%	2,58%
18	2,54%	2,60%	2,57%
19	9,21%	9,28%	9,24%
20	6,92%	6,58%	6,75%

Tabela 44 – Participação média de cada trecho no consumo do setor Aclimação (continuação)

ID	TOTAL JAN/2010	TOTAL FEV/2010	MÉDIA
21	0,32%	0,32%	0,32%
22	0,28%	0,31%	0,29%
23	0,73%	0,55%	0,64%
24	0,36%	0,36%	0,36%
25	0,06%	0,00%	0,03%
26	0,62%	0,50%	0,56%
27	0,12%	0,13%	0,12%
28	2,90%	3,41%	3,15%
29	2,84%	2,57%	2,71%
30	1,22%	1,26%	1,24%
31	0,00%	0,00%	0,00%
32	0,00%	0,00%	0,00%
33	0,00%	0,00%	0,00%
34	0,00%	0,00%	0,00%
35	0,00%	0,00%	0,00%
36	0,00%	0,00%	0,00%
37	0,00%	0,00%	0,00%
38	1,88%	1,92%	1,90%
39	0,98%	0,97%	0,98%
40	0,21%	0,17%	0,19%
41	2,28%	2,48%	2,38%
42	0,21%	0,23%	0,22%
43	2,21%	2,25%	2,23%
44	6,82%	7,31%	7,07%
45	0,28%	0,35%	0,32%
46	0,47%	0,39%	0,43%
47	2,63%	2,85%	2,74%
48	0,07%	0,09%	0,08%
49	2,57%	2,48%	2,53%
50	0,00%	0,00%	0,00%
51	0,00%	0,00%	0,00%
52	0,00%	0,00%	0,00%
53	0,00%	0,00%	0,00%
54	0,00%	0,00%	0,00%
55	0,00%	0,00%	0,00%
56	0,00%	0,00%	0,00%
57	0,00%	0,00%	0,00%
58	0,00%	0,00%	0,00%
59	0,00%	0,00%	0,00%
60	0,23%	0,22%	0,22%
61	2,25%	2,12%	2,18%
62	2,36%	2,37%	2,37%
63	0,15%	0,11%	0,13%
64	0,42%	0,25%	0,34%
65	0,00%	0,00%	0,00%
66	0,00%	0,00%	0,00%
67	0,00%	0,00%	0,00%
68	0,00%	0,00%	0,00%
69	0,00%	0,00%	0,00%
70	0,00%	0,00%	0,00%
71	0,00%	0,00%	0,00%
72	0,00%	0,00%	0,00%
73	1,61%	1,56%	1,59%
74	0,14%	0,12%	0,13%
75	5,77%	6,78%	6,27%

Tabela 44 – Participação média de cada trecho no consumo do setor Aclimação (continuação)

ID	TOTAL JAN/2010	TOTAL FEV/2010	MÉDIA
76	0,00%	0,00%	0,00%
77	0,35%	0,43%	0,39%
78	0,15%	0,19%	0,17%
79	0,00%	0,00%	0,00%
80	5,44%	5,65%	5,55%
81	0,00%	0,00%	0,00%
82	0,00%	0,00%	0,00%
83	0,00%	0,00%	0,00%
84	0,00%	0,00%	0,00%
85	0,00%	0,00%	0,00%
86	0,89%	0,87%	0,88%
87	3,23%	3,19%	3,21%
88	0,00%	0,00%	0,00%
89 (CALIBRAÇÃO)			
TOTAL			100%

Para definição dos padrões horários de consumo, variação de pressões em diversos pontos da rede e de nível do reservatório, foram realizadas medições na rede estudada. Esses dados foram utilizados, primeiramente, para calibração do modelo hidráulico e, posteriormente, para simulação da operação da rede. Tais parâmetros foram monitorados simultaneamente durante 24 horas, com intervalos de aquisição de 30 minutos.

A vazão fornecida à rede foi monitorada através de um medidor acústico por tempo de trânsito, instalado ao lado da ETA, na adutora principal que alimenta o setor. A instalação do equipamento pode ser visualizada na Figura 98.



Figura 98 – Instalação do medidor de vazão

As pressões na rede foram monitoradas em 4 conexões de consumidores, através de *dataloggers*, tendo o desnível das tomadas de pressão em relação à rede sido posteriormente

corrigidas. Os pontos de monitoramento, visualizados nas Figuras 99 e 100, foram selecionados de forma a se obter a melhor distribuição geográfica na área de estudo e também englobar as diferentes zonas de pressão da rede, tendo sido instalados nas cotas altas, médias e baixas da rede. Um dos *dataloggers* teve sua operação interrompida supostamente devido à manipulação por parte dos moradores da residência na qual foi instalado.



Figura 99 – Localização dos *dataloggers* de pressão



Figura 100 – *Dataloggers* de pressão 1 e 2

A medição da variação de nível do reservatório que abastece o setor foi realizada da mesma forma que as medições de pressão na rede, através da instalação de um *datalogger* na

sua base, com posterior correção de cotas topográficas. A Figura 101 apresenta o reservatório e seu respectivo *datalogger*:



Figura 101 – *Datalogger* e reservatório

A Figura 102 apresenta os resultados do monitoramento de vazão, pressão e nível de reservatório do setor Aclimação.

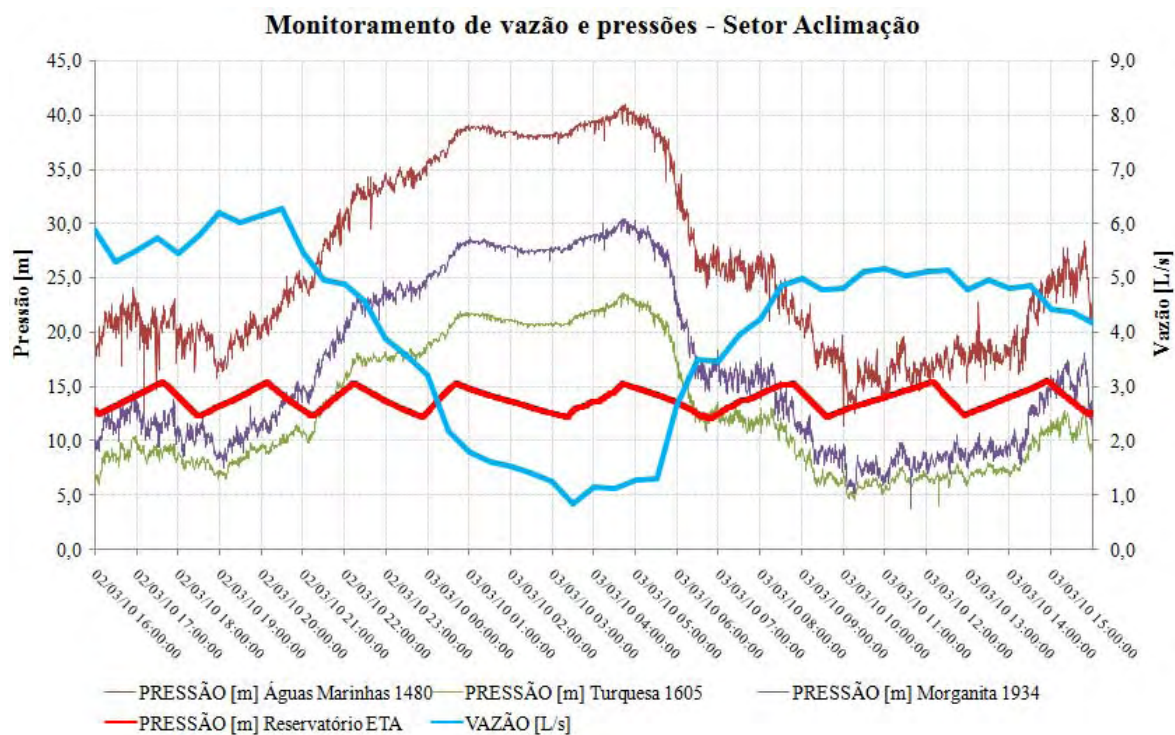


Figura 102 – Resultados do monitoramento de pressões, vazões e níveis

Para modelagem e simulação da rede é necessário definir os padrões temporais de consumo. Para tanto, utilizou-se o padrão obtido pelo monitoramento de vazões realizado durante 24 horas, considerado o valor médio do sistema. Assumiu-se, também, que o consumo se desenvolve de forma homogênea em todos os trechos da rede. No caso do modelo utilizado - EPANET – a variação temporal da vazão consumida nos nós é feita atribuindo-se fatores horários de consumo, sendo estes frações do consumo padrão do nó. O consumo padrão dos nós foi considerado como a sua própria vazão média. A Tabela 45 e Figura 103 apresentam os padrões de consumo obtidos para o setor Aclimação:

Tabela 45 – Padrões temporais de consumo de água no setor Aclimação

DATA HORA	VAZÃO [l/s]	VOLUME CONSUMIDO [l]	VOLUME CONSUMIDO ACUMULADO [l]	INTERVALO DE SIMULAÇÃO	VAZÃO MÉDIA [l/s]	PADRÃO DE CONSUMO
02/03/10 16:00:00	5,89	0	0	16:00 - 16:30	5,59	1,377
02/03/10 16:30:00	5,29	10062	10062	16:30 - 17:00	5,40	1,329
02/03/10 17:00:00	5,50	9711	19773	17:00 - 17:30	5,62	1,384
02/03/10 17:30:00	5,73	10107	29880	17:30 - 18:00	5,59	1,377
02/03/10 18:00:00	5,45	10062	39942	18:00 - 18:30	5,62	1,384
02/03/10 18:30:00	5,78	10107	50049	18:30 - 19:00	6,00	1,477
02/03/10 19:00:00	6,21	10791	60840	19:00 - 19:30	6,12	1,508
02/03/10 19:30:00	6,03	11016	71856	19:30 - 20:00	6,10	1,502
02/03/10 20:00:00	6,16	10971	82827	20:00 - 20:30	6,22	1,533
02/03/10 20:30:00	6,28	11196	94023	20:30 - 21:00	5,88	1,448
02/03/10 21:00:00	5,47	10575	104598	21:00 - 21:30	5,22	1,286
02/03/10 21:30:00	4,97	9396	113994	21:30 - 22:00	4,93	1,214
02/03/10 22:00:00	4,88	8865	122859	22:00 - 22:30	4,74	1,167
02/03/10 22:30:00	4,59	8523	131382	22:30 - 23:00	4,24	1,044
02/03/10 23:00:00	3,88	7623	139005	23:00 - 23:30	3,73	0,919
02/03/10 23:30:00	3,58	6714	145719	23:30 - 0:00	3,40	0,837
03/03/10 00:00:00	3,21	6111	151830	0:00 - 0:30	2,70	0,665
03/03/10 00:30:00	2,19	4860	156690	0:30 - 1:00	2,00	0,493
03/03/10 01:00:00	1,81	3600	160290	1:00 - 1:30	1,72	0,423

Tabela 45 – Padrões temporais de consumo de água no setor Aclimação (continuação)

DATA HORA	VAZÃO [l/s]	VOLUME CONSUMIDO [l]	VOLUME CONSUMIDO ACUMULADO [l]	INTERVALO DE SIMULAÇÃO	VAZÃO MÉDIA [l/s]	PADRÃO DE CONSUMO
03/03/10 01:30:00	1,62	3087	163377	1:30 - 2:00	1,59	0,391
03/03/10 02:00:00	1,55	2853	166230	2:00 - 2:30	1,49	0,366
03/03/10 02:30:00	1,42	2673	168903	2:30 - 3:00	1,34	0,330
03/03/10 03:00:00	1,26	2412	171315	3:00 - 3:30	1,06	0,261
03/03/10 03:30:00	0,86	1908	173223	3:30 - 4:00	1,02	0,250
03/03/10 04:00:00	1,17	1827	175050	4:00 - 4:30	1,16	0,285
03/03/10 04:30:00	1,14	2079	177129	4:30 - 5:00	1,21	0,298
03/03/10 05:00:00	1,28	2178	179307	5:00 - 5:30	1,29	0,318
03/03/10 05:30:00	1,30	2322	181629	5:30 - 6:00	1,98	0,488
03/03/10 06:00:00	2,66	3564	185193	6:00 - 6:30	3,08	0,759
03/03/10 06:30:00	3,50	5544	190737	6:30 - 7:00	3,49	0,860
03/03/10 07:00:00	3,48	6282	197019	7:00 - 7:30	3,73	0,918
03/03/10 07:30:00	3,97	6705	203724	7:30 - 8:00	4,11	1,013
03/03/10 08:00:00	4,25	7398	211122	8:00 - 8:30	4,56	1,124
03/03/10 08:30:00	4,87	8208	219330	8:30 - 9:00	4,93	1,214
03/03/10 09:00:00	4,98	8865	228195	9:00 - 9:30	4,88	1,202
03/03/10 09:30:00	4,78	8784	236979	9:30 - 10:00	4,80	1,183
03/03/10 10:00:00	4,82	8640	245619	10:00 - 10:30	4,97	1,225
03/03/10 10:30:00	5,12	8946	254565	10:30 - 11:00	5,15	1,269
03/03/10 11:00:00	5,18	9270	263835	11:00 - 11:30	5,12	1,260
03/03/10 11:30:00	5,05	9207	273042	11:30 - 12:00	5,09	1,253
03/03/10 12:00:00	5,12	9153	282195	12:00 - 12:30	5,13	1,264
03/03/10 12:30:00	5,14	9234	291429	12:30 - 13:00	4,97	1,223
03/03/10 13:00:00	4,79	8937	300366	13:00 - 13:30	4,88	1,201

Tabela 45 – Padrões temporais de consumo de água no setor Aclimação (continuação)

DATA HORA	VAZÃO [l/s]	VOLUME CONSUMIDO [l]	VOLUME CONSUMIDO ACUMULADO [l]	INTERVALO DE SIMULAÇÃO	VAZÃO MÉDIA [l/s]	PADRÃO DE CONSUMO
03/03/10 13:30:00	4,96	8775	309141	13:30 - 14:00	4,89	1,205
03/03/10 14:00:00	4,82	8802	317943	14:00 - 14:30	4,85	1,194
03/03/10 14:30:00	4,87	8721	326664	14:30 - 15:00	4,65	1,145
03/03/10 15:00:00	4,42	8361	335025	15:00 - 15:30	4,40	1,083
03/03/10 15:30:00	4,37	7911	342936	15:30 - 16:00	4,28	1,053
03/03/10 16:00:00	4,18	7695	350631			
MÉDIA			4,06		4,06	
SOMA		350631	350631			

Padrão de consumo em relação à vazão média diária
Discretização de 30 minutos

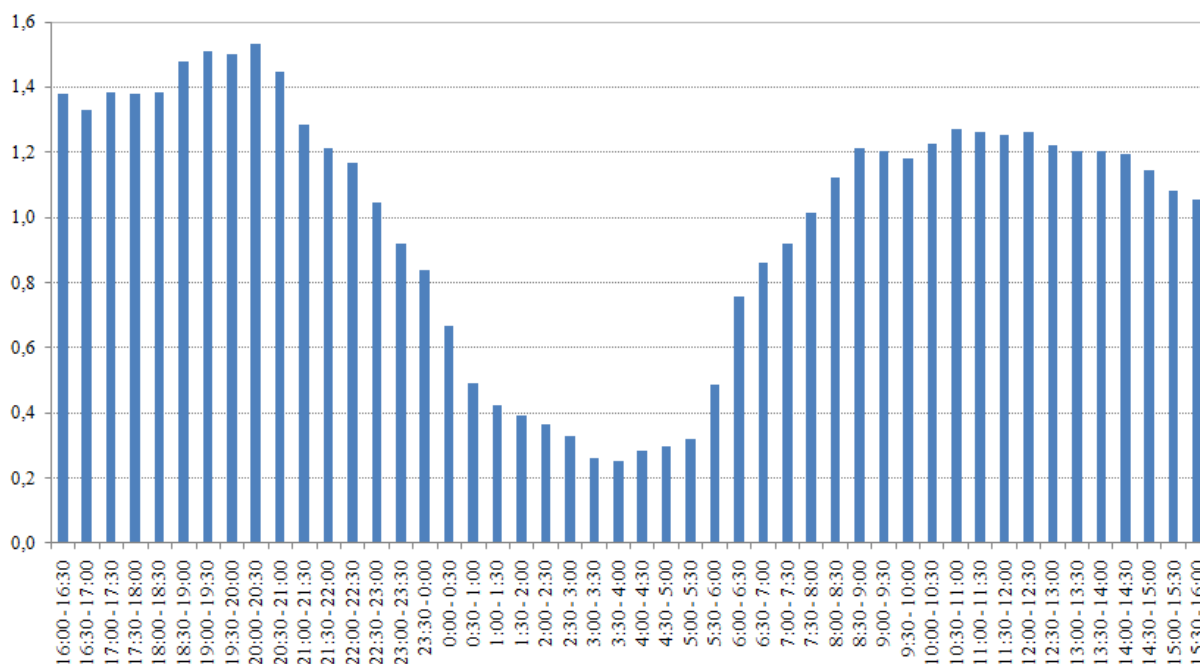


Figura 103 – Padrão diário de consumo do setor Aclimação

No modelo EPANET, a variação temporal do nível do reservatório é realizada de forma análoga à variação da vazão, atribuindo-se padrões horários de nível. Neste caso, os padrões de nível foram calculados a partir do nível mínimo do reservatório, ao invés da média, considerada no caso dos padrões de consumo (Tabela 46).

Tabela 46 – Padrões temporais de nível do reservatório de abastecimento do setor Aclimação

DATA HORA	PRESSÃO RESERV. [m]	COTA BASE RESERV. [m]	COTA DATALOG. [m]	NA [m]	INTERVALO DE SIMULAÇÃO	NÍVEL MÉDIO	PADRÃO DE NÍVEL
02/03/10 16:00:00	12,84	811,6	812,6	825,44	16:00 - 16:30	825,64	1,000884945
02/03/10 16:30:00	13,24	811,6	812,6	825,84	16:30 - 17:00	826,33	1,001715339
02/03/10 17:00:00	14,21	811,6	812,6	826,81	17:00 - 17:30	827,30	1,002897286
02/03/10 17:30:00	15,19	811,6	812,6	827,79	17:30 - 18:00	827,25	1,002830612
02/03/10 18:00:00	14,10	811,6	812,6	826,70	18:00 - 18:30	825,81	1,001084967
02/03/10 18:30:00	12,31	811,6	812,6	824,91	18:30 - 19:00	825,37	1,000557637
02/03/10 19:00:00	13,23	811,6	812,6	825,83	19:00 - 19:30	826,27	1,001642603
02/03/10 19:30:00	14,10	811,6	812,6	826,70	19:30 - 20:00	827,21	1,002788183
02/03/10 20:00:00	15,12	811,6	812,6	827,72	20:00 - 20:30	827,30	1,002897286
02/03/10 20:30:00	14,28	811,6	812,6	826,88	20:30 - 21:00	826,19	1,001545623
02/03/10 21:00:00	12,89	811,6	812,6	825,49	21:00 - 21:30	825,59	1,000824332
02/03/10 21:30:00	13,09	811,6	812,6	825,69	21:30 - 22:00	826,48	1,001903238
02/03/10 22:00:00	14,67	811,6	812,6	827,27	22:00 - 22:30	827,31	1,002909408
02/03/10 22:30:00	14,75	811,6	812,6	827,35	22:30 - 23:00	826,82	1,002315404
02/03/10 23:00:00	13,69	811,6	812,6	826,29	23:00 - 23:30	825,84	1,001127396
02/03/10 23:30:00	12,79	811,6	812,6	825,39	23:30 - 0:00	825,35	1,000533392
03/03/10 00:00:00	12,71	811,6	812,6	825,31	0:00 - 0:30	826,31	1,001691094
03/03/10 00:30:00	14,70	811,6	812,6	827,30	0:30 - 1:00	827,37	1,002976082
03/03/10 01:00:00	14,83	811,6	812,6	827,43	1:00 - 1:30	827,11	1,002666958
03/03/10 01:30:00	14,19	811,6	812,6	826,79	1:30 - 2:00	826,52	1,001951728
03/03/10 02:00:00	13,65	811,6	812,6	826,25	2:00 - 2:30	825,97	1,001284989
03/03/10 02:30:00	13,09	811,6	812,6	825,69	2:30 - 3:00	825,42	1,000612188
03/03/10 03:00:00	12,54	811,6	812,6	825,14	3:00 - 3:30	825,27	1,000436411
03/03/10 03:30:00	12,80	811,6	812,6	825,40	3:30 - 4:00	825,82	1,001103151
03/03/10 04:00:00	13,64	811,6	812,6	826,24	4:00 - 4:30	826,69	1,002151750
03/03/10 04:30:00	14,53	811,6	812,6	827,13	4:30 - 5:00	827,32	1,002915470
03/03/10 05:00:00	14,90	811,6	812,6	827,50	5:00 - 5:30	827,19	1,002757877
03/03/10 05:30:00	14,27	811,6	812,6	826,87	5:30 - 6:00	826,51	1,001939606
03/03/10 06:00:00	13,55	811,6	812,6	826,15	6:00 - 6:30	825,62	1,000860700
03/03/10 06:30:00	12,49	811,6	812,6	825,09	6:30 - 7:00	825,10	1,000224267
03/03/10 07:00:00	12,50	811,6	812,6	825,10	7:00 - 7:30	825,68	1,000927374
03/03/10 07:30:00	13,65	811,6	812,6	826,25	7:30 - 8:00	826,59	1,002036586
03/03/10 08:00:00	14,33	811,6	812,6	826,93	8:00 - 8:30	827,35	1,002951837
03/03/10 08:30:00	15,16	811,6	812,6	827,76	8:30 - 9:00	827,45	1,003073063
03/03/10 09:00:00	14,53	811,6	812,6	827,13	9:00 - 9:30	826,19	1,001545623
03/03/10 09:30:00	12,64	811,6	812,6	825,24	9:30 - 10:00	825,33	1,000509146

Tabela 46 – Padrões temporais de nível do reservatório de abastecimento do setor Aclimação (continuação)

DATA HORA	PRESSÃO RESERV. [m]	COTA BASE RESERV. [m]	COTA DATALOG. [m]	NA [m]	INTERVALO DE SIMULAÇÃO	NÍVEL MÉDIO	PADRÃO DE NÍVEL
03/03/10 10:00:00	12,82	811,6	812,6	825,42	10:00 - 10:30	825,74	1,001000109
03/03/10 10:30:00	13,45	811,6	812,6	826,05	10:30 - 11:00	826,34	1,001733522
03/03/10 11:00:00	14,03	811,6	812,6	826,63	11:00 - 11:30	826,95	1,002466936
03/03/10 11:30:00	14,66	811,6	812,6	827,26	11:30 - 12:00	827,58	1,003230655
03/03/10 12:00:00	15,29	811,6	812,6	827,89	12:00 - 12:30	827,25	1,002836673
03/03/10 12:30:00	14,01	811,6	812,6	826,61	12:30 - 13:00	825,87	1,001163763
03/03/10 13:00:00	12,53	811,6	812,6	825,13	13:00 - 13:30	825,52	1,000733413
03/03/10 13:30:00	13,30	811,6	812,6	825,90	13:30 - 14:00	826,29	1,001666849
03/03/10 14:00:00	14,07	811,6	812,6	826,67	14:00 - 14:30	827,04	1,002582100
03/03/10 14:30:00	14,81	811,6	812,6	827,41	14:30 - 15:00	827,62	1,003285207
03/03/10 15:00:00	15,23	811,6	812,6	827,83	15:00 - 15:30	827,05	1,002588161
03/03/10 15:30:00	13,66	811,6	812,6	826,26	15:30 - 16:00	825,76	1,001030415
03/03/10 16:00:00	12,66	811,6	812,6	825,26			
MÍNIMO				824,91			

Com base na participação de cada trecho da rede no seu consumo total (Tabela 44) e na vazão média diária medida ($4,06 \text{ l.s}^{-1}$), foram definidas as vazões médias de cada trecho, posteriormente alocadas para os respectivos nós de consumo, conforme Tabela 47.

Tabela 47 – Consumo médio em cada nó do setor Aclimação

NÓ	CONSUMO MÉDIO [l.s^{-1}]
3	0,040
4	0,100
5	0,029
6	0,105
11	0,013
12	0,070
13	0,014
14	0,071
15	0,026
16	0,098
17	0,015
18	0,083
19	0,001
20	0,130
22	0,114
24	0,094
32	0,030
33	0,005
34	0,105
35	0,012
36	0,104
38	0,375
39	0,101
40	0,274
54	0,023

Tabela 48 – Consumo médio em cada nó do setor Aclimação (continuação)

NÓ	CONSUMO MÉDIO [l.s ⁻¹]
55	0,012
58	0,110
76	0,077
81	0,007
85	0,010
87	0,099
88	0,287
95	0,115
96	0,128
97	0,103
100	0,005
123	0,096
124	0,009
141	0,060
146	0,064
148	0,005
149	0,104
150	0,255
157	0,016
161	0,225
168	0,036
170	0,074
171	0,130
TOTAL	4,06

As cotas topográficas da rede e dos pontos de monitoramento, presentes na base de dados disponibilizada, foram conferidas com o uso de GPS topográfico, com correção a partir da estação geodésica 91695 do IBGE, localizada na cidade de Passos. Sobre esta, foi mantido um receptor base que, posteriormente, foi utilizado para correção das coordenadas da rede obtidas com um segundo receptor, operando em modo móvel. Os pontos utilizados na conferência e imagens da coleta de coordenadas de alguns deles são apresentados nas Figuras 104 e 105.



Figura 104 – Coleta de dados com GPS topográfico



Figura 105 – Localização dos pontos utilizados para conferência de cotas topográficas da rede

De posse das informações necessárias, iniciou-se a modelagem da rede. O modelo utilizado é o EPANET 2.0 (ROSSMAN, 2000), desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), em sua versão brasileira, traduzida pelo Universidade Federal da Paraíba⁵⁴. A seleção do modelo deveu-se ao fato deste ser considerado referência no setor, ser utilizado extensivamente e estar presente em diversas referências da literatura, conforme verificado no início desta seção.

O traçado georreferenciado da rede foi exportado, a partir do GeoMedia, para o formato “.shp”, padrão do sistema de informações geográficas ArcGIS⁵⁵, e posteriormente, para o formato “.inp” do EPANET. Todos os atributos das tubulações (comprimentos, rugosidades, diâmetros) foram inseridos e verificados com base no banco de dados tabular, tendo o mesmo sido realizado para os consumos, cotas topográficas e padrões de consumo dos nós.

Os dados monitorados na rede foram utilizados para a calibração do modelo. Neste caso, considerando-se que a rede possui tubulações de mesmo material (PVC) e mesma idade, a calibração consistiu em se definir os valores de rugosidade que levassem o modelo a simular valores mais próximos possíveis daqueles medidos.

Inicialmente, efetuou-se a calibração manual, que conduziu a fatores de rugosidade de 103,5. Posteriormente, aplicou-se o módulo denominado EPANET Calibrator, desenvolvido pelo Laboratório Virtual para Computação Científica e Tecnológica aplicada ao Saneamento

⁵⁴ http://www.lenhs.ct.ufpb.br/?page_id=32

⁵⁵ <http://www.esri.com/software/arcgis/index.html>

Ambiental⁵⁶, da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, que realiza a calibração de redes do EPANET através de algoritmos genéticos. Foram consideradas na calibração as configurações padrão do aplicativo, com uma população inicial de 3.000, probabilidade de mutação de 0,01, probabilidade de *crossover* de 0,9, além de 5.000 gerações. O novo coeficiente de rugosidade obtido foi de 104,99. A rede calibrada apresentou coeficiente de correlação para pressões de 0,993, indicando uma boa associação linear entre os valores medidos e simulados, como pode ser verificado nas Figuras 106 e 107.

Diante dos resultados satisfatórios obtidos com a calibração, assume-se que o modelo da rede é adequado para a realização de simulações e extração de dados para o cálculo dos indicadores propostos na tese. A Figura 108 ilustra um exemplo de simulação realizada com a rede Aclimação calibrada.

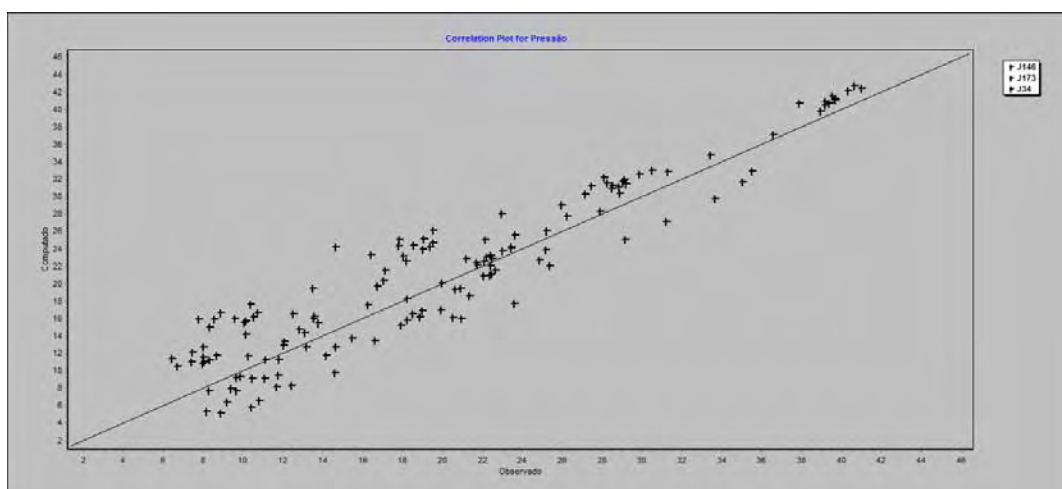


Figura 106 – Correlação entre pressões observadas e simuladas no EPANET para o setor Aclimação

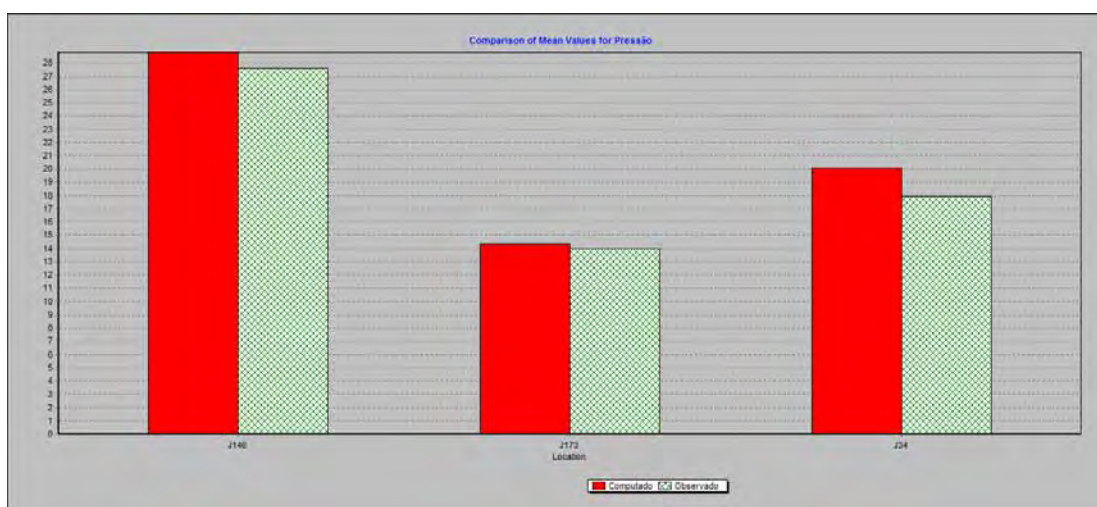


Figura 107 – Comparação entre pressões médias observadas e simuladas no EPANET para o setor Aclimação

⁵⁶ http://www.resan.ufms.br/?page_id=13

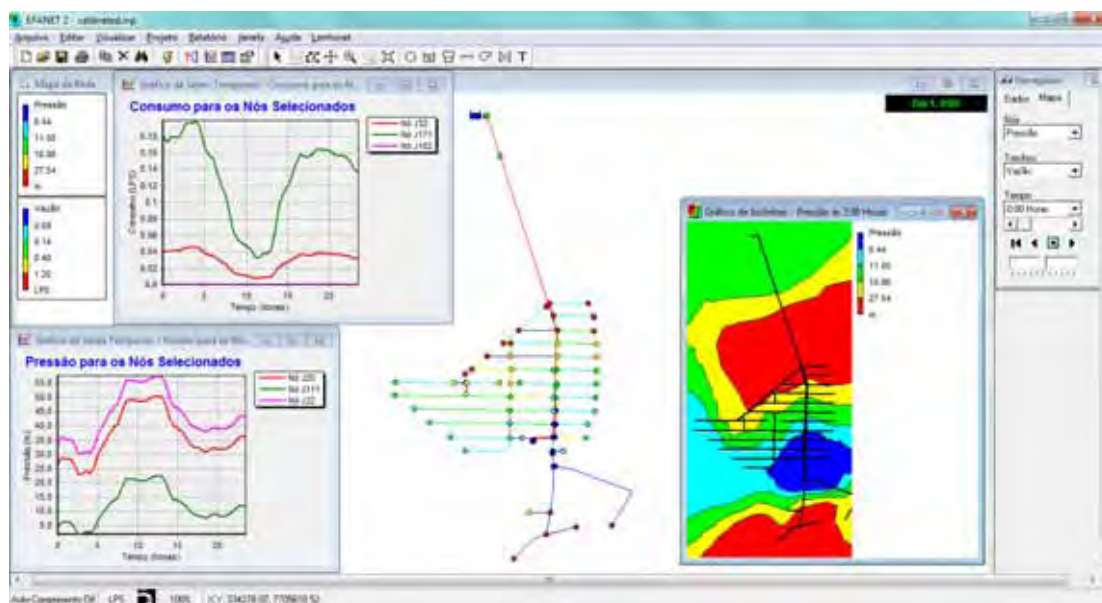


Figura 108 – Exemplo de simulação do setor Aclimação

APÊNDICE E – PADRÃO DE PRODUÇÃO, BOMBEAMENTO E VARIAÇÃO DE NÍVEL DE RESERVATÓRIO – COPASA ITAJUBÁ

As tabelas 48 a 51 apresentam os padrões de vazões de água bruta afluentes à ETA da COPASA/Itajubá, bem como os padrões de nível e bombeamento, utilizados para a modelagem dos indicadores.

Tabela 49 – Padrões de bombeamento, nível de reservatório e acionamento de bombas medidos –
COPASA/Itajubá

DATA HORA	VAZÃO DE ÁGUA BRUTA GRAVIDADE [l/s]	VAZÃO DE ÁGUA BRUTA BOMBEAMENTO [l/s]	NÍVEL DO RESERVATÓRIO [m]	BOMBA 1*	BOMBA 3*
8/8/11 0:00	53,0	173,0	2,0	1	0
8/8/11 1:00	53,0	173,0	2,0	1	0
8/8/11 2:00	53,0	173,0	2,5	1	0
8/8/11 3:00	53,0	237,0	2,5	1	1
8/8/11 4:00	53,0	237,0	3,0	1	1
8/8/11 5:00	53,0	237,0	3,5	1	1
8/8/11 6:00	53,0	237,0	4,0	1	1
8/8/11 7:00	53,0	237,0	4,5	1	1
8/8/11 8:00	53,0	237,0	4,5	1	1
8/8/11 9:00	53,0	237,0	4,5	1	1
8/8/11 10:00	53,0	237,0	4,5	1	1
8/8/11 11:00	53,0	237,0	4,5	1	1
8/8/11 12:00	53,0	237,0	4,5	1	1
8/8/11 13:00	53,0	237,0	4,5	1	1
8/8/11 14:00	53,0	237,0	4,0	1	1
8/8/11 15:00	53,0	237,0	4,0	1	1
8/8/11 16:00	53,0	237,0	4,0	1	1
8/8/11 17:00	53,0	0,0	4,0	0	0
8/8/11 18:00	53,0	0,0	3,5	0	0
8/8/11 19:00	53,0	0,0	3,0	0	0
8/8/11 20:00	53,0	0,0	2,5	0	0
8/8/11 21:00	53,0	0,0	2,0	0	0
8/8/11 22:00	53,0	0,0	1,5	0	0
8/8/11 23:00	53,0	175,0	1,5	1	0
9/8/11 0:00	43,0	175,0	1,5	1	0
9/8/11 1:00	43,0	175,0	2,0	1	0
9/8/11 2:00	43,0	175,0	2,0	1	0
9/8/11 3:00	43,0	175,0	2,5	1	0
9/8/11 4:00	43,0	175,0	3,0	1	0
9/8/11 5:00	43,0	175,0	3,5	1	0
9/8/11 6:00	43,0	175,0	3,5	1	0

Tabela 48 – Padrões de bombeamento, nível de reservatório e acionamento de bombas medidos –
COPASA/Itajubá (continuação)

DATA HORA	VAZÃO DE ÁGUA BRUTA GRAVIDADE [l/s]	VAZÃO DE ÁGUA BRUTA BOMBEAMENTO [l/s]	NÍVEL DO RESERVATÓRIO [m]	BOMBA 1*	BOMBA 3*
9/8/11 7:00	43,0	234,0	3,5	1	1
9/8/11 8:00	43,0	234,0	4,0	1	1
9/8/11 9:00	43,0	234,0	4,0	1	1
9/8/11 10:00	43,0	234,0	4,0	1	1
9/8/11 11:00	43,0	234,0	4,0	1	1
9/8/11 12:00	43,0	234,0	4,0	1	1
9/8/11 13:00	43,0	234,0	4,0	1	1
9/8/11 14:00	43,0	234,0	4,0	1	1
9/8/11 15:00	43,0	234,0	4,0	1	1
9/8/11 16:00	43,0	234,0	4,0	1	1
9/8/11 17:00	41,0	0,0	3,5	0	0
9/8/11 18:00	37,0	0,0	3,0	0	0
9/8/11 19:00	37,0	0,0	2,5	0	0
9/8/11 20:00	37,0	0,0	2,0	0	0
9/8/11 21:00	37,0	0,0	1,5	0	0
9/8/11 22:00	37,0	0,0	1,0	0	0
9/8/11 23:00	37,0	175,0	1,0	1	0
10/8/11 0:00	37,0	176,0	1,5	1	0
10/8/11 1:00	37,0	176,0	2,0	1	0
10/8/11 2:00	37,0	176,0	2,0	1	0
10/8/11 3:00	37,0	176,0	2,5	1	0
10/8/11 4:00	37,0	176,0	2,5	1	0
10/8/11 5:00	37,0	176,0	3,0	1	0
10/8/11 6:00	37,0	233,0	3,5	1	1
10/8/11 7:00	37,0	233,0	4,0	1	1
10/8/11 8:00	37,0	233,0	4,0	1	1
10/8/11 9:00	37,0	233,0	4,0	1	1
10/8/11 10:00	37,0	233,0	4,0	1	1
10/8/11 11:00	37,0	233,0	4,0	1	1
10/8/11 12:00	37,0	233,0	4,0	1	1
10/8/11 13:00	37,0	233,0	4,0	1	1
10/8/11 14:00	37,0	233,0	3,5	1	1
10/8/11 15:00	53,0	285,0	3,5	1	1
10/8/11 16:00	53,0	285,0	3,5	1	1
10/8/11 17:00	53,0	0,0	3,5	0	0
10/8/11 18:00	53,0	0,0	3,5	0	0
10/8/11 19:00	53,0	0,0	3,0	0	0
10/8/11 20:00	53,0	0,0	2,5	0	0
10/8/11 21:00	53,0	0,0	2,0	0	0
10/8/11 22:00	53,0	0,0	1,5	0	0
10/8/11 23:00	53,0	172,0	1,5	1	0
11/8/11 0:00	49,0	176,0	1,5	1	0
11/8/11 1:00	50,0	175,0	2,0	1	0
11/8/11 2:00	50,0	175,0	2,5	1	0
11/8/11 3:00	50,0	175,0	2,5	1	0
11/8/11 4:00	50,0	175,0	3,0	1	0

Tabela 48 – Padrões de bombeamento, nível de reservatório e acionamento de bombas medidos –
COPASA/Itajubá (continuação)

DATA HORA	VAZÃO DE ÁGUA BRUTA GRAVIDADE [l/s]	VAZÃO DE ÁGUA BRUTA BOMBEAMENTO [l/s]	NÍVEL DO RESERVATÓRIO [m]	BOMBA 1*	BOMBA 3*
11/8/11 5:00	50,0	175,0	3,0	1	0
11/8/11 6:00	50,0	240,0	3,5	1	1
11/8/11 7:00	50,0	240,0	4,0	1	1
11/8/11 8:00	50,0	240,0	4,0	1	1
11/8/11 9:00	50,0	240,0	4,0	1	1
11/8/11 10:00	50,0	240,0	4,5	1	1
11/8/11 11:00	50,0	240,0	4,5	1	1
11/8/11 12:00	50,0	240,0	4,5	1	1
11/8/11 13:00	50,0	240,0	4,0	1	1
11/8/11 14:00	50,0	240,0	4,0	1	1
11/8/11 15:00	50,0	240,0	4,0	1	1
11/8/11 16:00	50,0	240,0	4,5	1	1
11/8/11 17:00	50,0	0,0	4,0	0	0
11/8/11 18:00	50,0	0,0	3,5	0	0
11/8/11 19:00	50,0	0,0	3,0	0	0
11/8/11 20:00	50,0	0,0	2,5	0	0
11/8/11 21:00	50,0	0,0	2,0	0	0
11/8/11 22:00	50,0	0,0	1,5	0	0
11/8/11 23:00	50,0	174,0	1,5	1	0
12/8/11 0:00	50,0	174,0	2,0	1	0
12/8/11 1:00	50,0	174,0	2,0	1	0
12/8/11 2:00	50,0	174,0	2,5	1	0
12/8/11 3:00	50,0	174,0	2,5	1	0
12/8/11 4:00	50,0	174,0	3,0	1	0
12/8/11 5:00	50,0	235,0	3,5	1	1
12/8/11 6:00	50,0	225,0	4,0	1	1
12/8/11 7:00	50,0	225,0	4,5	1	1
12/8/11 8:00	50,0	225,0	4,5	1	1
12/8/11 9:00	50,0	225,0	4,5	1	1
12/8/11 10:00	50,0	225,0	4,5	1	1
12/8/11 11:00	50,0	225,0	4,5	1	1
12/8/11 12:00	50,0	225,0	4,5	1	1
12/8/11 13:00	50,0	225,0	4,5	1	1
12/8/11 14:00	50,0	225,0	4,0	1	1
12/8/11 15:00	50,0	225,0	4,0	1	1
12/8/11 16:00	50,0	225,0	4,0	1	1
12/8/11 17:00	50,0	0,0	4,0	0	0
12/8/11 18:00	50,0	0,0	3,5	0	0
12/8/11 19:00	50,0	0,0	3,0	0	0
12/8/11 20:00	50,0	0,0	2,5	0	0
12/8/11 21:00	50,0	0,0	2,0	0	0
12/8/11 22:00	50,0	0,0	1,5	0	0
12/8/11 23:00	50,0	172,0	1,5	1	0
13/8/11 0:00	48,0	174,0	1,5	1	0
13/8/11 1:00	48,0	174,0	2,0	1	0
13/8/11 2:00	48,0	174,0	2,0	1	0

Tabela 48 – Padrões de bombeamento, nível de reservatório e acionamento de bombas medidos –
COPASA/Itajubá (continuação)

DATA HORA	VAZÃO DE ÁGUA BRUTA GRAVIDADE [l/s]	VAZÃO DE ÁGUA BRUTA BOMBEAMENTO [l/s]	NÍVEL DO RESERVATÓRIO [m]	BOMBA 1*	BOMBA 3*
13/8/11 3:00	48,0	174,0	2,5	1	0
13/8/11 4:00	48,0	174,0	3,0	1	0
13/8/11 5:00	48,0	174,0	3,0	1	0
13/8/11 6:00	48,0	174,0	3,5	1	0
13/8/11 7:00	48,0	174,0	3,5	1	0
13/8/11 8:00	48,0	174,0	3,5	1	0
13/8/11 9:00	48,0	174,0	3,5	1	0
13/8/11 10:00	48,0	174,0	3,5	1	0
13/8/11 11:00	48,0	174,0	3,0	1	0
13/8/11 12:00	48,0	174,0	3,0	1	0
13/8/11 13:00	48,0	174,0	2,5	1	0
13/8/11 14:00	48,0	174,0	2,5	1	0
13/8/11 15:00	48,0	174,0	2,5	1	0
13/8/11 16:00	48,0	174,0	2,5	1	0
13/8/11 17:00	48,0	174,0	2,0	1	0
13/8/11 18:00	48,0	174,0	2,0	1	0
13/8/11 19:00	48,0	174,0	2,0	1	0
13/8/11 20:00	48,0	174,0	2,0	1	0
13/8/11 21:00	48,0	174,0	2,0	1	0
13/8/11 22:00	48,0	174,0	2,0	1	0
13/8/11 23:00	48,0	174,0	2,0	1	0
14/8/11 0:00	46,0	176,0	2,5	1	0
14/8/11 1:00	46,0	176,0	2,5	1	0
14/8/11 2:00	46,0	176,0	2,5	1	0
14/8/11 3:00	46,0	176,0	2,5	1	0
14/8/11 4:00	46,0	176,0	3,0	1	0
14/8/11 5:00	46,0	176,0	3,5	1	0
14/8/11 6:00	46,0	176,0	4,0	1	0
14/8/11 7:00	46,0	176,0	4,3	1	0
14/8/11 8:00	46,0	0,0	3,9	0	0
14/8/11 9:00	46,0	0,0	3,5	0	0
14/8/11 10:00	46,0	0,0	3,0	0	0
14/8/11 11:00	46,0	0,0	2,5	0	0
14/8/11 12:00	46,0	0,0	2,0	0	0
14/8/11 13:00	46,0	0,0	1,5	0	0
14/8/11 14:00	46,0	176,0	1,5	1	0
14/8/11 15:00	46,0	176,0	1,5	1	0
14/8/11 16:00	46,0	176,0	1,5	1	0
14/8/11 17:00	46,0	176,0	1,5	1	0
14/8/11 18:00	46,0	176,0	1,5	1	0
14/8/11 19:00	46,0	176,0	2,0	1	0
14/8/11 20:00	46,0	176,0	2,0	1	0
14/8/11 21:00	46,0	176,0	2,0	1	0
14/8/11 22:00	46,0	176,0	2,0	1	0
14/8/11 23:00	46,0	176,0	2,0	1	0

Fonte: medições elaboradas e fornecidas pela COPASA/Itajubá

* Nas colunas referentes às bombas, o valor “1” representa bomba ligada, e o valor “0” bomba desligada.

Tabela 50 – Padrões de bombeamento (vazão demanda pelo sistema) calculados – COPASA/Itajubá

HORA	MÉDIA ÚTEIS [l/s]	MÉDIA SÁBADOS [l/s]	MÉDIA DOMINGOS [l/s]
0:00	174,8	174,0	176,0
1:00	174,6	174,0	176,0
2:00	174,6	174,0	176,0
3:00	187,4	174,0	176,0
4:00	187,4	174,0	176,0
5:00	199,6	174,0	176,0
6:00	222,0	174,0	176,0
7:00	233,8	174,0	176,0
8:00	233,8	174,0	0,0
9:00	233,8	174,0	0,0
10:00	233,8	174,0	0,0
11:00	233,8	174,0	0,0
12:00	233,8	174,0	0,0
13:00	233,8	174,0	0,0
14:00	233,8	174,0	176,0
15:00	244,2	174,0	176,0
16:00	244,2	174,0	176,0
17:00	0,0	174,0	176,0
18:00	0,0	174,0	176,0
19:00	0,0	174,0	176,0
20:00	0,0	174,0	176,0
21:00	0,0	174,0	176,0
22:00	0,0	174,0	176,0
23:00	173,6	174,0	176,0

Tabela 51 – Padrão de acionamento do conjunto moto-bomba 1

HORA	MÉDIA ÚTEIS (B1)	MÉDIA SÁBADOS (B1)	MÉDIA DOMINGOS (B1)
0:00	1	1	1
1:00	1	1	1
2:00	1	1	1
3:00	1	1	1
4:00	1	1	1
5:00	1	1	1
6:00	1	1	1
7:00	1	1	1
8:00	1	1	0
9:00	1	1	0
10:00	1	1	0
11:00	1	1	0
12:00	1	1	0
13:00	1	1	0
14:00	1	1	1
15:00	1	1	1
16:00	1	1	1
17:00	0	1	1
18:00	0	1	1
19:00	0	1	1
20:00	0	1	1
21:00	0	1	1
22:00	0	1	1
23:00	1	1	1

Nota: o valor “0” representa bomba desligada, enquanto o valor “1” representa a bomba ligada

Tabela 52 – Padrão de acionamento do conjunto moto-bomba 3

HORA	MÉDIA ÚTEIS (B3)	MÉDIA SÁBADOS (B3)	MÉDIA DOMINGOS (B3)
0:00	0	0	0
1:00	0	0	0
2:00	0	0	0
3:00	1	0	0
4:00	1	0	0
5:00	1	0	0
6:00	1	0	0
7:00	1	0	0
8:00	1	0	0
9:00	1	0	0
10:00	1	0	0
11:00	1	0	0
12:00	1	0	0
13:00	1	0	0
14:00	1	0	0
15:00	1	0	0
16:00	1	0	0
17:00	0	0	0
18:00	0	0	0
19:00	0	0	0
20:00	0	0	0
21:00	0	0	0
22:00	0	0	0
23:00	0	0	0

Nota: o valor “0” representa bomba desligada, enquanto o valor “1” representa a bomba ligada

APÊNDICE F – SUPERFÍCIES DE INTERPOLAÇÃO DE CURVAS DE ROTAÇÃO VARIÁVEL

As tabelas 52 e 53 apresentam os dados utilizados para a geração das superfícies de interpolação para modelagem e otimização da operação dos conjuntos moto-bomba da COPASA/Itajubá, a partir da variação da velocidade dos conjuntos moto-bomba.

Tabela 53 – Superfícies de operação com rotação variável – Bomba 1

η [%]	n [rpm]	Q [m ³ .s ⁻¹]	H [m]
78,7	1772	193,4	94,20
79,9	1772	179,3	101,40
79,1	1772	163,1	108,10
77,9	1772	152,5	111,70
70,8	1772	117,6	118,90
0,0	1772	0,0	131,60
78,7	1595	174,1	76,30
79,9	1595	161,4	82,13
79,1	1595	146,8	87,56
77,9	1595	137,3	90,48
70,8	1595	105,8	96,31
0,0	1595	0,0	106,60
78,7	1418	154,7	60,29
79,9	1418	143,4	64,90
79,1	1418	130,5	69,18
77,9	1418	122,0	71,49
70,8	1418	94,1	76,10
0,0	1418	0,0	84,22
78,7	1240	135,4	46,16
79,9	1240	125,5	49,69
79,1	1240	114,2	52,97
77,9	1240	106,8	54,73
70,8	1240	82,3	58,26
0,0	1240	0,0	64,48
78,7	1063	116,0	33,91
79,9	1063	107,6	36,50
79,1	1063	97,9	38,92
77,9	1063	91,5	40,21
70,8	1063	70,6	42,80
0,0	1063	0,0	47,38
78,7	886	96,7	23,55
79,9	886	89,7	25,35
79,1	886	81,6	27,03
77,9	886	76,3	27,93
70,8	886	58,8	29,73
0,0	886	0,0	32,90
78,7	1949	212,7	113,98
79,9	1949	197,2	122,69

Tabela 52 – Superfícies de operação com rotação variável – Bomba 1 (continuação)

η [%]	n [rpm]	Q [m ³ .s ⁻¹]	H [m]
79,1	1949	179,4	130,80
77,9	1949	167,8	135,16
70,8	1949	129,4	143,87
0,0	1949	0,0	159,24
78,7	2126	232,1	135,65
79,9	2126	215,2	146,02
79,1	2126	195,7	155,66
77,9	2126	183,0	160,85
70,8	2126	141,1	171,22
0,0	2126	0,0	189,50

Tabela 54 – Superfícies de operação com rotação variável – Bomba 3

η [%]	n [rpm]	Q [m ³ .s ⁻¹]	H [m]
69,1	1772	168,0	91,0
70,1	1772	143,2	103,4
67,8	1772	129,2	108,1
57,5	1772	91,4	114,8
50,3	1772	67,1	120,6
0,0	1772	0,0	125,6
69,1	1595	151,2	73,7
70,1	1595	128,9	83,8
67,8	1595	116,3	87,6
57,5	1595	82,3	93,0
50,3	1595	60,4	97,7
0,0	1595	0,0	101,7
69,1	1418	134,4	58,2
70,1	1418	114,6	66,2
67,8	1418	103,4	69,2
57,5	1418	73,1	73,5
50,3	1418	53,7	77,2
0,0	1418	0,0	80,4
69,1	1240	117,6	44,6
70,1	1240	100,2	50,7
67,8	1240	90,4	53,0
57,5	1240	64,0	56,3
50,3	1240	47,0	59,1
0,0	1240	0,0	61,5
69,1	1063	100,8	32,8
70,1	1063	85,9	37,2
67,8	1063	77,5	38,9
57,5	1063	54,8	41,3
50,3	1063	40,3	43,4
0,0	1063	0,0	45,2
69,1	886	84,0	22,8
70,1	886	71,6	25,9
67,8	886	64,6	27,0
57,5	886	45,7	28,7
50,3	886	33,6	30,2
0,0	886	0,0	31,4
69,1	1949	184,8	110,1

Tabela 53 – Superfícies de operação com rotação variável – Bomba 3 (continuação)

η [%]	n [rpm]	Q [m ³ .s ⁻¹]	H [m]
70,1	1949	157,5	125,1
67,8	1949	142,1	130,8
57,5	1949	100,5	138,9
50,3	1949	73,8	145,9
0,0	1949	0,0	152,0
69,1	2126	201,6	131,0
70,1	2126	171,8	148,9
67,8	2126	155,0	155,7
57,5	2126	109,7	165,3
50,3	2126	80,5	173,7
0,0	2126	0,0	180,9

APÊNDICE G - ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS E O SEU USO NA MEDIÇÃO DE EFICIÊNCIA DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA (SAAS)

As bases teóricas para a formalização de técnicas de medição de eficiência através de relações entre insumos e produtos foram propostas originalmente por Debreu (1951), Farrell (1957) e Koopmans (1965). A generalização das propostas de Farrell (1957) para aplicações com múltiplos insumos (*inputs*) e produtos (*outputs*), desenvolvida por Charnes, Cooper, e Rhodes (1978), deu origem ao método denominado análise envoltória de dados (DEA).

Na definição clássica elaborada por estes autores, a DEA é apresentada como um modelo de programação matemática aplicado a dados observacionais que oferece uma nova maneira de se obter estimativas empíricas das relações entre insumos e produtos – como funções de produção e/ou superfícies de possibilidades de produção eficiente –, que são pilares da economia moderna.

A DEA possibilita determinar o desempenho relativo de unidades de tomada de decisão (DMUs) que utilizam múltiplos recursos da mesma natureza (*inputs*) para produzir os mesmos bens ou serviços (*outputs*). Estes insumos e produtos podem ser variáveis contínuas, ordinais ou categóricas, com dimensões (unidades de medida) diferentes (PEÑA, 2008). Neste caso, a DEA utiliza combinações ponderadas de insumos e produtos, denominadas insumos e produtos virtuais (ZHOU *et al.*, 2008a). A principal vantagem da DEA é a de não requerer qualquer suposição prévia sobre as relações funcionais entre insumos e produtos, constituindo assim uma abordagem não paramétrica orientada a dados (ZHOU *et al.*, 2008a).

A maneira através da qual uma DMU transforma seus insumos em produtos é conhecida como tecnologia de produção. A compreensão da tecnologia de produção das DMUs utilizadas na DEA permitirá definir o modelo mais adequado à sua representação. Nesse sentido, os modelos podem apresentar diferentes orientações e retornos de escala.

As duas orientações básicas da DEA são a *inputs-oriented* e *outputs-oriented*. O modelo orientado a *inputs* avalia a eficiência considerando uma redução dos *inputs* em se mantendo a mesma taxa de *outputs*, enquanto o modelo orientado a *outputs* assume que um aumento da eficiência é obtido através do aumento da quantidade de *outputs* simultaneamente à manutenção da taxa de *inputs* (ROMANO; GUERRINI, 2011). Segundo Romano e Guerrini (2011), a maioria dos trabalhos que utiliza DEA na análise de sistemas de abastecimento de água emprega o modelo *input-oriented*, tendo em vista que seus *outputs* (volumes de água

fornecidos, por exemplo) mantêm-se consistentes ao longo dos anos, enquanto os *inputs* sofrem influências, tais como flutuações de preço e variações da eficiência interna do sistema.

O retorno de escala descreve a variação da produção em função de mudanças na quantidade de insumos. O modelo básico de DEA proposto por Charnes, Cooper, e Rhodes (1978), cujo acrônimo é definido por CCR, considera retornos constantes de escala (CRS, *constant returns to scale*), enquanto sua adaptação desenvolvida por Banker, Charnes e Cooper (1984) resultou no modelo BCC para retornos variáveis de escala (VRS, *variable returns to scale*). As diferenças entre tais abordagens se refletem na interpretação das eficiências calculadas. A eficiência calculada pelo modelo CCR (CRS) é denominada eficiência técnica ou eficiência técnica global; por outro lado, ao se aplicar o modelo BCC (VRS), obtêm-se eficiências puramente técnicas, referentes exclusivamente ao melhor uso dos *inputs* para a produção de *outputs*. A Figura 109 apresenta um esquema ilustrativo dos principais componentes da análise envoltória de dados, com orientação a *inputs*.

Na Figura 109, verifica-se que, sob a orientação a *inputs*, em se mantendo determinado nível de *outputs*, a eficiência aumentará à medida em que uma DMU reduzir o seu nível de *inputs* ou ajustar a escala de trabalho, aproximando-se das fronteiras. A eficiência técnica global (CCR-CRS) de uma DMU é numericamente igual ao produto da eficiência puramente técnica (BCC-VRS) pela eficiência de escala. A eficiência BCC puramente técnica mensura a real capacidade de uma DMU adquirir, combinar e consumir *inputs* (numa abordagem orientada a *inputs*), enquanto a eficiência de escala indica a adequação da escala de produção escolhida pela DMU (ROMANO; GUERRINI, 2011).

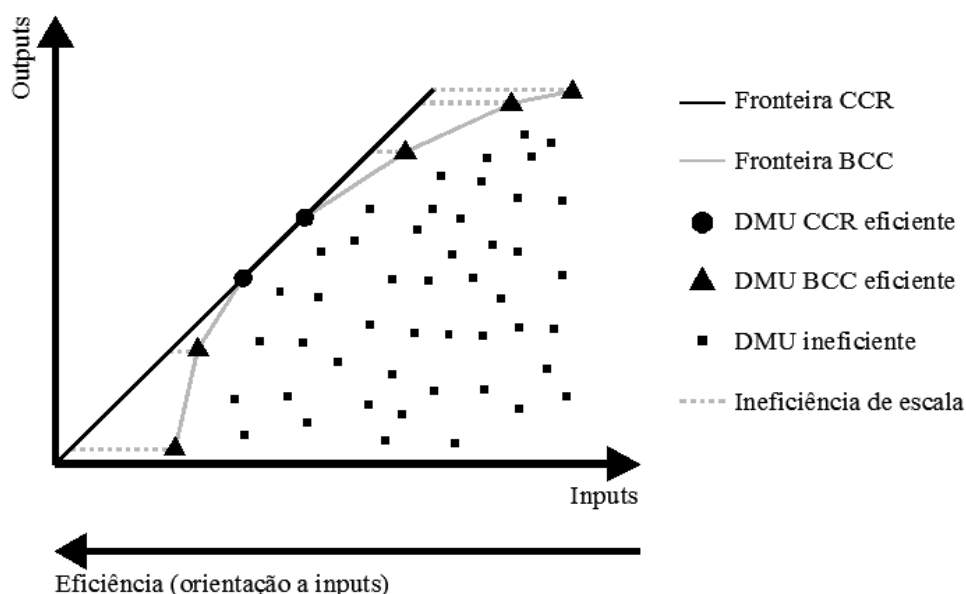


Figura 109 – Representação gráfica dos principais componentes da DEA orientada a *inputs*

Alguns trabalhos investigaram a existência e a natureza dos retornos de escala em WSSs, como por exemplo, Nauges and van den Berg (2008), que indicaram retornos de escala constantes em sistemas brasileiros de água e esgoto. Ao analisar as eficiências de grandes companhias de água e esgoto brasileiras, Tupper e Resende (2004) consideraram o modelo BCC-VRS, assumindo que a definição de eficiências puramente técnicas é mais relevante para analisar o setor. Guerrini e Romano (2011) afirmam que a maioria dos estudos baseados em DEA na indústria da água considera o uso conjunto dos modelos com CRS e VRS, visando destacar os reais determinantes da eficiência global dos sistemas.

O entendimento da tecnologia de produção é também fundamental para a seleção do conjunto de inputs e outputs que melhor caracterizam o processo. A Tabela 54 apresenta exemplos de insumos e produtos utilizados na literatura para DEA em sistemas de abastecimento de água.

Tabela 55 – *Inputs and outputs* considerados na literatura para análise de eficiência em sistemas de abastecimento de água através de DEA

Autores	Inputs	Outputs
Cubbin e Tzanidakis (1998)	Custos operacionais	Volume de água fornecido; comprimento de adutoras.
Thanassoulis (2000)	Custos operacionais	Propriedades (número de conexões); comprimento de adutoras; quantidade de água fornecida; água fornecida medida; água fornecida estimada; vazamentos.
Tupper e Resende (2004)	Custos com pessoal; custos operacionais; outros custos.	Água produzida; população atendida com água.
Alsharif <i>et al.</i> (2008)	Perdas de água; custos com água e energia; custos com manutenção e outras; salário dos funcionários (todos os outputs foram representados em termos monetários).	Receita total.
Picazo-Tadeo <i>et al.</i> (2008)	Comprimento da rede de distribuição; número de empregados; custos operacionais.	População atendida; água fornecida.
Byrnes <i>et al.</i> (2010)	Custo total de operação.	Água tratada fornecida e reclamações por 1000 conexões (este último output tratado como “output indesejável”).
De Witte e Marques (2010)	Número de funcionários; comprimento de adutoras.	Volume de água fornecido; número de conexões.
Singh <i>et al.</i> (2010)	Água não contabilizada; despesas com energia elétrica.	Água produzida; número total de conexões; comprimento da rede de distribuição.
Carvalho e Marques (2011)	Custos com pessoal; custos de operação e manutenção; custo de investimento.	Volume de água fornecido; número de consumidores.

Tabela 54 – *Inputs* and *outputs* considerados na literatura para análise de eficiência em sistemas de abastecimento de água através de DEA (continuação)

Autores	Inputs	Outputs
Romano e Guerrini (2011)	Custo de materiais, mão de obra, serviços e locações.	Água fornecida; população atendida.
Abbott <i>et al.</i> (2012)	Custos operacionais; total de ativos; comprimento de tubulações e adutoras; número de estações de bombeamento.	Conexões; índice recíproco de perdas de água (o recíproco das perdas de água foi a forma de considerá-las como outputs indesejáveis).
Herrala <i>et al.</i> (2012)	Custos operacionais; custo de investimento.	Volume de água fornecido; número de consumidores.

Nota: alguns trabalhos consideraram serviços conjuntos de água e esgoto; são apresentadas na tabela somente *inputs* e *outputs* referentes aos serviços de água.

Tabelas semelhantes à 54 são apresentadas por Walter *et al.* (2009), Abbott *et al.* (2012) e De Witte e Marques (2010). A revisão de De Witte e Marques (2010) identificou quatro trabalhos que utilizaram perdas de água como *input* e dois que as utilizaram como *output*. Picazo-Tadeo *et al.* (2008) não consideram as perdas de água como *input* ou *output*, e sim como uma variável de qualidade na DEA, citando outros trabalhos que consideram as perdas de água como uma variável representativa da qualidade do serviço.

Segundo Thanassoulis (2000), a consideração dos *outputs* “propriedades” e “comprimento de adutoras” permite capturar a influência da escala dos sistemas durante a análise envoltória de dados. De acordo com Singh *et al.* (2010), o número de conexões reflete o alcance do serviço em termos de consumidores, enquanto o comprimento da rede pode ser considerado um indicador de dispersão geográfica dos mesmos.

Em uma análise de eficiência de sistemas de água e esgoto através de DEA, Tupper e Resende (2004) consideraram a densidade da rede de distribuição (população atendida com água dividida pelo comprimento da rede) e as perdas de água como fatores explanatórios da eficiência do sistema que permitem compensar suas heterogeneidades. Estes fatores foram associados aos índices de eficiência resultantes da DEA através de técnicas econométricas.

Uma abordagem semelhante à proposta no presente trabalho foi utilizada por Singh *et al.* (2010), que considerou a água não contabilizada (incluindo as perdas físicas) como *inputs* para a definição de *benchmarks* de sustentabilidade em sistemas de abastecimento de água através de DEA.

ANEXO A – CURVAS DOS CONJUNTOS MOTO-BOMBA DA ESTAÇÃO ELEVATÓRIO DE ÁGUA BRUTA (CAPTAÇÃO) – COPASA ITAJUBÁ

As figuras 110 e 111 apresentam as curvas dos conjuntos moto-bomba da COPASA/Itajubá, fornecidas pelos fabricantes.

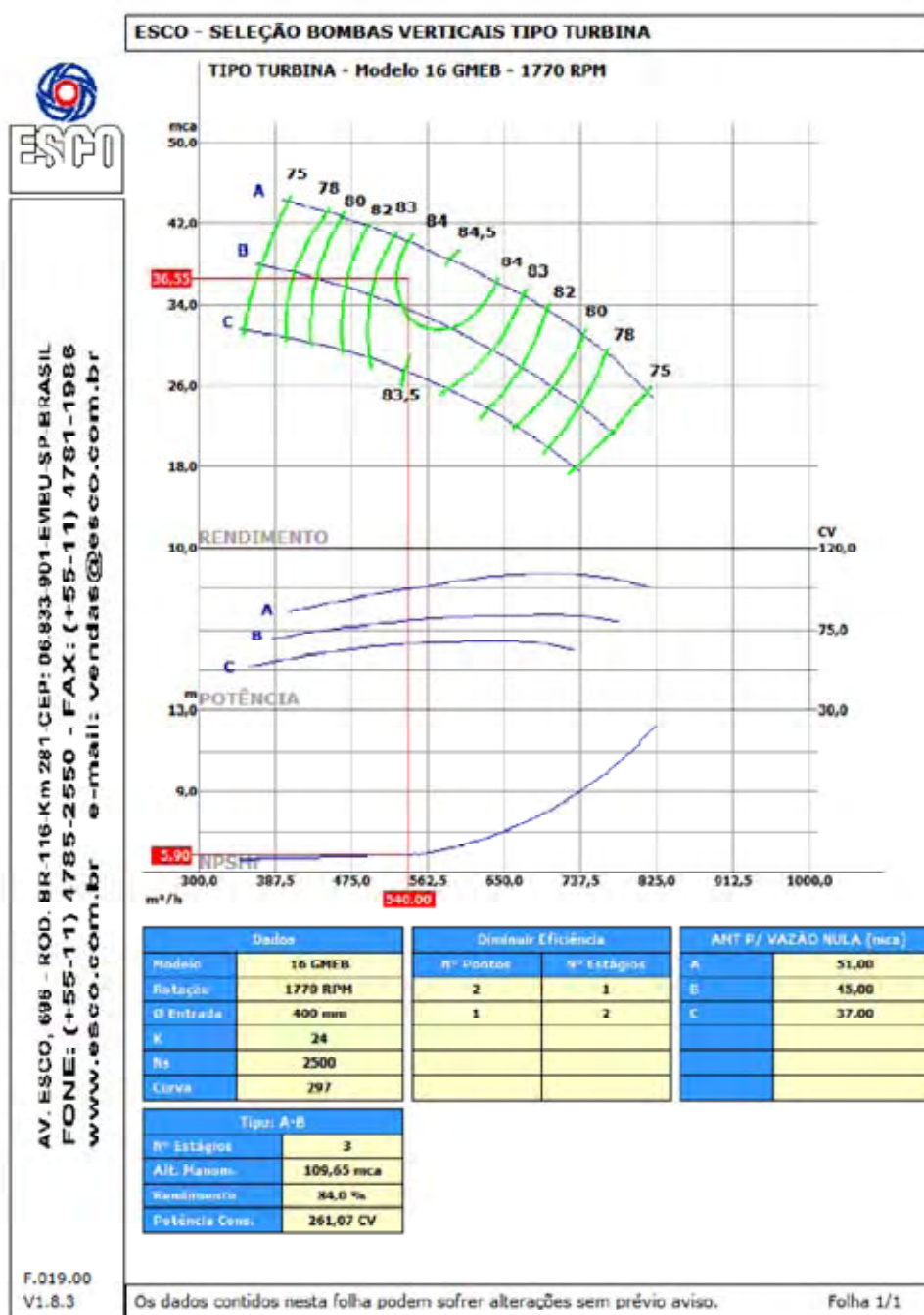


Figura 110 – Curva original das bombas

IDENTIFICACAO				CARACTERISTICAS DE DESEMPENHO					
Mod: KGA	Corc: 280C			%Pot.Nom	50%	75%	100%	Conjugados	
kW 258	Regime:s1			Rend.(%)	93	95.5	94	Cn	1388 Nm
CV 350	PRIMARIO			Fat.Pot.	0.83	0.88	0.88	Cmax	2.20 xCn
Hz 60	V 440	A 409	Liq: D	Corrente com rotor bloq. 2615 A					
rpm 1772	V	A	Liq:	Tempo com rotor bloq. a partir temp. de operaco 10 s					
kVA/kW 7.74	V	A	Liq:	J da carga 0.85	kgm ²		Conj resist da carga 477	Nm	
Isol. F	SECUNDARIO			J rotor (J=Gd ² /4)	3.75 kgm ²		Tempo aceler 1	s	
FS 1.00	V	A	Liq:	Massa aprox.	1400.0 kg		Ip/In:	6.40	
Fat.Pot. 0.88	Categoria N			Vibrao:		2.80 mm/s			
Ambiente 40.0	°C	ΔT 100	°C	Sentido de Rotaco: Ambas					
Altitude 1000	m	Proteo IP 23		Sentido de Rot. olhando para a pta de eixo diant. do motor					
F.Constr. Y18	Refriger. IC 01			Nota:					
</									

Figura 111 – Características originais dos motores