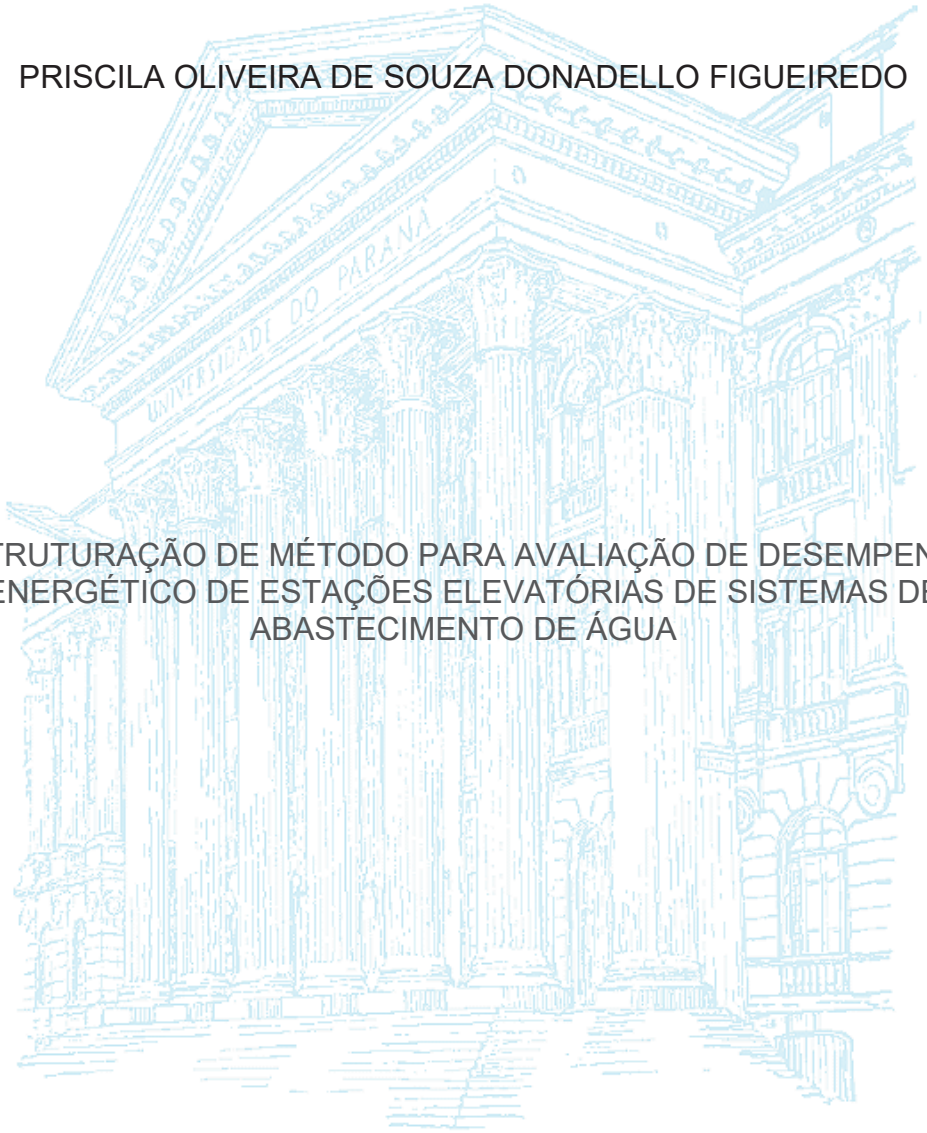
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PRISCILA OLIVEIRA DE SOUZA DONADELLO FIGUEIREDO



ESTRUTURAÇÃO DE MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO ENERGÉTICO DE ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

CURITIBA

2016

PRISCILA OLIVEIRA DE SOUZA DONADELLO FIGUEIREDO

ESTRUTURAÇÃO DE MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO ENERGÉTICO DE ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Área de Concentração em Engenharia Ambiental, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do grau de mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Costa dos Santos

CURITIBA

2016

F475e Figueiredo, Priscila Oliveira de Souza Donadello
Estruturação de método para avaliação de desempenho energético de estações elevatórias de sistemas de abastecimento de água / Priscila Oliveira de Souza Donadello Figueiredo. – Curitiba, 2016.
125 f. : il. color ; 30 cm. + 1 CD-ROM
"CD-ROM contendo processamento estendido dos dados para os estudos de caso 1 e 2"

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, 2016.

Orientador: Daniel Costa dos Santos
Bibliografia: p. 112-116.

1. Energia elétrica – Consumo. 2. Energia elétrica – Produção. 3. Energia elétrica – Distribuição. 4. Política energética. 5. Eficiência energética. I. Universidade Federal do Paraná. II.Santos, Daniel Costa dos. III. Título.

CDD: 333.7932

UFPR

PPGERHA

TERMO DE APROVAÇÃO

PRISCILA OLIVEIRA DE SOUZA DONADELLO FIGUEIREDO

"Estruturação de Método para Avaliação de Desempenho Energético de Sistemas Elevatórios de Sistemas de Abastecimento de Água"

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela comissão formada pelos professores:

PRESIDENTE:

Daniel Costa dos Santos
Universidade Federal do Paraná
Orientador

MEMBROS:

José Junji Ota
Universidade Federal do Paraná

Alexandre K. Guetter
Universidade Federal do Paraná

Gustavo Rafael Collere Possetti
Companhia de Saneamento do Paraná - SANEPAR

Curitiba, 11 de março de 2016

Dedico esse trabalho a meu esposo e amigo, Enzo, pelo incentivo, compreensão e companheirismo em todos os momentos no desenvolvimento deste trabalho e em todos os momentos que estamos juntos.

Aos meus queridos pais, José e Marina, pelo amor incondicional.

A minha querida irmã, Valquiria, que mesmo longe, se faz presente nos momentos em que eu mais preciso.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Daniel Costa dos Santos pela orientação, confiança e amizade.

Ao amigo e colega, Gustavo Rafael Collere Possetti, pela confiança, incentivo e por toda contribuição à minha pesquisa.

A minha família e amigos pela paciência e por compreenderem minhas ausências.

As queridas amigas de mestrado Cinthia Lima e Andressa Benetti.

Aos professores do PPGERHA pelos ensinamentos transmitidos.

Aos funcionários do PPGERHA e DHS pela colaboração.

A Sanepar pelo inventivo à pesquisa e por permitirem minha participação nesse Programa de mestrado (obrigada Mônica Druszcz pelo incentivo desde o primeiro dia).

Aos amigos da Sanepar Baltazar Ortega, Cezio Mazuroski e Marcos Werka, por toda contribuição à minha pesquisa.

Aos queridos amigos da Sanepar pela amizade e pelo belo trabalho que desenvolvem em prol da sociedade.

RESUMO

Diante de um panorama nacional e internacional de stress hídrico e energético, que tende a se acentuar nas próximas décadas por conta do crescimento populacional e da elevação nos padrões de consumo resultante do desenvolvimento socioeconômico de países pobres ou em desenvolvimento, a adoção de medidas de eficiência energética se torna cada vez mais necessária e urgente. Nesse sentido, e considerando que os sistemas de abastecimento de água (SAAs) respondem por aproximadamente 3% de toda a energia elétrica consumida no Brasil, sendo cerca de 90% desse consumo atribuído aos sistemas elevatórios, o presente trabalho se propôs a estruturar um método para a avaliação do desempenho energético de sistemas elevatórios de SAAs. Construído após a revisão de literatura, da qual foram selecionados os indicadores de consumo específico de energia (*CE*), de consumo específico de energia normalizado (*CEN*) e de consumo específico de energia por quilômetro de adutora (CEE_L), esse método foi aplicado em dois estudos de casos, utilizando dados reais de duas estações elevatórias num período de dois e três anos. Além de demonstrar a aplicação do método no caso concreto, os resultados permitiram mensurar o desempenho energético das elevatórias nesse período e compará-los com os valores de referência encontrados na literatura. Entre outras conclusões, sugere-se que as operadoras dos sistemas definam os valores mínimos teóricos para cada indicador, a partir de suas próprias metas e expectativas, de modo a servir como elemento para verificação da eficiência energética.

Palavras-chave: Desempenho energético; Eficiência energética; Indicadores de eficiência energética.

ABSTRACT

Considering the water and energy stress in national and international level, which tends to be accentuated in the coming decades due to population growth and the increase of consumption that results from socio-economic development of poor and developing countries, the adoption of energy efficiency measures becomes increasingly necessary and urgent. Therefore, and considering that the water supply systems accounts for approximately 3% of all electricity consumed in Brazil, and that about 90% of this consumption is attributed to the pumping systems, this paper aims to design a method for evaluating the energy performance of pumping systems in water supply systems. Built upon the literature review, from which were selected the specific energy consumption indicator (*CE*), the normalized specific energy consumption indicator (*CEN*) and the specific energy consumption per kilometer of main water pipe (CEE_L), this method was applied in two case studies using real data from two pumping stations within two years. In addition to demonstrating the application of the method in these cases, the results helped measure the energy performance of the lift systems during this period and compare them with the reference values established in the literature. Among other findings, it is suggested that the operators of the systems define the theoretical minimum values for each indicator, from its own goals and expectations, so as to serve as an element for verification of energy efficiency.

Key-words: energy performance; energy efficiency; energy efficiency indicators.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE GRÁFICOS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAB	Adutora de água bruta
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AWWA	*American Water Works Association* (EUA)
CE	Consumo específico de energia
CEEL	Consumo específico de energia por quilômetro de adutora
CEN	Consumo de energia normalizado
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DN	Diâmetro Nominal
EEB	Elevatória de água bruta
EET	Elevatória de água tratada
EG	Entidades Gestoras
ELETROBRAS	Centrais Elétricas Brasileiras S.A.
ERSAR	Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos
ETA	Estação de tratamento de água
FT	Medidor de vazão
FUNASA	Fundação Nacional da Saúde
IBNET	*International Benchmarking Network for Water and Sanitation Utilities*
IP	*Perfomance Indicators*, Indicador de desempenho
IWA	*International Water Association*
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Portugal)
LT	Sensor de nível
NBR	Denominação para norma da ABNT
NPR	*National Performance Report* (Austrália)
NPSH	*Net Positive Suction Head*
NRC	*National Research Council of Canada*
NWI	*Nacional Water Iniciative* (Austrália)
OFWAT	*Water Services Regulation Authority* (Inglaterra)
PIB	Produto Interno Bruto
PMSS	Programa de Modernização do Setor de Saneamento

PNCDA	Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água
PROCEL SANEAR	Programa de eficiência energética em Saneamento Ambiental
PT	Sensor de pressão
RASARP	Relatório Anual dos Serviços de Água e Resíduos em Portugal
RDA	Rede de distribuição de água
SAA	Sistema de abastecimento de água
SABESP	Companhia de Saneamento Básico de Estado de São Paulo
SAIC	Sistema Integrado de Abastecimento de Água de Curitiba e Região Metropolitana
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
SES	Sistema de esgotamento sanitário
SI	Sistema Internacional de Unidades
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
TS	*Thermodynamic score*
UNDESA	*United Nations Department of Economical and Social Affairs*
UNESCO	*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*
VRP	Válvula Redutora de Pressão
WRF	*Water Research Foundation*
WWPA	*World Water Development Report*

LISTA DE SÍMBOLOS

AA15	indicador de eficiência energética de instalações elevatórias (ERSAR)
C	rugosidade das paredes internas da tubulação
C7	carga instalada no sistema de bombeamento (kW)
Cosφ	fator de potência
D	diâmetro interno da tubulação (m)
D1	consumo de energia no período de referência (kWh)
D2	somatório do consumo de energia para o dia de maior consumo energético (kWh)
D4	consumo de energia reativa no período de referência (kVar)
D5	recuperação de energia no período de referência (Wh)
E1	energia em excesso por volume de entrada de água no sistema (kWh/ m³)
E2	energia em excesso por volume de água faturada (kWh/m³)
E3	razão de energia em excesso (1)
EE_{cons}	energia elétrica consumida (kWh)
E_{exc}	energia em excesso (kWh)
E_{min}	energia mínima teórica (kWh)
f	fator de atrito (1)
Fi	indicadores economico-financeiros (IWA)
g	aceleração da gravidade (m/s²)
ɣ	peso específico do fluido (N/m³)
H_c	perda de carga contínua (m)
H_g	altura geométrica (m)
H_l	perda de carga localizada (m)
H_m	altura manométrica (m)
H_r	altura de recalque (m)
H_s	altura de sucção (m)
I	corrente elétrica (A)
I_1	indicador de Infraestrutura (kWh/m³)
I_2	indicador de Qualidade (1)

IN_{058}	índice de consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água (SNIS)
k	coeficiente de perda de carga (tabelado em função do tipo de singularidade (1)
L	comprimento da tubulação (m)
Op	indicadores operacionais (IWA)
P	potência do conjunto motobomba (W)
P_a	potência ativa (kW)
Pe	indicadores de recursos humanos (IWA)
P_{exc}	potência em excesso (kW)
Ph	indicadores infra-estruturais (IWA)
Ph4	indicador de utilização da capacidade de bombeamento (IWA)
Ph5	indicador de Consumo de energia normalizado (IWA)
Ph6	indicador de Consumo de energia reativa (IWA)
Ph7	indicador de Recuperação de energia (IWA)
P_{hid}	potência hidráulica (W)
P_m	potência motriz (W)
P_{min}	potência mínima teórica (kW)
P_n	potência absorvida (W)
PT	ponto de trabalho
Q	vazão (m^3/s)
Qf_{act}	vazão faturada (m^3/s)
Q_{forn}	vazão fornecida (m^3/s)
QS	indicadores de qualidade de serviço (IWA)
Re	número de Reynolds (1)
v	velocidade do escoamento (m/s)
V	tensão elétrica (V)
V_{bomb}	volume bombeado (m^3)
Vf_{act}	volume faturado (m^3)
Vf_{orn}	volume fornecido (m^3)
WR	indicadores de recursos hídricos (IWA)
Z_1	cota ou parcela potencial de carga hidráulica no ponto 1 (m)
Z_i	cota ou parcela potencial de carga hidráulica no ponto i (m)
Z_2	cota ou parcela potencial de carga hidráulica no ponto 2 (m)

η	rendimento do conjunto motobomba (%)
ε	rugosidade do material do tubo (mm)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO

Água e energia são fortemente interdependentes, não apenas porque a produção, transporte e consumo de água requerem energia e, tal qual, a produção e consumo de energia frequentemente necessitam de água, mas também porque ambos os recursos estão sujeitos às mesmas pressões antrópicas – demográficas, econômicas, sociais e tecnológicas – responsáveis pelo atual cenário de estresse hídrico e energético.

O território brasileiro goza de enorme potencial hídrico, ainda que distribuído desigualmente entre suas diferentes regiões geopolíticas, principalmente quando se analisa a relação entre oferta e demanda. Além disso, dispõe de uma matriz energética com grande participação de fontes de energia intensivas em uso de água, com destaque para a hidráulica e a de biomassa, responsáveis por 65,2 e 7,4% da geração de energia, respectivamente, de acordo com o Balanço Energético Nacional para o ano de 2014 (BRASIL, 2015). Em termos de oferta global de energia no país, tem-se uma geração total de 624,3 TWh e um aumento de 2,9% no consumo final em comparação com o ano anterior (BRASIL, 2015), apesar do baixo crescimento econômico verificado no mesmo período (elevação de apenas 0,1% no Produto Interno Bruto - PIB).

Considerando que os Sistemas de Abastecimento de Água (SAAs) são, em média, responsáveis por aproximadamente 2,4% desse consumo final de energia (BALESTIERI e VILANOVA, 2015) e, que as estações elevatórias são responsáveis por aproximadamente 90% deste consumo (TSUTIYA, 2005), torna-se evidente o papel estratégico da promoção da eficiência hidráulica e energética nesses sistemas para mitigação do estresse hídrico e energético no Brasil.

Não obstante, tais medidas de eficiência são pertinentes também por causa dos efeitos da escalada nos custos da energia elétrica sobre os custos operacionais das empresas de saneamento básico, nos quais as despesas com energia tem grande participação. No caso da Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), por exemplo, esses custos representaram 18,48% das despesas totais em 2014 (a segunda despesa da empresa, ficando atrás somente das despesas com pessoal), sendo 91% desse consumo energético relacionado aos SAAs e apenas 8% aos Sistemas de Esgotamento Sanitário (SES) e 1% a outros custos com energia elétrica. Diante disso, é possível considerar que a promoção da

eficiência hidráulica e energética também podem representar ganhos sociais, na medida em que representam um potencial de economia de recursos financeiros que poderiam ser direcionados para a ampliação do atendimento de abastecimento de água potável e coleta e tratamento de esgoto.

São muitas as medidas de eficiência indicadas pela literatura: a redução das perdas de cargas nas tubulações (TSUTIYA, 2005); o uso de equipamentos de alto rendimento (PERRONI *et al.*, 2006); a setorização da rede de distribuição de água, substituição de equipamentos antigos de bombeamento e a automação dos SAAs (BRAGHIROLI *et al.*, 2011); e a instalação de conversores de frequência nos sistemas de bombeamento (DINIZ *et al.*, 2015); que induz reduções de até 15% no volume de água aduzido, 33% nas perdas reais de água e 54% no consumo de energia elétrica dos SAAs que os detém.

Entretanto, a implementação dessas (ou de outras) medidas de eficiência energética deve ser precedida por uma avaliação de desempenho de seus sub-sistemas, como por exemplo, de estações elevatórias. Essa etapa anterior à implementação em si, definida por Barry (2007) como a etapa de análise e gestão técnica, tem o objetivo diagnóstico da situação atual e se dá por meio do estabelecimento de metas e critérios de referência para avaliação dos progressos de desempenho, do desenvolvimento de métricas relativas à linha de base, com um sistema de medição, e da capacitação da equipe técnica aos novos procedimentos e tecnologias.

No que se referem aos critérios, metas e métricas de avaliação de desempenho, existem indicadores de eficiência energética aplicados aos SAAs desenvolvidos por organizações internacionais (IWA e IBNET) e por países como Portugal, Estados Unidos da América, Austrália, Canada, Inglaterra, País de Gales, além do Brasil. Ademais, há também tendências de abordagens desses indicadores de eficiência energética em SAAs em publicações internacionais, que ora enfatizam a relevância, ora apontam as limitações desses indicadores.

Nesse contexto, é de grande importância o desenvolvimento de trabalhos que permitam diagnosticar a eficiência energética dos sistemas de abastecimento de água no Brasil. e, para tanto, é de grande relevância o desenvolvimento de metodologias que permitam avaliar o desempenho energético das estações elevatórias de água, que é o objetivo deste trabalho.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Conceber um método para avaliação de desempenho energético de elevatórias de SAAs validando-o por meio do desenvolvimento de estudos de caso em sistemas operando em escala plena.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Propor indicadores de desempenho energético com base em variáveis hidráulicas e elétricas inerentes aos sistemas elevatórios;
- Aplicar o método proposto em dois sistemas elevatórios, sendo um composto por medição, em tempo real, de variáveis hidráulicas (vazão, pressão e tempo de bombeamento) e variáveis elétricas (tensão e corrente) e outro composto apenas pelas variáveis hidráulicas, vazão e tempo de bombeamento;
- Realizar tratamento estatístico dos resultados e compará-los com valores de referência encontrados na literatura;
- Avaliar o impacto da sazonalidade sobre o desempenho energético dos sistemas elevatórios estudados;
- Apresentar recomendações para melhoria do desempenho energético dos sistemas elevatórios estudados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ÁGUA E ENERGIA

3.1.1 Inter-relação água e energia

Água e energia estão fortemente interligadas. É necessário energia para captar, tratar e distribuir água, bem como para seu tratamento e destinação após o uso. Por outro lado, a água é amplamente utilizada na produção de energia, ainda que em diferentes graus para as diferentes fontes energéticas, bem como no consumo de energia, em sistemas de resfriamento, por exemplo. Reconhecendo a importância dessa forte interdependência entre água e energia – e considerando sua crescente escassez – o *World Water Development Report 2014* (WWPA, 2014), publicado pela UNESCO, destaca a necessidade de se desenvolverem políticas integradas no gerenciamento desses recursos, visto que as escolhas feitas com relação a um afetam diretamente o outro e, não obstante, impactam fortemente outros setores e atividades econômicas. A FIGURA 1 ilustra algumas dessas inter-relações que compõem o nexo água-energia.

ÁGUA PARA ENERGIA	ENERGIA PARA ÁGUA
• Resfriamento de termelétricas; • Hidrelétricas; • Produção de combustíveis (fósseis, não fosséis e biocombustíveis); • Mineração;	• Bombeamento; • Transporte; • Tratamento; • Dessanilização.

FIGURA 1 – INTER-RELAÇÕES ENTRE ÁGUA E ENERGIA
FONTE: adaptado de VILANOVA (2012)

A forte associação entre esses dois recursos vai além da interpendência para a sua produção, transporte e consumo. A disponibilidade de ambos os insumos está sujeita às mesmas pressões antrópicas – demográficas, econômicas, sociais e tecnológicas. Tais pressões sobre esses insumos, que são essenciais para o bem estar humano, bem como para o desenvolvimento econômico, tendem a se acentuar nas próximas décadas, considerando as projeções de crescimento populacional, de concentração das populações em áreas urbanas e de crescimento econômico nos

diferentes continentes. De acordo com as projeções de 2012 do *United Nations Department of Economical and Social Affairs* (UNDESA, *apud* WWPA, 2014), estima-se um aumento de 15% da população mundial entre 2015 e 2030, com previsão de crescimento populacional em todos os continentes (com a exceção do continente Europeu) e, além disso, o aumento da concentração populacional nos centros urbanos, que devem passar de 53,9 para 59,9% até 2030.

Nesse sentido, Balestieri e Vilanova (2015) afirmam que é esse crescimento constante da demanda por ambos os recursos (água e energia) que tem contribuído para a intensificação de pesquisas e discussões a respeito de suas inter-relações, uma vez que seus usos tanto influenciam as causas do aquecimento global quanto afetam sua disponibilidade às populações.

3.1.2 Panorama hídrico nacional

O Brasil goza de enorme potencial hídrico. Entretanto, sua distribuição pelo território nacional revela grandes desigualdades, tanto sob a ótica da disponibilidade de água quanto de sua demanda, que é determinada pela concentração populacional e pelo nível e natureza das atividades econômicas. Isso é o que aponta o balanço quantitativo realizado pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2013), que utiliza metodologia similar às praticadas pela *European Environment Agency* e Nações Unidas. A análise é feita a partir da razão entre a vazão de retirada para os usos consuntivos e a disponibilidade hídrica (vazão média de longo período), adotando as seguintes faixas de classificação, representadas comparativamente na FIGURA 2:

- < 0,05 - Excelente. Pouca ou nenhuma atividade de gerenciamento é necessária. A água é considerada um bem livre;
- 0,051 a 0,10 - A situação é confortável, podendo ocorrer a necessidade de gerenciamento para solução de problemas de abastecimento;
- 0,101 a 0,20 - Preocupante. A atividade de gerenciamento é indispensável, exigindo a realização de investimentos médios;
- 0,201 a 0,40 - A situação é crítica, exigindo intensa atividade de gerenciamento e grandes investimentos;
- > 0,401 - A situação é muito crítica.

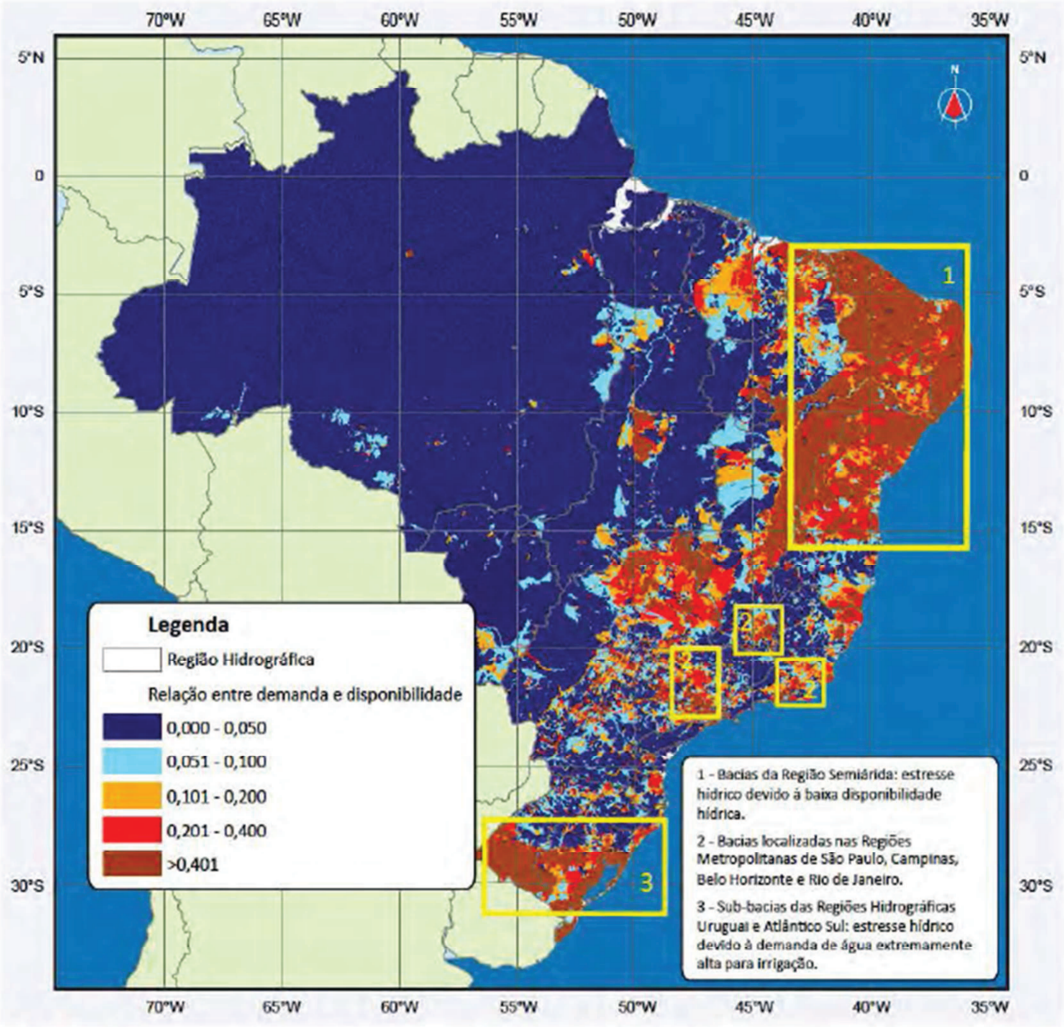


FIGURA 2 – SITUAÇÃO DAS PRINCIPAIS REGIÕES HIDROGRÁFICAS COM RELAÇÃO À DEMANDA *VERSUS* DISPONIBILIDADE HÍDRICA SUPERFICIAL (ANO BASE 2010)
FONTE: ANA (2013)

Analisando a FIGURA 2 percebe-se que, em uma quantidade significativa de localidades, como o Nordeste e Sul do País, a Bacia do Rio Tietê e as Regiões Metropolitanas localizadas em bacias litorâneas e/ou em regiões de cabaceira, a relação entre demanda e disponibilidade hídrica pode ser considerada “crítica” ou “muito crítica”, indicando a necessidade de gerenciamento e investimentos que equalizem a relação entre oferta e demanda por água, minimizando os efeitos do estresse hídrico nessas localidades.

No que se refere aos usos dos recursos hídricos (demanda), o relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil (ANA, 2013) aponta uma vazão retirada total, no ano de 2010, equivalente a 2.373 m³/s, distribuídos nas seguintes proporções por diferentes tipos de uso: abastecimento humano urbano (22%),

abastecimento humano rural (1%), dessedentação animal (6%), irrigação (54%) e abastecimento industrial (17%), conforme indicado na FIGURA 3. Em comparação ao ano de 2006, verifica-se um aumento de 29% na vazão retirada total entre 2006 e 2010, sendo o setor de irrigação o principal responsável por esse aumento e pelo consumo total.

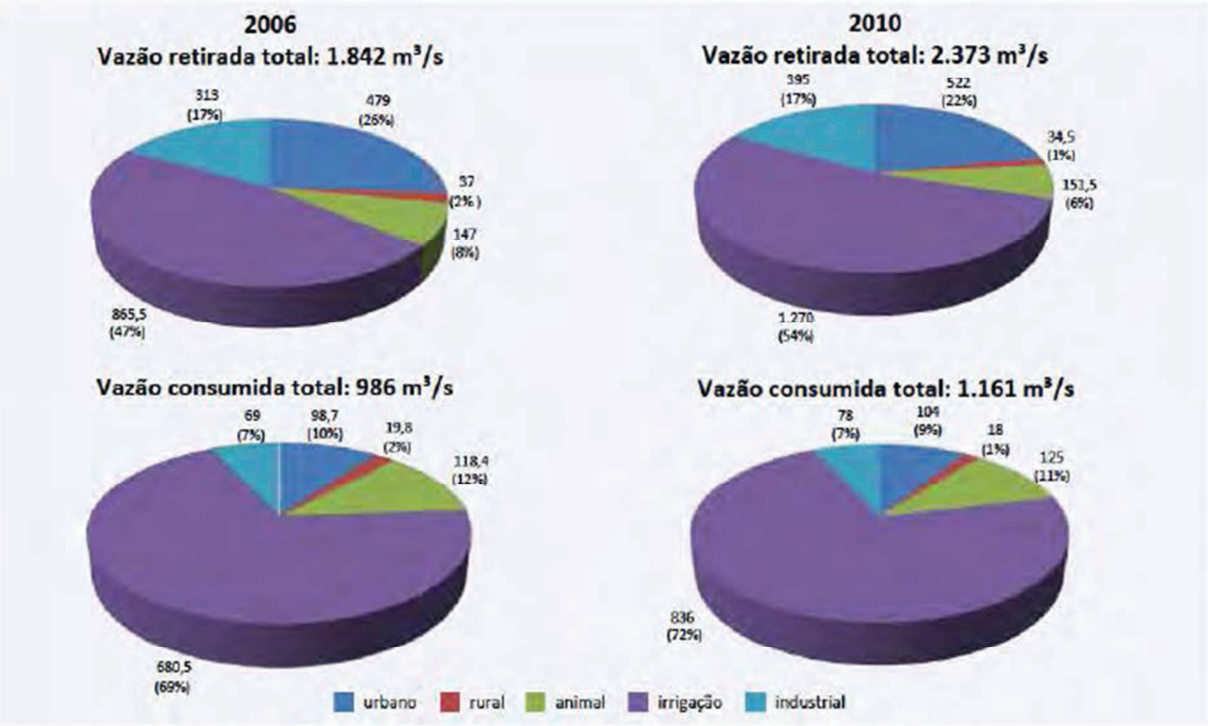


FIGURA 3 – DISTRIBUIÇÃO DAS VAZÕES DE RETIRADA E CONSUMO PARA DIFERENTES USOS: 2006 *VERSUS* 2010
FONTE: ANA (2013)

Ainda que sejam as atividades de irrigação as responsáveis pela maior parte das vazões de retirada de água, é bastante significativa a proporção destinada ao abastecimento humano urbano (22% do total). Há que se considerar, ainda, a existência de uma demanda não atendida por abastecimento humano de água, equivalente a 7% da população nacional, de acordo com o Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto em 2013 (BRASIL, 2014).

3.1.3 Panorama energético nacional

De acordo com o Balanço Energético Nacional (BRASIL, 2015), em 2014 a geração total de energia no Brasil chegou a 624,3 TWh, dos quais 407,2 TWh (65,2%) foram provenientes de centrais hidrelétricas, conforme demonstrado no

GRÁFICO 1. Embora as fontes de base eólica e solar ainda tenham uma participação muito restrita, a participação da fonte hidráulica na matriz elétrica brasileira a coloca entre uma das que mais utiliza energias renováveis no mundo (VILANOVA, 2012).

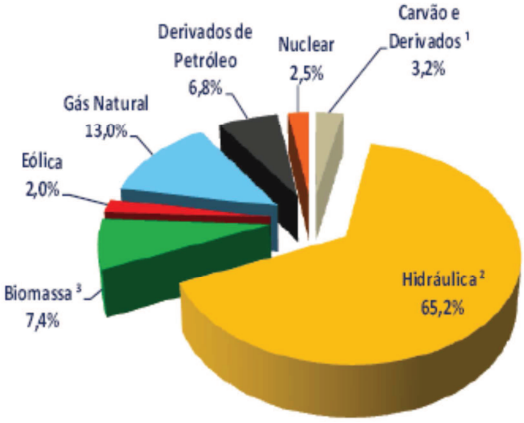


GRÁFICO 1: MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA ANO BASE 2014
FONTE: BRASIL (2015)

É importante observar, entretanto, a matriz elétrica não apenas sob a perspectiva de serem ou não renováveis as fontes energéticas, mas também sob a ótica da utilização de água para a produção de energia. Nesse sentido, o conceito de pegada hídrica permite a comparação entre o consumo de água de diferentes fontes energéticas para a produção de uma mesma quantidade de energia, conforme demonstra a TABELA 1.

TABELA 1 - PEGADA HÍDRICA DE DIFERENTES FONTES ENERGÉTICAS

FONTE ENERGÉTICA	PEGADA DE 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
Hidroelétricas	22,0
Biomassa	61,0

FONTE: adaptado de Gerbens-Çeenes *et al*. (2009, apud VILANOVA, 2012)

Quando se compara a pegada hídrica dos variados combustíveis e fontes energéticas (TABELA 1) à matriz elétrica nacional (GRÁFICO 1), percebe-se que é grande a participação das fontes de energia intensivas em uso de água na matriz elétrica nacional, principalmente a produção por fontes de biomassa e hidráulicas, que equivalem a 7,4% e 65,2% da produção energética nacional em 2014 e apresentam uma pegada hídrica de 61,00 e 22,00 m³/GJ, respectivamente.

Sob a perspectiva do consumo de energia no Brasil, o Balanço Energético Nacional (BRASIL, 2015) demonstra que o consumo da energia produzida no país em 2014 foi realizado nas seguintes proporções pelos diferentes setores: industrial (33%), residencial (21,2%), comercial (14,5%), público (6,8%), energético (5%), agropecuário (4,3%) e de transportes (0,3%), com um índice de perdas de 14,9%.

Importante ressaltar que, apesar do baixo crescimento econômico verificado no ano de 2014 (acréscimo de 0,1% no Produto Interno Bruto com relação ao ano anterior), o Balanço Energético Nacional (BRASIL, 2015) indica um crescimento de 2,9% no consumo final de energia elétrica nesse mesmo período, nas seguintes proporções entre os diferentes setores de atividade econômica: 5,6% no setor de serviços, 5,4% na agropecuária, 5,0% no setor energético, 4,5% no consumo residencial e 3,8% no setor de transporte – com um decréscimo de 0,9% no consumo das indústrias e de 2,1% no uso não energético das fontes de energia.

3.1.4 Água e energia no contexto dos SAAs

Em que pese a importância da água na matriz energética brasileira, com destaque para o papel das fontes hidráulicas, Balestieri e Vilanova (2015) apontam a escassez de informações e pesquisas que abordam a relação inversa, isto é, os usos de energia elétrica para a captação, tratamento e distribuição de água.

A partir da análise estatística dos dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), que coleta informações sobre provedores de serviços de saneamento no Brasil desde 1995, Balestieri e Vilanova (2015) calcularam em 2,4% o consumo anual de energia relacionada aos sistemas de abastecimento de água (SAAs). Essa análise vai ao encontro da estimativa da Aliança para Conservação de Energia (ALLIANCE, 2002), de que esse consumo corresponda de 2 a 3%, bem como aos dados divulgados pelo próprio SNIS (BRASIL, 2015), que apontam que o setor de saneamento é responsável por

aproximadamente 3% de toda a energia elétrica demandada no Brasil, o que representa cerca de 11,95 bilhões de kWh/ano.

Nesse mesmo estudo, Balestieri e Vilanova constataram que a taxa média de perda de água nos serviços de distribuição em municípios brasileiros equivale a 28,2% da vazão de retirada, tornando esse item um dos mais importantes a serem levados em consideração em medidas de eficiência para a economia de água e de energia. Essa taxa média vai ao encontro da estimativa da média mundial apontada por Feldman (2009), na casa de 30%, que também destaca a forte influência das perdas de água (seja por desperdício ou vazamentos) no desperdício de energia em SAAs.

Segundo estimativa de Balestieri e Vilanova (2015), a aplicação de medidas de eficiência hidráulica e energética é capaz de gerar um potencial de economia de 25 a 50% no consumo de energia elétrica nos SAAs. Já Tsutiya (2005) estima que 90% (ou mais) dessa demanda energética está associada aos sistemas de recalque de água, o que reforça a importância de pesquisas e ações de eficiência energética localizadas nessa etapa do processo.

Em que pese a responsabilidade ambiental das empresas de saneamento, em especial nesse contexto do estresse hídrico e elétrico que vem se acentuando nos últimos anos, o aproveitamento desse potencial estimado de redução do consumo de energia também é de extrema relevância na redução dos custos operacionais dessas empresas. No caso da Companhia de Saneamento do Paraná, o Relatório Anual de Administração e Demonstrações Contábeis de 2014 indica que os gastos com energia elétrica correspondem a 9,15% de seu custo operacional, sendo, aproximadamente, 91% do consumo de energia relacionado aos sistemas de água, 8% aos de esgoto e 1% a outros setores (SANEPAR, 2015). Não obstante, convém considerar que o reajuste médio da tarifa de energia desde 2013 é de 115,8%[1], o que contribuiu fortemente para o aumento da participação da energia elétrica nos custos operacionais da empresa.

Dessa forma, seja pela necessidade de mitigação do estresse hídrico e elétrico nos sistemas nacionais, seja pela representatividade dos custos com energia elétrica no orçamento das empresas de saneamento, é evidente a importância de

[1] Reajuste acumulado de 2013 a 2015, calculado a partir do reajuste médio aplicado pelas resoluções 1565/2013, 1763/2014, 1858/2015 e 1897/2015, disponíveis na página “Alterações Tarifárias” no site da COPEL (http://www.copel.com, acesso em 25/01/2016).

buscar um aumento na eficiência energética nos SAAs. Para tanto, é de grande relevância o desenvolvimento de metodologias que permitam avaliar o desempenho energético das estações elevatórias de água, que é o objetivo deste trabalho.

3.2 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

3.2.1 Apresentação dos sistemas de abastecimento de água

Segundo o Manual de Saneamento da Fundação Nacional da Saúde (FUNASA), define-se Sistema de Abastecimento de Água (SAA) 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 usos. (BRASIL, 2004, p. 36).

Os SAAs são compostos, de uma maneira geral, por manancial, captação, estação elevatória, adutora, estação de tratamento de água, reservatório e rede de distribuição, conforme ilustrado pela FIGURA 4. Cabe destacar que existem diferentes tipos para esses sistemas, os quais são concebidos de acordo com condicionantes naturais – por exemplo, topografia, fonte de água, clima – e antrópicos – distribuição geográfica dos consumidores, do uso da água, dentre outros.

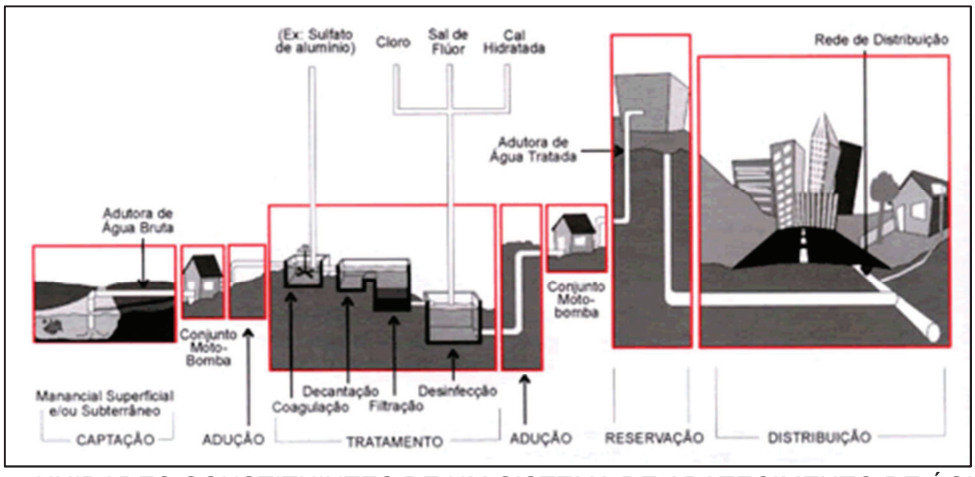


FIGURA 4 – UNIDADES CONSTITUINTES DE UM SISTEMA DE ABATECIMENTO DE ÁGUA
FONTE: REDES CIDADES EFICIENTES (2015)

3.2.1.1 Manancial

Manancial é o corpo de água responsável para fins de abastecimento público. Pode ser classificado como manancial subterrâneo, cujas águas são provenientes dos interstícios do subsolo, ou manancial superficial, que é constituído pelas fontes de água disponíveis na superfície terrestre. Segundo Netto *et al.* (1982) as águas desses mananciais devem atender a requisitos mínimos, tanto em termos qualitativos, do ponto de vista sanitário, quanto quantitativos, de modo a assegurar o fornecimento de água para o período do projeto.

Os critérios para seleção de mananciais para abastecimento de água são definidos pelas normas NBR 12211 (ABNT, 1992) e NBR 12216 (ABNT, 1992).

3.2.1.2 Captação

De acordo com a NBR 12213, captação é o “conjunto de estruturas e dispositivos, construídos ou montados junto a um manancial, para retirada de água destinada a um sistema de abastecimento” (1992, p. 01). São estruturas projetadas para assegurar a entrada de água e permitir a operação e manutenção das estruturas e dispositivos. Os tipos variam de acordo com o manancial e com o equipamento empregado. Nos mananciais superficiais são comuns estruturas como: a captação direta, a barragem de nível, a torre de tomada entre outras obras. Nos mananciais subterrâneos as estruturas mais comuns para o SAA são os poços profundos.

3.2.1.3 Estação Elevatória

A estação elevatória tem como finalidade recalcar água, seja ela bruta ou tratada, a pontos distantes ou elevados, bem como aumentar a vazão e/ou pressão em adutoras. É geralmente constituída por obra civil, composta por casa de bombas e poço de sucção, equipamento eletromecânico, como o conjunto motobomba. São compostos também por equipamentos de controle e manutenção, tubulações e acessórios, componentes esses existentes na sucção e no recalque do conjunto motobomba.

3.2.1.4 Adutora

A adutora é a tubulação cuja finalidade é transportar água entre as unidades de um sistema de abastecimento anteriores a rede de distribuição. Na ocasião de existir derivações na adutora, cuja finalidade é conduzir ou abastecer outros pontos do sistema, elas são denominadas de subadutoras. A adutora pode ser denominada como de água bruta ou de água tratada, conforme a natureza da água a ser transportada. O transporte pode ser por gravidade, recalque ou mista, livre (escoamento sob pressão atmosférica) ou forçado (escoamento sob pressão superior à atmosfera).

3.2.1.5 Estação de Tratamento de Água

De acordo com a NBR 12216, estação de tratamento de água é o “conjunto de unidades destinado a adequar as características da água aos padrões de potabilidade” (1992, p.01). Existem diversas tecnologias de tratamento, cuja escolha é definida a partir da qualidade físico-química e bacteriológica da água do manancial.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), por meio da Resolução 357/2005, considera três tipos básicos de tratamento de água:

- Tratamento simplificado: clarificação da água por meio da filtração, desinfecção e correção do pH, quando necessário;
- Tratamento convencional: clarificação com utilização de coagulação e floculação, seguido de desinfecção e correção de pH;
- Tratamento avançado: técnicas para remoção e/ou inativação de constituintes refratários aos processos convencionais de tratamento, os quais podem conferir à água características, tais como cor, odor, sabor e atividade tóxica ou patogênica.

3.2.1.6 Reservatório de água

Os reservatórios são unidades destinadas a garantir o abastecimento contínuo durante as variações horárias de vazão, garantir a alimentação da rede de distribuição, com água e pressão necessária durante períodos curtos de paralisação

da produção, assim como armazenar água para combater incêndios. A depender de sua localização na rede, são classificados como: de montante, situado no início da rede de distribuição; ou de jusante, situado no extremo ou em pontos estratégicos do sistema. Podem ainda ser classificados como apoiados, semienterrados, enterrados e elevados, a depender de sua construção no terreno.

3.2.1.7 Rede de distribuição de água

A rede de distribuição de água (RDA) é a parte do sistema constituída pelo conjunto de tubulações, conexões, registros e peças especiais, cuja finalidade é o abastecimento dos pontos de consumo com vazão e pressão recomendadas. As RDAs são formadas pelas redes principais, que são as tubulações de maior diâmetro e que concentram as vazões máximas de dimensionamento, e pelas redes secundárias, que englobam as demais tubulações.

De forma a obter economia de água e, consequentemente, de energia, as RDAs devem sem projetadas de forma eficiente, garantindo o abastecimento de todos os pontos de consumo, inclusive os mais desfavoráveis, com pressão mínima exigida. Segundo Gouveia (2012), sistemas que operam com pressões excessivas implicam maiores vazamentos e, portanto, maiores consumos de energia elétrica, para bombear o volume de água desperdiçado. Para Tonial (2014), as pressões excessivas devem ser evitadas pelos seguintes motivos:

- Maiores pressões nas RDAs aumenta o custo energético de bombeamento, já que este custo é diretamente proporcional à altura manométrica de bombeamento.
- Maiores pressões nas RDAs aumentam os custos das tubulações, já que necessitam resistir a maiores pressões nominais.
- Com o aumento das pressões dinâmicas e estáticas, aumentam a possibilidade de ruptura das tubulações causando maiores perdas físicas de água.
- As vazões, nos pontos de consumo, crescem com o aumento das pressões disponíveis ao consumidor.

No Brasil, segundo a NBR 12218 (1994), a pressão estática máxima nas tubulações deve ser inferior a 500 kPa e a pressão dinâmica mínima deve ser de

100 kPa. Com relação às velocidades mínima e máxima admissíveis nas tubulações, a mesma norma determina os valores de 0,6 e 3,5 $m.s^{-1}$, respectivamente.

3.2.2 Variáveis de projeto e dimensionamento

Para a elaboração de um projeto de abastecimento de água, alguns critérios e parâmetros devem ser considerados. De maneira geral, a concepção dos SAAs depende da população a ser atendida (fatores antrópicos) e da topografia da área (fatores naturais).

A vazão de projeto, que é determinada em função do número de habitantes a serem atendidos e de seus hábitos de consumo, durante o horizonte de projeto, bem como de outros consumos que podem ocorrer na área de estudo, determina o dimensionamento do sistema de produção (captação, adutora de água bruta e estação de tratamento de água) e do sistema distribuidor (adutoras de água tratada, reservatórios de água e RDAs).

A determinação da localização dessas unidades também é fator importante a ser observado durante a concepção do projeto. Devem ser implantadas em lugares estratégicos de forma a proporcionar redução nas perdas de energias (hidráulica, elétrica e mecânica).

3.3 ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS

3.3.1 Apresentação das estações elevatórias

As estações elevatórias são essenciais aos sistemas de abastecimento de água, cumprindo a função de transportar a água (bruta ou tratada) a pontos distantes ou elevados, bem como aumentar a vazão e/ou pressão em adutoras ou RDAs. Para tanto, utilizam conjuntos motobomba, por meio dos quais convertem energia elétrica em mecânica e esta em energia hidráulica, na forma de pressão e energia cinética. Entretanto, diante do alto custo energético da operação desses conjuntos motobomba, que podem representar, conforme já salientado, até 90% consumo de energia elétrica nos SAAs (TSUTIYA, 2005), é fundamental que os projetos explorem ao máximo o uso da gravidade para o transporte de água, de maneira a evitar o uso desnecessário desses equipamentos.

Os principais componentes de uma estação elevatória estão representados na FIGURA 5.

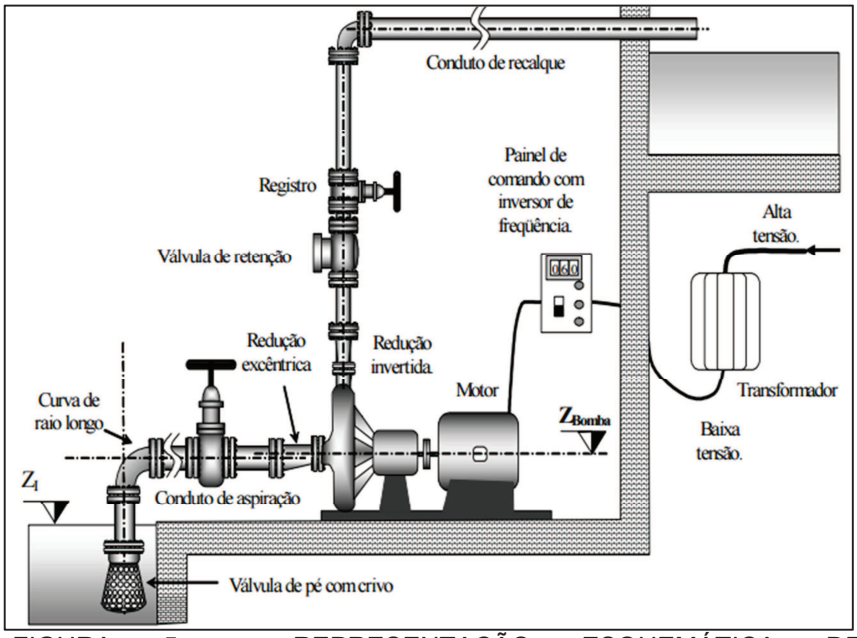


FIGURA 5 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE COMPONENTES DE UMA ESTAÇÃO ELEVATÓRIA
FONTE: BORGES (2011)

3.3.2 Classificação das bombas

As bombas são classificadas, de maneira geral, em cinéticas e de deslocamento positivo (FIGURA 6).

As bombas cinéticas caracterizam-se pela presença de um elemento girante (rotor) dotado de pás, acondicionado dentro de uma carcaça, e que é movido a partir da rotação de um eixo. A movimentação do fluido ocorre pela ação de forças que se desenvolvem em sua massa, dada pela ação da força centrífuga, já que o fluido entra pelo centro do conjunto e sai pela periferia.

Nas bombas de deslocamento positivo a movimentação do fluido é causada diretamente pela ação do sistema de impulsão da bomba, ou seja, o fluido exerce o mesmo movimento a que está sujeito esse impulsor. O movimento do fluido, em geral, dá-se na mesma direção das forças a ele transmitidas (deslocamento positivo) e, sucessivamente, ocupam e desocupam espaços no interior da bomba.

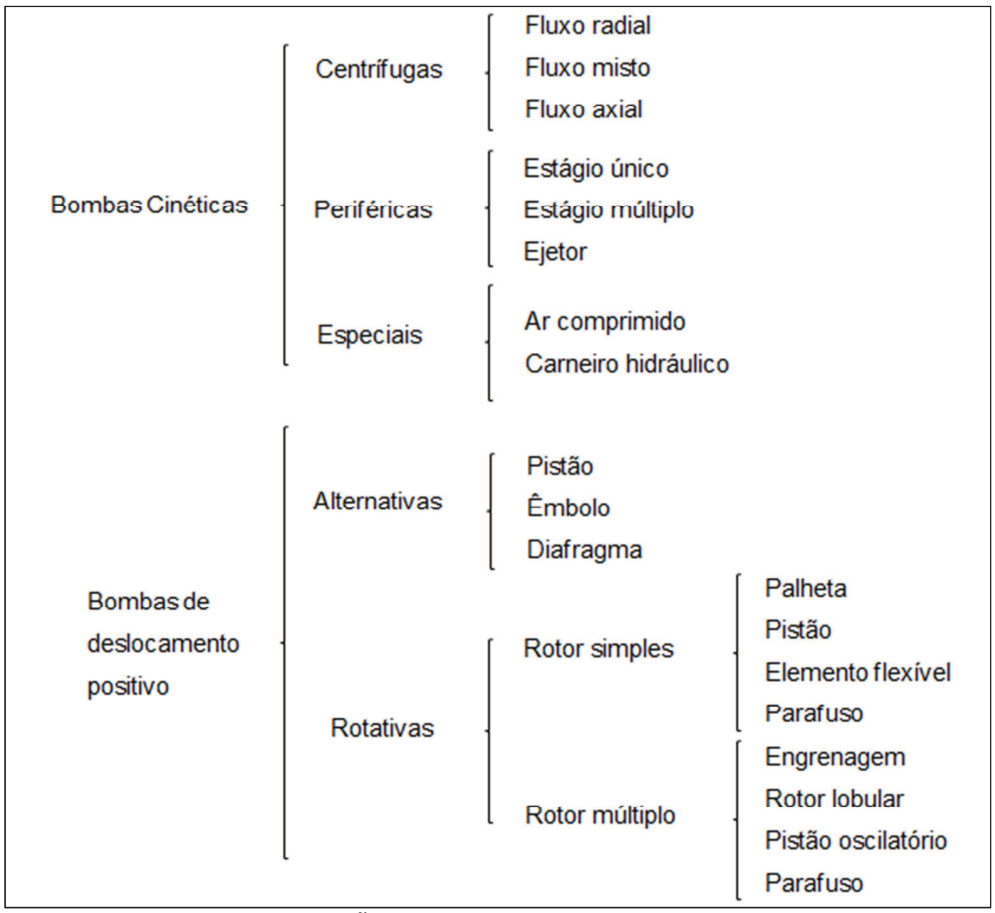


FIGURA 6 – CLASSIFICAÇÃO DAS BOMBAS
FONTE: TSUTIYA (2004)

As bombas cinéticas, principalmente as centrífugas, são as mais utilizadas nos SAAs. São bombas que possuem bons rendimentos e baixos custos com instalação, operação e manutenção. De acordo com Netto *et al.* (1982), bombas centrífugas de 1750 rpm e de 200 l/s apresentam um rendimento em torno de 88%, em média.

3.3.3 Variáveis de projeto e dimensionamento

3.3.3.1 Altura geométrica, manométrica e perdas de carga

As estações elevatórias podem ser instaladas de duas formas diferentes nos SAAs. No primeiro caso (FIGURA 7), o eixo do conjunto motobomba encontra-se acima do nível da água. No segundo (FIGURA 8), encontra-se abaixo do nível da água (afogada). De acordo com Gomes (2009), o segundo caso deve ser utilizado sempre que possível, já que a bomba fica automaticamente escorvada. Isso significa

que sempre haverá presença de água, o que dificulta a presença de bolhas de ar, protegendo a bomba de funcionar a seco.

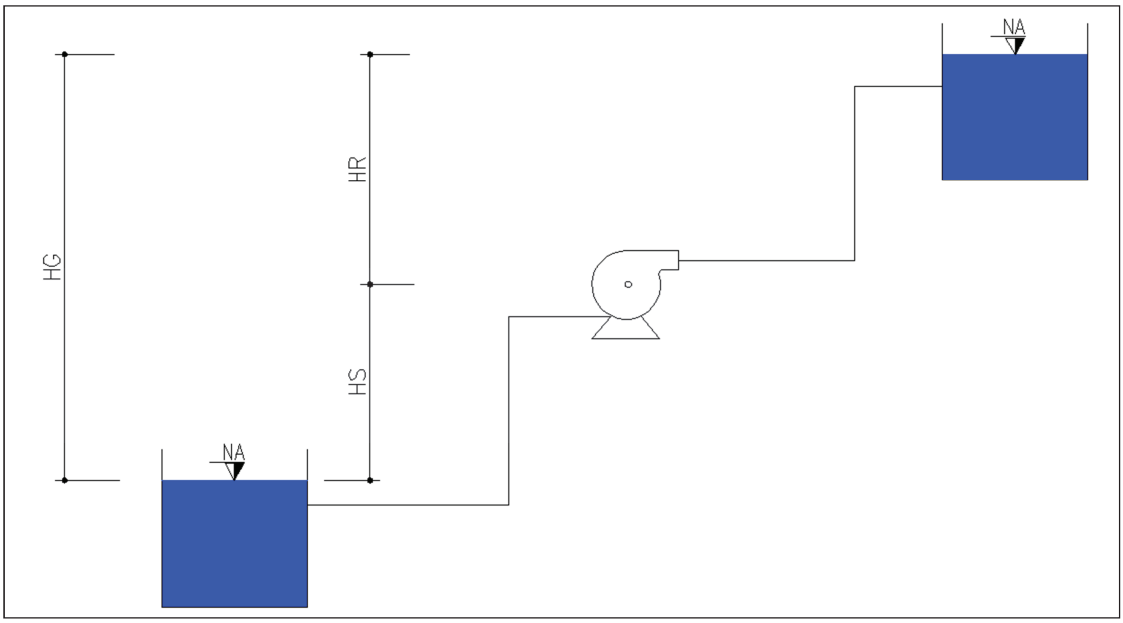


FIGURA 7 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UMA BOMBA ACIMA DO NÍVEL DA ÁGUA DO RESERVATÓRIO INFERIOR
FONTE: ADAPTADO DE GOMES (2009)

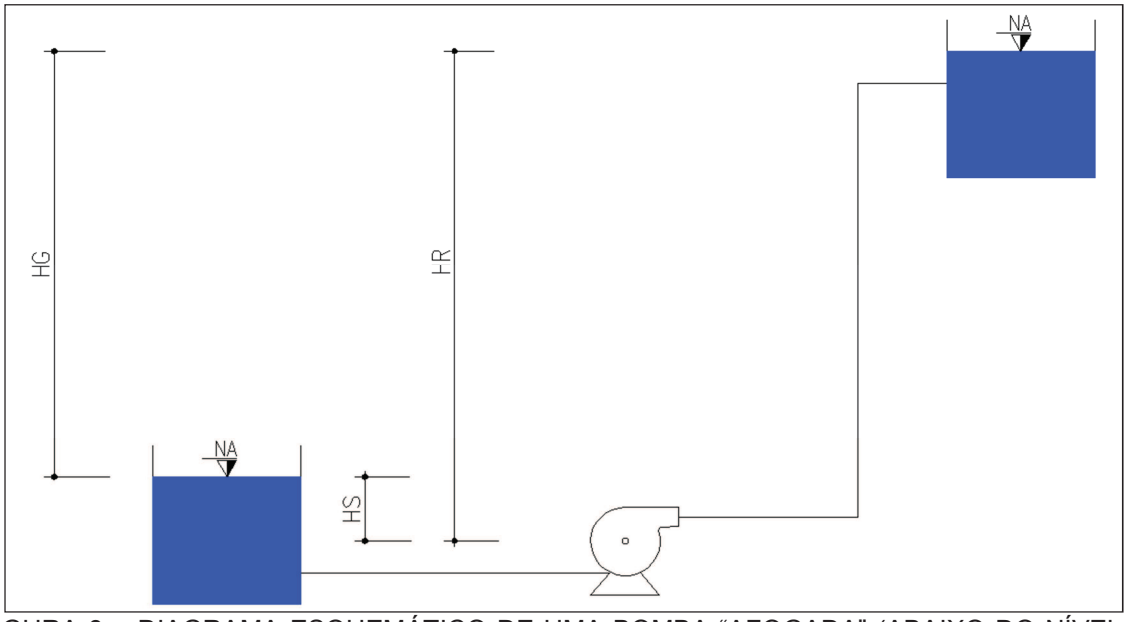


FIGURA 8 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UMA BOMBA “AFOGADA” (ABAIXO DO NÍVEL DA ÁGUA DO RESERVATÓRIO INFERIOR)
FONTE: ADAPTADO DE GOMES (2009)

Em ambas as topologias, o conjunto motobomba deverá vencer a diferença de nível entre o reservatório inferior e a saída da tubulação de recalque, acrescidas das perdas de carga em todo o percurso. Para a diferença de nível dá-se o nome de

altura geométrica H_g, a qual pode ser dividida em duas parcelas: a altura de sucção H_s, que é a altura entre o eixo da bomba e o nível de água inferior; e, a altura de recalque H_r que é a altura entre o nível de água superior em relação ao eixo da bomba. A altura manométrica H_m, portanto, corresponde ao somatório da altura geométrica e das perdas de carga. Essa altura é a energia cedida pela bomba ao líquido na forma de energia por unidade de peso de fluido bombeado.

A perda de carga em uma tubulação é a perda de energia dinâmica do fluido devido, no caso do regime laminar, à viscosidade, e no regime turbulento, à viscosidade e à inércia. Dividem-se em perdas contínuas H_c, ocasionada pelo movimento da água ao longo das tubulações; e, localizadas H_l, provocadas pelas peças especiais e demais singularidades de uma instalação.

Quanto às perdas de carga localizadas, a NBR 12214 (1992), norma brasileira referente a projetos de SAA, sugere a Equação 1 para o cálculo das perdas localizadas.

$$Hl = k\frac{v^2}{2g} \tag{1}$$

em que:
H_l é a perda de carga localizada (m);
k é o coeficiente de perda de carga do acessório;
v é a velocidade do escoamento (m/s);
g é a aceleração da gravidade (m/s²).

Valores sugeridos na literatura para k constam na TABELA 2 (NETTO *et al.*, 1998, p. 122).

TABELA 2 – VALORES APROXIMADOS PARA k

ACESSÓRIO	k	ACESSÓRIO	k
Ampliação gradual *	0,3	Medidor Venturi **	2,5
Bocais	2,75	Redução gradual *	0,15
Comporta aberta	1	Saída de canalização	1
Controlador de vazão	2,5	TÊ, passagem direta	0,6
Cotovelo 45º	0,4	TÊ, saída bilateral	1,8
Cotovelo 90º	0,9	TÊ, saída de lado	1,3
Crivo	0,75	Válvula borboleta aberta	0,3
Curva 22,5º	0,1	Válvula de ângulo aberto	5
Curva 45º	0,2	Válvula de gaveta aberto	0,2
Curva 90º	0,4	Válvula de globo aberto	10
Entrada de Borda	1	Válvula de retenção	2,5
Entrada normal em canalização	0,5	Válvula-de-pé	1,75
Existência de pequena derivação	0,03	Velocidade	1
Junção	0,4		

* Com base na velocidade maior (seção menor)

** Relativa à velocidade na canalização

FONTE: NETTO *et al.* (1998)

Para o cálculo das perdas de carga contínuas, usualmente, são utilizadas as equações de Hazen-Williams e de Darcy–Weisbach.

Devido à sua simplicidade, a equação de Hazen-Williams é muito utilizada para o cálculo das perdas de carga contínua. Desenvolvida por Allein Hazen e Gardner S. Williams, a partir de pesquisas próprias e de dados estatísticos obtidos por diversos pesquisadores, a fórmula tem grande aceitação na área, por conta de seu amplo uso e de confirmações experimentais de seus resultados. Seus limites de aplicação variam de diâmetros de 50 até 3500 mm e velocidades de até 3 m/s (NETTO, 1982). No Sistema Internacional de Unidades (SI), incluindo o comprimento, a perda de carga contínua é dada pela Equação 2.

$$Hc = 10{,}643\ x\ \frac{L\ x\ Q^{1,82}}{C^{1,82} x\ D^{4,87}} \qquad (2)$$

em que:

H_c é a perda de carga contínua (m);

L é o comprimento da tubulação (m);

Q é a vazão (m³/s);

C é o coeficiente que depende da natureza (material e estado) das paredes da tubulação;

D é o diâmetro interno da tubulação (m).

O coeficiente *C* é um parâmetro que pode indicar a rugosidade das paredes internas de uma tubulação. Sua diminuição indica o aumento das perdas de carga na tubulação, consequência natural de seu envelhecimento. A TABELA 3 indica valores sugeridos pela literatura a partir do material e idade da tubulação (NETTO *et al.*, 1998, p. 150).

TABELA 3 – VALORES DO COEFICIENTE *C* PARA A EQUAÇÃO DE HAZEN-WILLIANS

TUBOS	NOVOS	USADOS (+-10 ANOS)	USADOS (+- 20 ANOS)
Aço Corrugado	60	-	-
Aço galvanizado roscado	125	100	-
Aço rebitado, novos	110	90	80
Aço soldado, comum (revestimento betuminoso)	125	110	90
Aço soldado com revestimento epóxico	140	130	115
Chumbo	130	120	120
Cimento-amianto	140	130	120
Cobre	140	135	130
Concreto, bom acabamento	130	-	-
Concreto, acabamento comum	130	120	110
Ferro fundido, revestimento epóxico	140	130	120
Ferro fundido, revestimento de argamassa de cimento	130	120	105
Grés cerâmico, vidrado (manilhas)	110	110	110
Latão	130	130	130
Madeira, em aduelas	120	120	110
Tijolos, condutos bem executados	100	95	90
Vidro	140	-	-
Plástico (PVC)	140	135	130

FONTE: NETTO *et al.* (1998)

A equação Darcy–Weisbach, também conhecida como Universal, é recomendada pela ABNT por meio da NBR 12218:1994, conforme segue (Equação 3).

$$Hc = f \; x \; \frac{L}{D} \; x \; \frac{v^2}{2g} \qquad (3)$$

Em que:

H_c é a perda de carga contínua (m);

f é o coeficiente adimensional que depende das características do escoamento (Re) e da rugosidade do tubo;

L é o comprimento da tubulação (m);

D é o diâmetro interno do tubo (m);
v é a velocidade média do escoamento (m/s);
g é a aceleração da gravidade (m/s²).

O coeficiente adimensional (f) é função do número de Reynolds (Re) e da rugosidade do material do tubo (ε). A rugosidade relativa pode ser obtida da razão (ε/D). Valores para ε, sugeridos por Netto *et al.* (1998), são apresentados na TABELA 4.

TABELA 4 – RUGOSIDADE ABSOLUTA DOS TUBOS (ε) *

MATERIAL	TUBOS NOVOS (cm)	TUBOS VELHOS (cm)
Aço galvanizado	0,015 a 0,02	0,46
Aço rebitado	0,10 a 0,30	0,60
Aço revestido	0,04	0,05 a 0,12
Aço soldado	0,004 a 0,006	0,24
Chumbo	Lisos	Lisos
Cimento-amianto	0,0025	-
Cobre ou latão	Lisos	Lisos
Concreto bem acabado	0,03 a 0,10	-
Concreto ordinário	0,10 a 0,20	-
Ferro forjado	0,04 a 0,06	0,24
Ferro fundido	0,025 a 0,050	0,30 a 0,50
Ferro fundido com revestimento asfáltico	0,012	0,21
Manilhas cerâmicas	0,06	0,30
Plástico (PVC)	Lisos	Lisos

* Para tubos lisos, o valor de ε é 0,001 ou menos.
FONTE: NETTO *et al.* (1998)

Atualmente, o valor do coeficiente (f) pode ser obtido utilizando a Equação 4, de Swamee-Jain, válida para $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 10^{-2}$ e $5000 \leq Re \leq 10^{8}$.

$$f = \frac{0,25}{\left[\log\left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}}\right)\right]^2} \qquad (4)$$

Em que:
ε é a rugosidade do tubo (mm);
D é diâmetro interno (m);
Re é o número de Reynolds (adimensional).

3.3.3.2 Potência e Rendimento

Segundo Gomes (2009), a potência hidráulica P_{hid}, também denominada potência útil, é a potência efetivamente utilizada para o escoamento de um fluido. Entretanto, para que a bomba forneça essa potência, ela recebe do motor, por meio do seu eixo, uma potência maior devido às perdas que ocorrem durante a transformação de energia, denominada de potência motriz ou motora, P_m. Essas perdas podem ser expressas por meio do conceito de rendimento ou eficiência (GOMES, 2009).

Assim, como a bomba apresenta perdas ao transformar energia mecânica em hidráulica, o mesmo processo ocorre com o motor que está acoplado a bomba. Dessa forma, a potência final requerida da rede elétrica é dada pela Equação 5.

$$P = \frac{\gamma \, x \, Q \, x \, Hm}{\eta} \tag{5}$$

em que:

P é a potência do conjunto motobomba (W);

γ é o peso específico do fluido (N/m³),

Q é a vazão bombeada (m³/s);

H_m é a altura manométrica (m);

η é o rendimento do conjunto motobomba.

3.2.3.3 Curvas características da bomba e do sistema

As curvas características das bombas são um retrato de seu funcionamento nas mais diversas situações. São determinadas em testes de bancada realizados pelos fabricantes, para os diversos modelos existentes, e servem como subsídio aos projetistas para seleção das unidades que melhor atendam as necessidades de cada projeto.

Segundo Moreira *et al.* (2013) a curva característica da bomba descreve a relação entre a vazão de recalque (Q) e a altura manométrica (H_m) para uma bomba específica (FIGURA 9). Outras informações importantes também são fornecidas, como curvas da bomba para diferentes diâmetros de rotor, rendimento da bomba

(η_b), potência absorvida (P_n) e o *Net Positive Suction Head* (NPSH). Essa última relaciona a vazão com a altura máxima de sucção e determina a energia necessária que a bomba precisa no bocal de sucção, acima da pressão de vapor líquido, para evitar o fenômeno da cavitação.

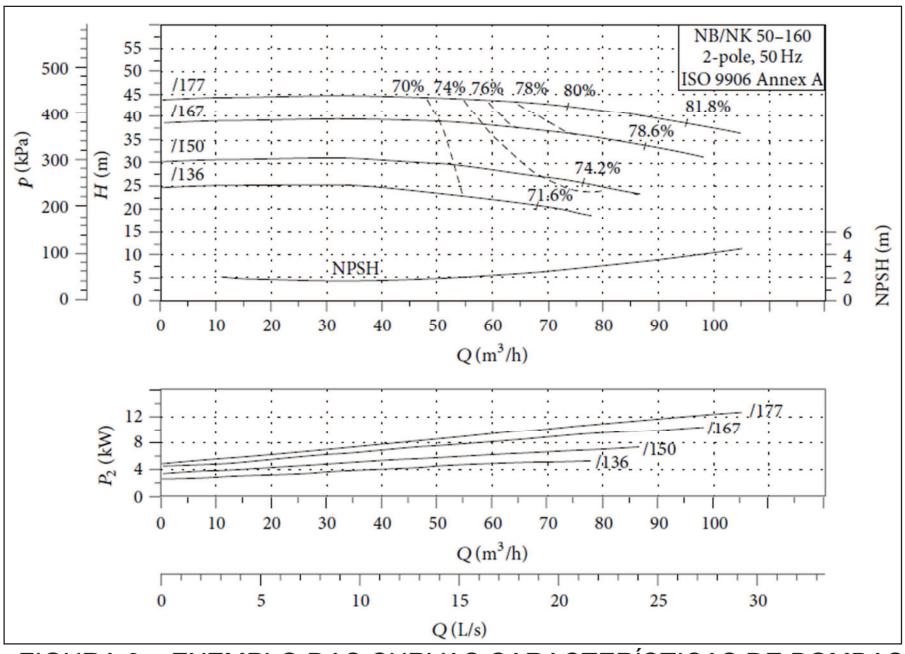


FIGURA 9 – EXEMPLO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE BOMBAS
FONTE: MOREIRA *et al.* (2013)

A curva do sistema, por sua vez, representa graficamente a variação da altura manométrica em função da variação da vazão. Como a altura manométrica é função das perdas de carga, a construção da curva só é possível mediante a determinação prévia do diâmetro e do tipo de tubulação a ser empregada. A representação gráfica expressa a vazão nas abscissas e a altura manométrica nas ordenadas

O ponto de trabalho (PT) é dado a partir da interseção da curva da bomba com a curva do sistema, conforme representado na FIGURA 10. Deve-se, portanto, sempre que possível selecionar uma bomba cujo ponto de máxima eficiência coincida com o ponto de trabalho do sistema, já que fora desse ponto problemas como recirculação, choques, vibrações e cavitação podem ocorrer, diminuindo o seu rendimento.

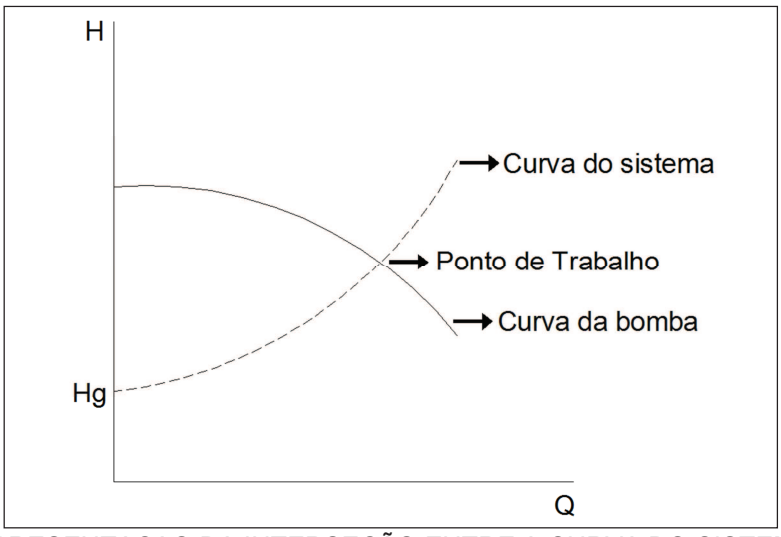


FIGURA 10 – REPRESENTAÇAO DA INTERSEÇÃO ENTRE A CURVA DO SISTEMA E DA BOMBA

Porém, essa solução técnica nem sempre é possível. Diante disso, uma alternativa é atuar na variação de rotação da bomba a partir do uso dos conversores de frequência. Cada velocidade de rotação dá origem a uma nova curva da bomba de forma que o ponto de máxima eficiência possa ser deslocado para o ponto de trabalho (GOMES, 2009).

3.4 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Eficiência energética é o conjunto de ações que buscam a redução de energia elétrica consumida para obtenção de um mesmo produto ou serviço sem perda na qualidade (PETTERSON, 1996). Segundo o relatório da Aliança para Conservação de Energia (ALLIANCE, 2002), o consumo de energia elétrica pode ser reduzido em pelo menos 25% por meio da implementação de ações de eficiência energética e hidráulica. Nesse contexto, programas e mecanismos de eficiência energética tem um papel importante.

No Brasil, destaca-se o Programa de Eficiência Energética em Saneamento Ambiental (PROCEL SANEAR), instituído em 2003 pela Centrais Elétricas Brasileiras (ELETROBRAS), que atua de forma conjunta com o Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água (PNCDA) e o Programa de Modernização do Setor de Saneamento (PMSS).

Os principais objetivos do programa são (ELETROBRAS, 2015):

- Promover ações que vise ao uso eficiente de energia elétrica e água em sistemas de saneamento ambiental, incluindo o consumidor final, segundo uma visão integrada de utilização desses recursos.
- Incentivar o uso eficiente dos recursos hídricos, como estratégia de prevenção à escassez de água destinada à geração hidroelétrica.
- Contribuir para a universalização dos serviços de saneamento ambiental, com menores custos para a sociedade e benefícios adicionais nas áreas de saúde e de meio ambiente.
- Incremento do fluxo de recursos financeiros para implementação de projetos de eficiência energética na área de saneamento ambiental.
- Melhoria dos indicadores de desempenho associados à energia elétrica e ao processamento de água dos prestadores de serviços de saneamento.
- Maior conscientização dos consumidores no que se refere ao uso adequado de energia elétrica e água e a informação de novas tecnologias e seus benefícios.

Nos SAAs muitas ações podem ser tomadas para obtenção da eficiência energética. Para Gomes (2009), essas medidas dividem-se em ações administrativas e operacionais. As ações administrativas são relativas aos contratos com as concessionárias de energia elétrica, a serem tomadas antes das ações operacionais e, geralmente, não envolvem custos para serem implantadas. Já as operacionais são ações de engenharia que envolvem estudos e investimentos. Para Tsutiya (2005) as etapas para obtenção da redução do custo de energia elétrica são: o diagnóstico do sistema existente, de forma a identificar os pontos de maior consumo de energia; a implementação de ações administrativas; e, a adoção de ações operacionais.

Para Barry (2007) três etapas são essenciais para a busca por melhorias na eficiência dos sistemas de saneamento. A primeira etapa é definida pela vontade política em investir em ações de eficiência. Um dos maiores obstáculos para implementação dessas medidas é decorrente da falta de experiência, tanto no nível gerencial, como no técnico. Para os tomadores de decisão, é essencial definir a relação custo-benefício, de forma a avaliar em quanto tempo os investimentos serão

pagos. Segundo o autor, o período de recuperação, conforme apresentado na TABELA 5, é inferior a dois anos na maioria dos casos.

TABELA 5 – TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTOS EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NOS SAAs

ÁREA	FUNÇÃO	RETORNO (ANOS)
Tarifa elétrica	Reduzir a demanda durante os períodos de pico de energia elétrica	0 - 2 dependendo da capacidade de reservação
Instalações elétricas	Otimização do fator de potência	0,8 - 1,5
	Redução da tensão de desequilíbrio	1,0 - 1,5
Operação e manutenção	Rotina de manutenção da bomba	2,0
	Automação (exemplos: controle de pressão nas redes de distribuição; otimização na operação das bombas)	0 - 5,0
Produção e distribuição	Instalação de bomba eficiente	1,0 - 2,0
	Instalação de motor eficiente	2,0 - 3,0
	Otimização da rede de distribuição (exemplos: remoção de válvulas desnecessárias; setorização; instalação de variadores de velocidade)	0,5 - 3,0
Uso final	Programa de incentivo para o uso de tecnologias eficientes	1,0 - 3,0
	Medição eficaz do consumo	1,0 - 2,0

FONTE: BARRY (2007)

A segunda etapa, definida como análise e gestão técnica, tem como função realizar o diagnóstico do sistema e de identificar as medidas para obtenção da eficiência hidroenergética. Entretanto, o autor ressalta que para aumentar a confiabilidade dos resultados esperados, são fundamentais as seguintes observações: o estabelecimento de metas e critérios de referência para avaliação dos progressos de desempenho; desenvolvimento de métricas relativas à linha de base, com um sistema de monitorização para mensurá-los; capacitação da equipe técnica aos novos procedimentos e tecnologias. Por fim, a terceira etapa é a implementação das medidas de eficiência.

Segundo Coelho *et al.* (2014), podem ser entendidas como ações em busca de eficiência energética a adoção das seguintes medidas: substituição de equipamentos ineficientes, monitoramento de vazamentos e manutenção regular, redução das perdas de carga, adequação do sistema tarifário, assim como pela incorporação de fontes de energias renováveis nos sistemas, de forma a diminuir a dependência de combustíveis fósseis.

Com relação às ações referentes à troca e à manutenção das tubulações, Tsutiya (1997) verificou que a velocidade econômica nas tubulações de recalque é da ordem de 1,0 a 2,0 m/s, e que uma variação do coeficiente da rugosidade *C* de Hazen-Willians de 130 para 100 pode representar um aumento do custo anual de consumo de energia elétrica de cerca 62% (TABELA 6).

TABELA 6 – AUMENTO DO CUSTO ANUAL DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE RUGOSIDADE

COEFICIENTE *C* (Hazen-Willians)	AUMENTO DO CUSTO DA ENERGIA ELÉTRICA (%)
130	0
120	16
110	36
100	62
90	97
80	145
70	214
60	318
50	486

FONTE: TSUTIYA (1997)

A TABELA 7 apresenta algumas oportunidades de ações de melhoria da eficiência energética nos SAAs, divididas de acordo com a parte do sistema na qual será implantada.

TABELA 7 – OPORTUNIDADES DE MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NOS SAAs

OPORTUNIDADE	DESCRIÇÃO
OPORTUNIDADES PARA MELHORAR A EFICIÊNCIA NO USO FINAL	
Reduzir as perdas por vazamento	Uso de VRPs. Setorização da rede de distribuição. Detecção mais rápida das perdas, mediante a automação e o controle da rede e a atuação para sua correção. Pesquisa de vazamentos planejada e frequente.
Reduzir o desperdício de água	Uso de equipamentos de baixo consumo de água. Campanhas educativas. Cadastro, capacitação e certificação de profissionais. Incentivo à reciclagem ou reaproveitamento. Campanhas de monitoramento de vazamentos.
OPORTUNIDADES DE MELHORIA DA EFICIÊNCIA NA DISTRIBUIÇÃO	
Reduzir a altura manométrica	Reposicionamento ou divisão de reservatórios para atender por zona de pressão. Uso de mais de um reservatório.
Reduzir a perda de carga com o aumento do diâmetro da tubulação	Seleção econômica do diâmetro baseado no custo total (investimento inicial + custo operacional)
Melhorar a rugosidade e reduzir a perda de carga	Uso de materiais adequados. Limpeza do interior dos tubos com "pig".
Deslocar o consumo de energia da ponta	Aumento da capacidade dos reservatórios.
Usar reservatórios de jusante e abastecimento em marcha	Uso de variadores de velocidade nos motores das bombas. Adequação do fornecimento com o uso do reservatório, evitando o uso no horário de ponta.
Reduzir vazamentos	Uso de válvulas e controladores de nível. Programas de inspeção, operação e manutenção.
OPORTUNIDADES DE MELHORIA DA EFICIÊNCIA NO BOMBEAMENTO	
Melhorar o rendimento da bomba	Seleção adequada da bomba. Verificação do ponto de funcionamento e ajuste para a faixa de maior rendimento.
Melhorar o rendimento do motor	Adequação do motor à carga da bomba. Uso de motores de alto rendimento.
Reduzir a vazão recalcada	Construção de reservatórios por zona de pressão.
Reduzir pela variação da velocidade	Uso de variadores de velocidade para acionamento de bombas que trabalham com variação de carga ao longo do dia.
Fazer a associação adequada de bombas	Associação em série, paralela ou individual, procurando otimizar o ponto de funcionamento do sistema.
Eliminar os problemas de cavitação	O NPSH disponível calculado deve ser superior em 20% e no mínimo em 0,50 m em relação ao NPSH requerido pela bomba em todos os pontos de operação.
Evitar a recirculação	Uso de anéis de desgaste ou outros dispositivos de vedação com as folgas corretas.
OPORTUNIDADES DE MELHORIA DA EFICIÊNCIA NO SISTEMA EM GERAL	
Promover a automação	Uso de controladores programáveis, pressostatos, *timers*, chave-boia, programas de gerenciamento da rede.
Geração de energia	Uso de micro turbinas, bem como de bombas operando como turbinas, na substituição de válvulas redutoras de pressão (VRPs) para conversão o excesso de pressão em energia elétrica útil.
Fazer a adequação do contrato de energia	Contratação de energia com base no sistema tarifário mais adequado ao regime de funcionamento e porte da empresa.
Reduzir o consumo próprio de água	Eficientização dos sistemas de iluminação, climatização, equipamentos de tratamento e limpeza.

FONTE: ELETROBRAS (2015)

Cabe igualmente destacar as pesquisas efetuadas em sistemas operados pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), nas quais concluíram que uma economia de até 40% no consumo de energia elétrica

pode ser atingida a partir da redução das perdas de carga nas tubulações, assim como uma redução em até 25% no custo de energia elétrica com a implantação de automação (TSUTIYA, 2005).

Perroni *et al.* (2006) identificaram a oportunidade de redução de 15% no custo de energia elétrica a partir do uso de equipamentos de bombeamento de alto rendimento nos poços do SAA de São Carlos, município de São Paulo - SP.

Braghiroli *et al.* (2011) concluíram que com a setorização da rede de distribuição de água, substituição de equipamentos antigos de bombeamento e automação do sistema, foi possível reduzir em 15% o volume de água aduzida, 33% nas perdas reais de água e 54% no consumo de energia elétrica do SAA de Santana, zona norte de São Paulo - SP.

Camboim *et al.* (2014) simularam, em bancada experimental instrumentalizada, um sistema de abastecimento real e, a partir do controle de pressão, por meio de conversores de frequência acoplados aos conjuntos motor-bombas, identificaram um potencial de redução de 17% no consumo de energia elétrica.

Diniz *et al.* (2015), a partir da simulação dinâmica de uma estação de bombeamento do SAA de Salvador - BA, verificaram um potencial de redução do consumo 33% de energia elétrica com a instalação de conversores de frequência no sistema de bombeamento.

3.5 INDICADORES DE EFICIÊNCIA

Segundo Alegre *et al.* (2004)

> "Um indicador de desempenho é uma medida quantitativa de um aspecto particular do desempenho da entidade gestora ou do seu nível de serviço. É um instrumento de apoio à monitorização da eficiência e da eficácia da entidade gestora, simplificando uma avaliação que de outro modo seria mais complexa e subjetiva" (ALEGRE *et al.*, 2004, p. 04).

Os indicadores de desempenho (IP) podem ser utilizados para comparar o desempenho entre diferentes empresas, bem como para monitorar os resultados das ações de eficiência energética implementadas nos SAAs. A TABELA 8 apresenta algumas vantagens e aplicações do uso de indicadores.

TABELA 8 – VANTAGENS E APLICAÇÕES DO USO DE INDICADORES

Para as entidades gestoras	Facilita uma melhor e mais oportuna resposta por parte dos gestores.
	Permite uma melhor monitorização dos efeitos das decisões de gestão.
	Fornece a informação-chave de suporte a uma atitude proativa da gestão, em alternativa a uma atitude reativa, baseada nas disfunções aparentes dos sistemas.
	Permite destacar os pontos fortes e fracos dos diversos setores das entidades gestoras, e assim apoiar a adoção de medidas corretivas para melhoria da produtividade, dos procedimentos e das rotinas de trabalho.
	Facilita a implementação de um sistema de Gestão pela Qualidade Total, constituindo um meio de valorização da qualidade global e da eficiência no seio da organização.
	Facilita a implementação de rotinas de *benchmarking*, quer internamente à entidade gestora (comparando o desempenho obtido em unidades operacionais ou em subsistemas diferentes), quer externamente (comparando o seu desempenho com os de outras entidades gestoras semelhantes), promovendo melhorias de desempenho.
	Proporciona uma base técnica de suporte a processos de auditoria da atividade da entidade gestora e de previsão dos efeitos de recomendações resultantes dessas auditorias.
Para a administração nacional e regional	Fornece um quadro de referência comum para comparação do desempenho de entidades gestoras e para identificação de possíveis medidas corretivas.
	Permite apoiar a formulação de políticas para o setor da água, no âmbito da gestão integrada dos recursos hídricos, incluindo o seu monitoramento e os correspondentes investimentos, e o desenvolvimento de novos instrumentos reguladores.
Para os reguladores	Proporciona instrumentos chave de monitorização para apoio da salvaguarda dos interesses dos consumidores e à verificação da conformidade com objetivos previamente estabelecidos.
Para as entidades financiadoras	Permite avaliar as prioridades de investimento e apoiar a seleção de projetos e o respectivo acompanhamento.
Para os utilizadores	Proporciona um meio de traduzir processos complexos em informação objetiva e de fácil interpretação, transmitindo nomeadamente uma medida da qualidade do serviço prestado.
Para as organizações internacionais	Proporciona uma linguagem apropriada para identificar as principais assimetrias entre regiões do mundo e as respectivas causas e avaliar a sua evolução, permitindo assim apoiar o estabelecimento das estratégias necessárias.

FONTE: ALEGRE *et al.* (2004)

3.5.1 Indicadores de eficiência aplicados aos SAAs

3.5.1.1 Indicadores do SNIS

O Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) foi criado em 1996 pelo Governo Federal, a partir do Programa de Modernização do Setor Saneamento (PMSS) e, atualmente, é vinculado à Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades. A partir da análise das informações fornecidas pelos prestadores nacionais de serviços de água e esgoto, o SNIS publica, desde o ano de sua criação, o Diagnóstico dos Serviços de Água e

Esgoto, atualmente em sua décima nona edição (BRASIL, 2015). Trata-se de uma série de informações de caráter institucional, administrativo, operacional, gerencial, econômico, financeiro e de qualidade sobre a prestação de serviços de água e de esgotos, que permitem, dentre outros objetivos, elevar os níveis de eficiência e eficácia a partir do aperfeiçoamento da gestão.

Dentre os indicadores operacionais relacionados à água, o índice de consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água (IN_{058}), expresso em kWh/m³, definida por Balestiere *et al.* (2014) como intensidade energética, é o único indicador relacionado à eficiência energética. Esse indicador relaciona a energia consumida com o volume de água bombeado e, por consequência, avalia a eficiência do conjunto motobomba (BRASIL, 2015).

Em 2013, a média do IN_{058}, também conhecido como o Consumo Específico de Energia (*CE*), nos Estados do Paraná, São Paulo e Minas Gerais e no Distrito Federal foi, respectivamente, de 0,82, 0,65, 0,78 e 0,91 kWh/m³ (BRASIL, 2015). A evolução deste indicador no país, para o período de 2012 a 2013, pode ser observado no GRÁFICO 2. Observa-se que na maioria dos estados, este indicador diminuiu dentro do período observado. Dentre os indicadores operacionais relacionados à água, avaliam-se também o índice de perdas na distribuição e o índice de perdas por ligação (BRASIL, 2015).

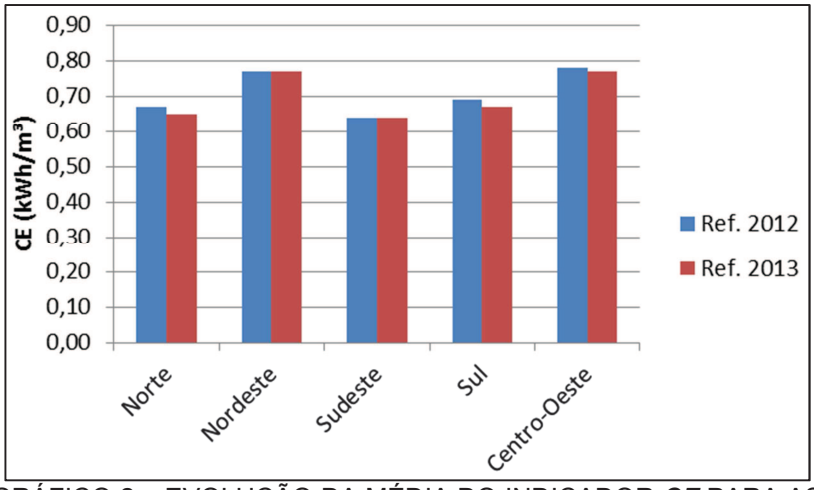


GRÁFICO 2 – EVOLUÇÃO DA MÉDIA DO INDICADOR *CE* PARA AS REGIÕES BRASILEIRAS
FONTE: BRASIL (2015)

Balestieri *et al.* (2014), apresentaram alguns valores relacionados ao consumo específico, definido pelos autores como intensidade energética, de diferentes países, como reportado na TABELA 9.

TABELA 9 – INTENSIDADE ENERGÉTICA E INDICADORES ASSOCIADOS AOS SAAs

REGIÃO	DESCRIÇÃO DO INDICADOR	CE (kWh/m³)
Toronto (Canadá)	Intensidade energética para operação dos abastecimentos e tratamento de água.	0,68
Florida (Estados Unidos)	Intensidade energética (devido ao uso direto de energia) para operação e manutenção de abastecimento de águas superficiais.	1,33
Michigan (Estados Unidos)	Intensidade energética (devido ao uso direto de energia) para operação e manutenção de abastecimento de águas subterrâneas.	1,69
Arizona (Estados Unidos)	Intensidade energética de bombeamento de água no *Central Arizona Project.*	1,24 - 2,55
Oslo (Noruega)	Intensidade energética para operação e manutenção dos SAAs.	0,39 - 0,44
Brasil	Intensidade energética média das regiões brasileiras.	0,69
Ontario (Canada)	Intensidade energética no bombeamento de águas subterrâneas.	0,25 - 3,02
Carolina do Norte (Estados Unidos)	Intensidade energética no bombeamento de águas superficiais.	2,4
Sidnei (Austrália)	Intensidade energética no bombeamento de águas superficiais.	2,4
Califórnia (Estados Unidos)	Intensidade energética no transporte de água.	1,6 - 2,6
Tijuana (México)	Intensidade energética no transporte de água.	4,5

FONTE: ADAPTADO DE BALESTIERE *et al.* (2014)

De acordo com Plappally *et al.* (2012), o consumo de energia dos sistemas varia consideravelmente dependendo do comprimento das adutoras e das elevações envolvidas. Os autores citam que, por exemplo, aproximadamente 2,4 kWh/m³ de energia é necessária para bombear a água do lago Shasta, no norte da Califórnia, por meio de 16 km de comprimento de túneis pelo Vale Central, e sobre a cordilheira Tehachapi (600 m altura) para o Distrito Metropolitano de Água, que fornece água para Los Angeles, Orange, San Diego, Riverside, San Bernardino, e condados de Ventura no sul da Califórnia. Da mesma forma, os autores afirmam que a geografia também desempenha um papel decisivo sob os valores da energia gasta no SAA. Para isso, verificaram que Loudoun, uma pequena cidade em um vale montanhoso em Virginia (Estados Unidos), que possui uma população de 39.000 habitantes, consome cerca de 2,27 kWh/m³, enquanto Alexandria, na parte norte da Virgínia, com uma população de 900.000 pessoas, consome 0,5 kWh/m³.

3.5.1.2 Indicadores da IWA

A *International Water Association* (IWA), por meio da primeira edição do manual "*Performance indicators for water supply services*", publicada em 2000, estruturou mais de 150 indicadores de desempenho (IP), de base anual, divididos em seis grupo, conforme TABELA 10. Esses grupos, identificados por um código de duas letras, foram divididos em 3 níveis, partindo de uma visão global para um visão mais específica de cada grupo. Na segunda edição, em 2006, o número de IPs foi aumentado para 170, entretanto, sem alteração na estrutura.

TABELA 10 – ESTRUTURA DOS INDICADORES DE DESEMPENHO PROPOSTOS PELA IWA

GRUPO DE INDICADORES	CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO
Indicadores de recursos hídricos	WR
Indicadores de recursos humanos	Pe
Indicadores infra-estruturais	Ph
Indicadores operacionais	Op
Indicadores de qualidade de serviço	QS
Indicadores economico-financeiros	Fi

FONTE: ALEGRE *et al.* (2004)

Do grupo de indicadores infra-estruturais, o subgrupo "bombeamento", contempla os seguintes indicadores:

- Ph4 – Utilização da capacidade de bombeamento (%);
- Ph5 – Consumo de energia normalizado [kWh/(m³x100 m)];
- Ph6 – Consumo de energia reativa (%);
- Ph7 – Recuperação de energia (%).

3.5.1.3 Indicadores da ERSAR

A Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR), criada em 1997, publica anualmente o Relatório Anual dos Serviços de Água e Resíduos em Portugal (RASARP). O objetivo desse documento é apresentar a evolução da qualidade dos serviços prestados pelas companhias de saneamento do país a todos os utilizadores e à sociedade. Utilizam, para tanto, indicadores de qualidade do serviço e valores de referência publicados no "Guia de avaliação da qualidade dos

serviços de águas e resíduos prestados aos utilizadores", elaborado em parceria com o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) do país.

Dentre os indicadores aplicados aos serviços de abastecimento de água e que traduzem a sustentabilidade ambiental, a partir da preocupação do uso eficiência de recursos ambientais, está o indicador AA15 – Eficiência energética de instalações elevatórias, dado em kWh/(m³x100 m), o mesmo Ph5 da IWA, que mede a quantidade média de energia necessária para elevar a 100 metros de altura manométrica a quantidade de 1 metro cúbico de água. A ERSAR avalia a qualidade dos serviços das entidades gestoras (EG) em "boa", "mediana" ou "insatisfatória", a partir dos resultados obtidos do cálculo do indicador, conforme reportado na TABELA 11.

TABELA 11 – VALORES DE REFERÊNCIA DO INDICADOR AA15 PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE INSTALAÇÕES ELEVATÓRIAS DE PORTUGAL

QUALIDADE DO SERVIÇO	VALORES DE REFERÊNCIA [kWh/(m³ x 100 m)]	EFICIÊNCIA DO CONJUNTO (%)
Boa	[0,27; 0,4]	68 – 100
Mediana	]0,40; 0,54]	50 – 68
Insatisfatória	]0,54; +∞[	< 50

FONTE: ERSAR/ LNEC (2013)

A evolução desse indicador em Portugal, para o período de 2011 a 2014, foi publicado no último RASARP de 2015 e podem ser observadas nas FIGURAS 11a e 11b.

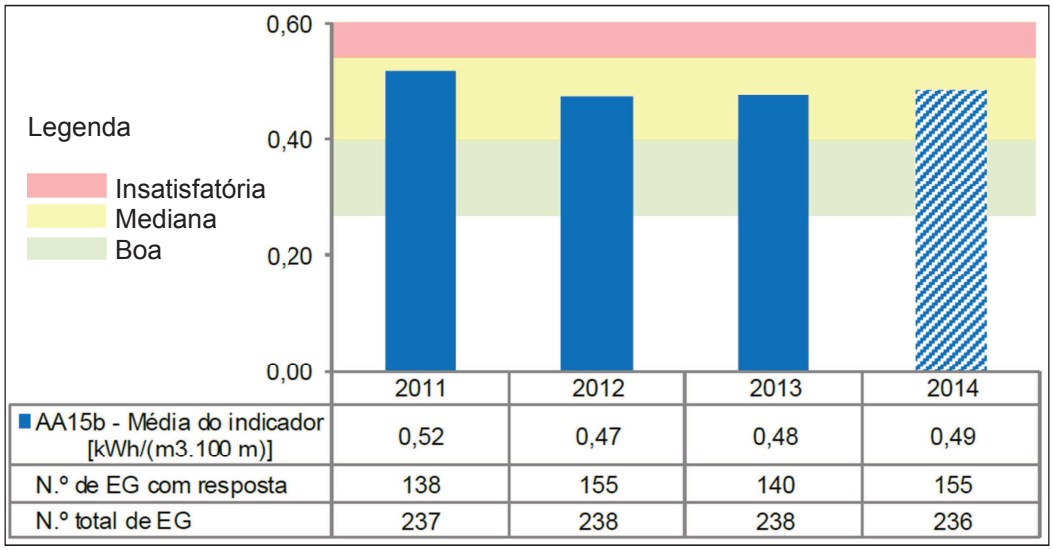


FIGURA 11a – EVOLUÇÃO DA MÉDIA DO INDICADOR AA15 PARA AS PRESTADORAS DE SERVIÇO DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E ESGOTAMENTO SANITÁRIO
FONTE: ERSAR (2015)

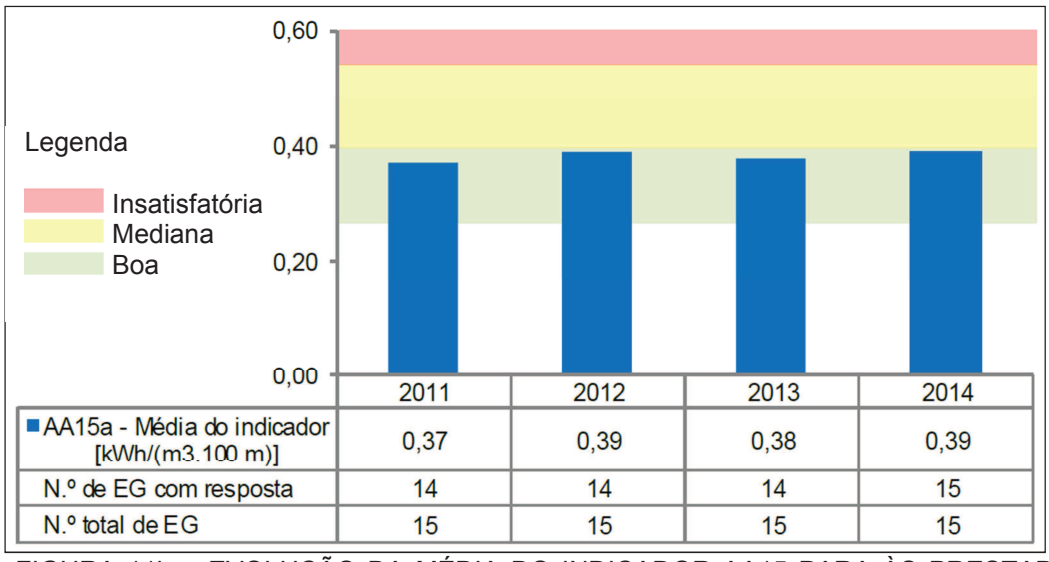


FIGURA 11b – EVOLUÇÃO DA MÉDIA DO INDICADOR AA15 PARA ÀS PRESTADORAS DE SERVIÇO DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E ESGOTAMENTO SANITÁRIO
FONTE: ERSAR (2015)

Analisando a FIGURA 11a observa-se que Portugal apresentou, para o ano de 2014, eficiência energética "mediana" para as instalações elevatórias das prestadoras municipais que fazem distribuição de água aos utilizadores finais – edifícios, por exemplo. De maneira geral estas prestadoras possuem mais bombas e de menor porte, o que indica que existe um potencial de melhoria por meio de adoção de metodologias operacionais e de monitorização mais eficazes. Já a FIGURA 11b apresenta que para prestadores supramunicipais que fazem distribuição a municípios (e não para o consumidor final), apresentaram "boa" eficiência para os últimos quatro anos. Em geral, esses prestadores possuem menos bombas e de maior porte, razão pela qual o gráfico AA15a é mais positivo uma vez que, nas bombas de grande porte, é mais fácil atingir níveis de eficiência superiores.

3.5.1.4 Indicadores da IBNET

A *International Benchmarking Network for Water and Sanitation Utilities* (IBNET) foi criada pelo Departamento de Água e Energia do Banco Mundial que, desde 1997, esteve envolvido no monitoramento do setor. O objetivo da IBNET é proporcionar acesso à informação comparativa dos diferentes serviços públicos, de diversas partes do mundo, de forma a promover melhores práticas (IBNET, 2014). No que se refere aos indicadores de eficiência energética, entretanto, a IBNET se

restringe a comparar anualmente o custo total com energia elétrica com o custo total operacional das empresas.

3.5.1.5 Indicadores da NWI, Austrália

Por meio de um acordo intergovernamental entre os Governos da Austrália e dos seus Estados e Territórios, foi estabelecida em 2004 a *Nacional Water Iniciative* (NWI), com o objetivo de proporcionar uma melhor gestão dos recursos hídricos do país e proporcionar maior segurança para futuros investimentos (NWC, 2012).

Os desempenhos dos serviços públicos de água, fornecidos anualmente por meio da publicação *National Performance Report* (NPR), são avaliados por indicadores divididos em quatro categorias (recursos hídricos; financeiros; qualidade da água e no atendimento ao cliente; e, meio ambiente). Dentre os indicadores, destacam-se os relacionados com quantidade de emissão de gases que contribuem com aquecimento global.

3.5.1.6 Indicadores da AWWA

Fundada em 1881, a *American Water Works Association* (AWWA) iniciou em 1995 a avaliação dos serviços públicos de água norte americanos. Por meio da publicação *Distribution System Performance Evaluation*, os serviços foram avaliados sob os critérios relativos a quantidade, qualidade, confiabilidade e eficiência (Haider, 2014). Em 2004 essa associação desenvolveu um programa voluntário, denominado QualServe, destinado a auxiliar os prestadores de serviços realizar comparações e definir melhorias em seus processos (VILANOVA, 2012).

3.5.1.7 Indicadores da Inglaterra e País de Gales

A *Water Services Regulation Authority* – OFWAT (Agência Reguladora dos Serviços de Água) é o órgão responsável pelo monitoramento dos serviços de água e esgoto da Inglaterra e País de Gales que, em 1990, foram privatizados. A OFWAT, além de monitorar o desempenho, é responsável por regular os preços cobrados pelos serviços dessas empresas (OFWAT, 2015). Alguns indicadores avaliam, por meio de pesquisas realizadas com os clientes, a garantia e o nível de fornecimento

dos serviços. Destaca-se também, a importância dada aos indicadores ambientais, que anualmente verificam os níveis de emissão dos gases causadores de efeito estufa. (HAIDER *et al.*, 2014).

3.5.1.8 Indicadores NRC, Canadá

O *National Research Council of Canada* – NRC (Conselho Nacional de Pesquisa do Canadá) desenvolveu um quadro para avaliação do estado, desempenho e gestão de seus bens e serviços. A estrutura do modelo consiste em três blocos: objetivos; critérios de avaliação; e, indicadores de desempenho. Os indicadores de desempenho medem a eficácia de uma decisão no sentido de satisfazer os critérios de avaliação correspondentes aos diferentes objetivos (NRC, 2009). Dos indicadores avaliados, o indicador que relaciona a quantidade de energia utilizada para realização de um serviço pela população é o único relacionado a eficiência energética.

3.5.2 Indicadores de eficiência relacionados ao uso de energia elétrica em estações elevatórias

3.5.2.1 SNIS IN_{058} – Índice de consumo de energia elétrica em sistemas de bombeamento

Conhecido na literatura nacional como consumo específico de energia (*CE*), esse indicador relaciona a quantidade média de energia requerida (intensidade energética) para elevar um metro cúbico de água (Equação 6).

$$IN058 = \frac{CE}{Vbomb} \quad (6)$$

em que:
CE é o consumo de energia no período de referência (kWh);
V_{bomb} é o volume bombeado no período de referência (m³).

Como relatado anteriormente, esse indicador é muito útil para acompanhar a eficiência do conjunto motobomba aliada à eficiência hidráulica. No entanto, não é recomendado para efetuar comparações entre sistemas com características topográficas distintas como, por exemplo, sistemas que operem com diferentes desníveis geométricos (DUARTE, 2008).

3.5.2.2 IWA Ph4 – Utilização da capacidade de bombeamento (%)

Esse indicador mede a capacidade de bombeamento remanescente no dia de maior consumo energético (ALEGRE *et al.*, 2004). Calculado a partir da razão entre o somatório do consumo energético (kWh) de todos os conjuntos motobomba de um sistema de bombeamento no respectivo dia de maior consumo durante o período de referência e a carga instalada (kW) multiplicada por 24 horas (excluindo-se a carga dos conjuntos motobomba reserva), conforme Equação 7.

$$Ph4 = \frac{D2}{(C7\ X\ 24)X100} \qquad (7)$$

em que:

C7 é a carga instalada no sistema de bombeamento (kW);

D2 é o somatório do consumo de energia para o dia de maior consumo energético (kWh).

3.5.2.3 IWA Ph5 – Consumo de energia normalizado [kWh/(m³x100 m)]

Também conhecido na literatura nacional como consumo específico de energia normalizado (*CEN*), esse indicador é definido como a quantidade média de energia necessária para elevar a 100 metros de altura manométrica a quantidade de 1 metro cúbico de água (Equação 8). Tem como objetivo solucionar as limitações do indicador consumo energético específico (*CE*), possibilitando a comparação entre sistemas com características diferentes.

Por exemplo, o valor de 0,4 kWh/m³ para 100 m corresponde a uma eficiência média de bombeamento de 9810 N x 100 m/ (3600 J/Wh)/ 400 Wh x 100 = 68% (ALEGRE *et al.*, 2004).

$$Ph5 = CEN = \frac{D1}{V\ X \frac{Hm}{100}} \quad (8)$$

em que:
D1 é o consumo de energia no período de referência (kWh);
V é o volume bombeado no período de referência (m³);
H_m é a altura manométrica do sistema (m).

3.5.2.4 IWA Ph6 – Consumo de energia reativa (%)

Esse indicador relaciona o consumo de energia reativa durante o período de referência com a energia total consumida nas estações elevatórias durante o período de referência. É definida pela Equação 9 (ALEGRE *et al.*, 2004).

$$Ph6 = \frac{D4}{D1\ x\ 100} \quad (9)$$

em que:
D1 é o consumo de energia no período de referência (kWh);
D4 é o consumo de energia reativa (kVar).

3.5.2.5 IWA Ph7 – Recuperação de energia (%)

O uso desse indicador é importante em países com captações nos quais os desníveis entre a origem e os locais de consumo são positivos. Relaciona a recuperação de energia por meio do uso de turbinas ou de bombas de eixo reversível, durante o período de referência, e a energia total consumida nas estações elevatórias (ALEGRE *et al.*, 2004). É calculado pela Equação 10.

$$Ph7 = \frac{D5}{D1\ x\ 100} \quad (10)$$

em que:
D1 é o consumo de energia no período de referência (kWh);
D5 é a recuperação de energia (Wh).

3.5.2.6 CEE_L – Consumo específico de energia por quilômetro de adutora

Gomes (2009) sugere o indicador Consumo Específico de Energia por quilômetro de adutora - CEE_L nos sistemas de bombeamento com longas adutoras. Esse indicador relaciona a quantidade de energia necessária para elevar um metro cúbico por km de adutora (Equação 11). A vantagem deste indicador é a possibilidade de comparação de diferentes instalações do desempenho energético em termos de perda de carga.

$$CEE\ L = \frac{CE}{Vbomb\ x\ L} \tag{11}$$

em que:
CE é o consumo de energia no período de referência (kWh);
V_{bomb} é o volume bombeado no período de referência (m³);
L é o comprimento da adutora (km).

3.5.3 Tendências de abordagem dos indicadores de eficiência energética

Nesta seção são apresentados alguns trabalhos relacionados aos indicadores de eficiência energética utilizados nos sistemas de abastecimento de água (SAA).

Pelli *et al.* (2000) descrevem dois indicadores práticos para avaliar o consumo de energia nos SAAs. Na definição desses indicadores, a energia gasta com iluminação, aquecimento e tratamento de água não foi incluída. O primeiro, denominado "I_1 - Indicador de Infraestrutura" descreve como a distribuição dos consumidores e das fontes de água influenciam no consumo de energia. Esse indicador é definido como a quantidade de energia mínima teórica necessária para recalcar um metro cúbico de água para fornecer uma pressão de 6 bar (60 m), que é a pressão média recebida pelos usuários na Suíça. O segundo indicador, definido como "I2 – Indicador de Qualidade" é determinado como a razão entre a energia total utilizada (para recalcar a água durante a mesma unidade de tempo) e a energia mínima teórica necessária. Esse indicador mostra a eficiência de todo o sistema de alimentação de água, que é determinada por fatores tais como a eficiência das

bombas, locação dos reservatórios e perda de água na rede. Os resultados dos cálculos são utilizados para estabelecer uma relação entre o valor do indicador de qualidade e a possibilidade de redução de energia, relação esta que permite avaliar como o sistema utiliza a energia. Os autores classificam os resultados do I_2, em relação ao consumo de energia, conforme apresentado na TABELA 12.

TABELA 12 – RELAÇÃO ENTRE O INDICADOR DE QUALIDADE I_2 E O CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

INDICADOR DE QUALIDADE – I_2	CONSUMO DE ENERGIA
< 2	Excelente
2 – 2,5	Bom
2,5 – 3,0	Mediana
3,0 – 4,0	Necessidade de melhorias
> 4,0	Necessidade de melhorias imediatas

FONTE: PELLI *et al.* (2000)

Os autores concluíram, entretanto, com os estudos que altos valores I_1 não significam que uma redução no consumo de energia possa ser realizada. Em alguns sistemas, foram encontrados baixos valores para I_1, porém, altos valores para I_2. Outra limitação dos indicadores propostos é que não levam em consideração as perdas de carga que ocorrem nas tubulações.

Duarte *et al.* (2008) apresentam a associação dos indicadores da IWA com outros três indicadores de eficiência energética para avaliação da eficácia de processos de gestão de energia em SAAs. No trabalho, indicam também a importância do uso dos indicadores consumo específico de energia por volume de água bombeada e faturada devido à vantagem de avaliar os efeitos das medidas no âmbito de programas de controle de perdas ou do uso eficiente da água. Entretanto, como já salientado anteriormente, relatam que esses indicadores não permitem a comparação entre sistemas com configurações diferentes e, portanto, não foram considerados no estudo.

Os indicadores propostos basearam-se nos conceitos de energia mínima e de energia supérflua. Ou seja, compararam a energia fornecida ao sistema com a energia mínima teórica (admitindo inexistência de perdas de carga no sistema) necessária para satisfazer os consumos em todos os nós sob a pressão mínima requerida em cada caso. A energia em função do tempo, ou seja, as potências de escoamento em um SAA foram ilustradas pelos autores, conforme FIGURA 12. Os autores esclarecem que os consumidores localizados na cota mais alta (z_1) ao

serem abastecidos com a potência mínima téorica necessária, implicará que os outros consumidores localizados em cotas mais baixas (z_2, z_i) recebam uma potência superior à necessária.

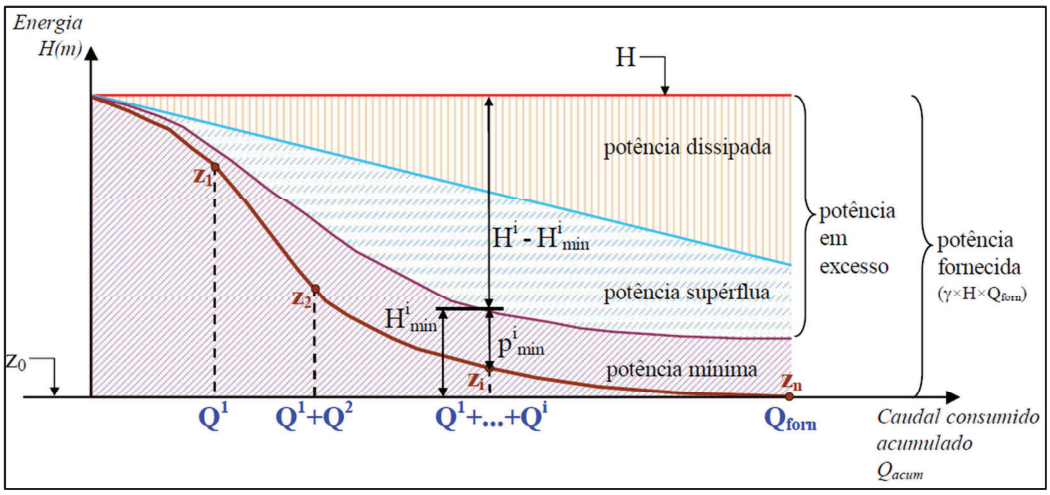


FIGURA 12 – POTÊNCIAS DE ESCOAMENTO EM UM SAA
FONTE: DUARTE *et al.* (2010)

A partir dessas considerações, os autores definiram três indicadores, definidos como Índices de Desempenho Global do Sistema, conforme segue:

- E1 – Energia em excesso por volume de entrada de água no sistema (kWh/m³ água de entrada no sistema), dada pela Equação 12:

$$E1 = \frac{Eexc}{Vforn} = \frac{\int Pexc\,(t)dt}{\int Qforn\,(t)dt} \qquad (12)$$

Esse indicador significa o potencial teórico de redução de energia por m³ de água que entra no sistema. Sua utilização não é adequada para avaliar os impactos das medidas de controle de perdas reais de água na eficiência energética do sistema, já que traduz na redução da vazão fornecida (Q_{forn}), que intervém no numerador e denominador não sendo evidente a variação do indicador. Da mesma forma, esse indicador não é adequado para comparar sistemas que possuem diferentes níveis de perdas de água. Entretanto, reflete a redução de perdas aparentes, uma vez que o numerador diminui (devido ao aumento da potência mínima decorrente do consumo autorizado nos nós) e o denominador se mantém (Duarte *et al.*, 2008).

- E2 – Energia em excesso por volume de água faturada (kWh/m³ água faturada), dada pela Equação 13:

$$E2 = \frac{Eexc}{Vfact} = \frac{\int Pexc\,(t)dt}{\int Qfact\,(t)dt} \quad (13)$$

Segundo os autores, o objetivo de utilizar o volume de água faturada no denominador é permitir que o indicador traduzisse o reflexo, em termos energéticos, de medidas de controle de perdas reais e aparentes de água. Ao reduzir as perdas reais, a potência fornecida diminui por conta de redução da vazão de entrada, traduzindo na redução do E2. Já ao reduzir as perdas aparentes, o índice E2 diminui, pois o numerador diminui (tal como E1) e aumenta o denominador.

- E3 – Razão de energia em excesso (adimensional), dada pela Equação 14. Esse indicador (o mesmo I_2 proposto por Pelli *et al.* (2000)) de forma direta, reflete o excesso teórico de energia que é fornecido ao sistema.

$$E3 = \frac{Eforn}{E\,min} = \frac{\int Pforn\,(t)dt}{\int Pmin\,(t)dt} \quad (14)$$

Os autores aplicaram os índices propostos a três sistemas de adução fictícios (com cotas diferentes e com o percentual de vazão não faturado igual para todos os sistemas). As conclusões foram as seguintes (Duarte *et al*., 2008):

- Os indicadores propostos permitem a comparação entre diferentes sistemas.
- Permitem verificar, dentre os sistemas analisados, qual possui maior potencial em termos de economia de energia.
- O indicador E1, definido em função do volume de água que entra no sistema, não traduz o efeito do controle de perdas reais. No entanto, reflete a redução de perdas aparentes, dado que o numerador diminui (devido ao aumento da potência mínima, decorrente do aumento autorizado do consumo), e o denominador se mantém.

- O indicador E2, definido em função do volume de água faturada, traduz em termos energéticos o efeito do controle de perdas reais e aparente de água. Ao reduzir as perdas reais, a potência fornecida diminui devido à vazão de entrada ser menor. No caso da redução das perdas aparentes, pelas mesmas justificativas de E1 e, simultaneamente, aumenta o denominador, razão pela qual o E2 traduz melhor o efeito da redução das perdas aparentes, quando da comparação com E1.
- Os indicadores E1 e E2, que são expressos por unidades de energia por volume de água, dão informações sobre o potencial teórico de economia de energia.
- O indicador E3 tem a vantagem sobre os indicadores E1 e E2, pois é de fácil interpretação. Entretanto, os autores afirmam que, a principal fragilidade do E3 é devido a sua dependência com o ponto de referência em que são medidas as cargas hidráulicas. Diante dessa preocupação, é importante convencionar que, em cada sistema, a cota topográfica de referência (zero) seja a do ponto de consumo com a menor cota. Essa preocupação não ocorre no cálculo dos indicadores E1 e E2, pois, como são definidos por uma diferença de energia, esse efeito do referencial desaparece.
- A limitação do uso dos indicadores, conforme relatado pelos autores, são pelo fato de não traduzirem de forma direta o potencial da real economia de energia e apenas o potencial teórico. Dessa forma, não refletem, por exemplo, o efeito resultante de alterações da configuração do sistema ou de outras intervenções de reabilitação (por exemplo, substituição de adutoras por outras com menor perda de carga), que associadas a outras medidas, permitem reduzir a energia fornecida.

Cabrera *et al.* (2010) propuseram 5 indicadores, com base em uma auditoria energética, para avaliar a eficiência energética global dos SAAs, em busca de verificar a quantidade de energia desperdiçada devido às perdas de água existentes nas redes de distribuição. Para tanto, aplicaram os indicadores propostos a um exemplo numérico de um SAA praticamente plano, partindo de uma estação elevatória, que recalca a água de um reservatório para uma rede de distribuição e para um reservatório de ponta. Realizaram uma simulação hidráulica com auxílio do

Software EPANET, considerando dois cenários, um real (com perdas) e outro cenário sem perdas de água, sem perdas de carga e com o mínimo de pressão necessária.

O primeiro indicador (I1) é a razão entre a energia real que entra no sistema e a energia mínima. A energia mínima é definida como a soma da energia necessária para atender a mínima demanda e pressão na rede. O segundo (I2) é uma medida da eficiência da utilização da energia injetada no sistema. É obtido pela razão entre a energia utilizada e a energia que entra no sistema. O I3 representa a capacidade hidráulica da rede, já que é uma razão entre a energia relacionada com as perdas de carga e a energia injetada no sistema. Altos valores desse indicador indicam uma baixa eficiência. Entretanto, segundo os autores, reduzir esse valor pode implicar em soluções onerosas. Nesse caso, valores de referência para esse indicador dependem de estudos entre o custo e o benefício. O quarto indicador, I4, mede a perda de energia devido aos vazamentos. O indicador é obtido pela razão entre o somatório das perdas de energias dada pelos vazamentos e pela energia adicional fornecida ao sistema devido às perdas de carga nas tubulações, pela energia injetada ao sistema. Por fim, o indicador I5 mede a relação direta entre a energia entregue aos usuários e a energia útil mínima exigida.

Os autores concluíram que os indicadores propostos podem ser comparados e os resultados dos indicadores para o cenário sem vazamento foram menores do que aquele no cenário real. Destacaram os resultados encontrados para o indicador I4, que no cenário sem perdas, o valor encontrado foi zero, e para o cenário real foi de 0,30, ou seja, um acréscimo de 30% de energia foi ofertado ao sistema devido às perdas de água (e demais perdas associado às perdas de água). Por fim, concluíram que a ferramenta e os indicadores propostos são úteis para avaliar os potenciais de melhorias para o sistema avaliado, levando em consideração os cálculos da energia mínima útil. Entretanto, cabe destacar que a metodologia proposta não verifica a energia consumida pelas bombas, o que impossibilita a avaliação da eficiência dos conjuntos motobomba.

Esse modelo foi aplicado por Scanlan *et al.*(2015) em três SAAs distintos de Ontario, província do Canadá. Os autores concluíram que o indicador que identifica o excesso de energia fornecida, I1, foi eficaz na previsão de quais sistemas tem o maior potencial para melhorias. Verificaram, a partir da comparação dos resultados de I4, que a economia de energia é relativamente proporcional ao volume de água

perdida devido aos vazamentos e que, o excesso de pressão entregue aos usuários é responsável pelo maior consumo de energia, a partir da comparação de I5 com os demais indicadores.

Gay *et al.* (2012) desenvolveram um método de medição da eficiência energética para sistemas de bombeamento de água bruta. O método foi denominado pelos autores como T*hermodynamic Score* (TS) e é definido como a razão entre a energia mínima requerida e a energia utilizada atual. O método foi aplicado a doze sistemas diferentes do Estado de Virgínia (Estados Unidos) e seus resultados comparados com os resultados de *benchmarking* apresentados pela *Water Research Foundation* (WRF). Os autores concluíram que o método pode complementar os resultados de *benchmarking* de forma a contribuir com mais informações sobre a eficiência energética de um determinado sistema. Entretanto, salientam que a metodologia proposta pode resultar em valores indesejáveis do TS quando da realização de grandes investimentos no sistema, indicando um valor menor de eficiência quando, na realidade, ocorreram acréscimos de eficiência. Alertam também, que a metodologia proposta limita-se apenas aos sistemas de bombeamento de água bruta.

Lenzi *et al.* (2013) propuseram novos indicadores para avaliar como a estrutura de rede, a taxa de vazamento e a operação de conjuntos motobomba podem afetar a eficiência energética dos SAAs. A energia efetivamente consumida pelas bombas pode ser definida comparando-a com a energia mínima necessária. Dessa forma, o primeiro indicador, denominado como WSEE é definido pela razão entre a energia mínima e a energia efetivamente utilizada pelas bombas. Os autores esclarecem que esse indicador permite uma avaliação abrangente da eficiência energética, mas não permite identificar a porcentagem com que as bombas e a estrutura das redes contribuem especificamente na rede de distribuição. De forma a solucionar essa limitação, o WSEE foi decomposto pelos autores em três outros indicadores: o NEE, que analisa o impacto da estrutura da rede; o LEE, que analisa o impacto realizado devido aos vazamentos e o PEE, relacionado com a operação das bombas.

Os indicadores propostos foram aplicados em dois SAAs da Itália com o auxilio do *software* de simulação hidráulica EPANET, para um período estendido de 24 horas. Os autores concluíram que os indicadores podem ser usados para comparar diferentes sistemas e que o conhecimento das proporções entre os

componentes energéticos individuais pode ajudar a avaliar a melhor estratégia na busca pela eficiência energética de um SAA.

A fim de refinar a metodologia elaborada por Cabrera *et al.* (2010), uma nova proposta para avaliação da eficiência energética foi apresentada por Bolognesi *et al.* (2014), que partiu de um novo conceito para a energia mínima útil (UME), considerando também o *layout*, o comprimento das redes e a topografia, constituindo uma base mais realista. A partir da nova definição da UME, os autores propuseram o indicador de eficiência energética (EEI). Esse indicador relaciona a UME com a energia efetivamente consumida e foi utilizado como função dentro de um problema de otimização multiobjetivo: minimizar a energia efetivamente consumida, melhorar desempenho na energia gasta e maximizar o EEI. Várias combinações para otimização do sistema foram propostas e, devido à complexidade, utilizou o algoritmo *Ghest* juntamente com *software* de simulação hidráulica EPANET.

A metodologia foi testada em um SAA, partindo de uma estação elevatória que recalca a água de um reservatório para uma rede de distribuição e para um reservatório de ponta, e validada a partir do aumento de EEI, já que houve redução na energia utilizada nas diversas combinações propostas.

Diferentemente das propostas apresentadas até o momento, Hashemi *et al.* (2015) apresentaram cinco métricas para avaliar as transformações de energia que ocorrem individualmente nas tubulações das redes de distribuição de água. Segundo os autores as novas métricas proporcionam uma forma de avaliar a eficácia das estratégias, como a substituição de adutoras principais e pela conservação da água de forma a eliminar o *deficit* ou o excedente de energia entregue aos usuários ou em outro lugar a jusante da tubulação.

A primeira métrica M1 relaciona a energia mínima requerida pelo usuário com a energia fornecida. O valor máximo para M1 é igual a 1,0 e significa que toda a energia fornecida é utilizada pelo usuário. O valor mínimo, igual a 0, significa que nenhuma energia fornecida foi utilizada. A segunda, M2, compara a energia requerida pelos usuários pela diferença entre a energia fornecida, a energia relativa às perdas de água e pelas perdas de carga na tubulação. A terceira métrica, M3, relaciona a energia requerida pelo usuário com a energia mínima requerida pelo usuário. Valores abaixo de 1,0 para esse indicador significam que há um *deficit* de energia. Já um valor igual a 1,0 significa que energia entregue é a mesma energia

requerida pelo usuário e um valor maior que 1,0 indica um excedente. A métrica M4 verifica a quantidade de energia perdida devido às perdas de carga nas tubulações enquanto a métrica M5 verifica a quantidade de energia perdida devido às perdas de água.

Os autores aplicaram as métricas a dois sistemas simples de distribuição de água com o auxílio do *software* de simulação hidráulica EPANET. Eles verificaram que o desempenho energético pode variar consideravelmente entre os sistemas de distribuição. Os autores verificaram também que as tubulações próximas às elevatórias e reservatórios são as que podem influenciar sobre a eficiência energética do SAA. Essas observações podem subsidiar as futuras ações de forma verificar a relação custo e benefício para reduzir os custos com energia elétrica. Por fim, os autores sugerem a aplicação do método em um sistema real e mais complexo.

PULEO *et al*. (2015) propuseram alguns indicadores de desempenho de forma a identificar a interdependência das perdas de água, o consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa (GEE) no desempenho dos SAAs. Os indicadores foram utilizados para comparar diferentes cenários de mitigação, envolvendo recuperação de energia, soluções para redução de energia e de perdas de água, a partir de uma perspectiva multiobjetivo considerando aspectos econômicos e ambientais. A aplicação do método foi realizada no SAA que abastece a cidade de Palermo, na Itália. Para análise do consumo energético, os autores formularam os seguintes indicadores (Equações (15), (16) e (17)):

$$EN1 = \frac{Ec - Ep}{Vs} \tag{15}$$

$$EN2 = \frac{Ec - Ep}{INHAB} \tag{16}$$

$$EN3 = \frac{CARL}{Vs\ X\ EN1} \tag{17}$$

em que:

E_c é a energia consumida (kWh);

E_p é a energia recuperada (kWh);

V_s é o volume de entrada (m³);

INHAB é o número de habitantes (hab);
CARL é o volume de perdas reais (m^3).

Os autores concluíram que o método demonstrou ser uma ferramenta importante para comparação das soluções de forma a proporcionar uma visão global sobre o impacto dos cenários de mitigação no processo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O método para avaliação do desempenho energético de estações elevatórias de SAAs foi elaborado tomando como referência várias orientações encontradas na revisão de literatura, como aquelas, por exemplo, apresentadas por Gomes (2009) para realização de diagnóstico de SAAs e estruturado em cinco etapas, conforme ilustrado na FIGURA 13.

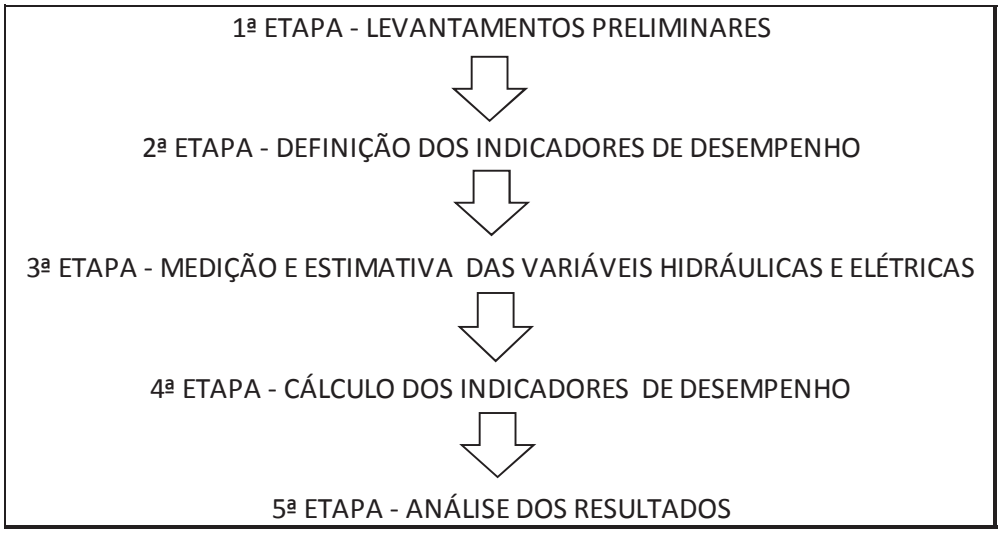


FIGURA 13 – ESTRUTURA DO MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS DE SAAs
FONTE: O AUTOR (2015)

A primeira etapa refere-se ao levantamento das informações relevantes do sistema a ser estudado. Nessa etapa é importante buscar documentos e dados operacionais e conferi-los em campo. À segunda etapa compete a definição de quais indicadores de desempenho a operadora do sistema pretende acompanhar ao longo dos anos, em suas ações de monitoramento. Na terceira etapa, são realizadas as medições e estimativas das variáveis hidráulicas e elétricas para o cálculo dos indicadores definidos na segunda etapa. Na quarta etapa, por sua vez, são realizados os cálculos dos indicadores de desempenho. Por fim, a quinta etapa compreende a análise dos resultados das etapas anteriores.

A seguir serão apresentadas as etapas estruturantes do método ora proposto.

1ª Etapa: Levantamentos preliminares

Nesse primeiro momento, deve ser realizado o levantamento de projetos, documentos e outras fontes de informações (incluindo visitas de campo) relevantes do sistema a ser estudado. Dentre as principais fontes, destaca-se o croqui hidráulico instrumentado do sistema, os projetos e memórias de cálculo, as informações técnicas dos equipamentos, as informações dos instrumentos de medição e controle e as faturas de energia.

O croqui hidráulico instrumentado do sistema é o documento que representa esquematicamente as principais unidades do sistema, tais como captação, estação de tratamento de água, estações elevatórias, adutoras, reservatórios, rede de distribuição e instrumentos de medição e controle.

Nos projetos e memórias de cálculo devem ser identificadas as cotas dos pontos notáveis (eixos das bombas, níveis operacionais dos reservatórios e cotas dos sensores de pressão), as características técnicas (diâmetro e tipo de material) das adutoras, tubulações de sucção e recalque, conexões e acessórios, curva do sistema e ponto de trabalho.

Nos documentos que contenham as especificações técnicas dos equipamentos e levantamentos de campo, devem ser identificados os dados de placa do motor (tipo, modelo, fabricante, número de fases, tensão, corrente, rotação nominal, rendimento e fator de potência), os dados da placa da bomba (tipo, modelo, fabricante, vazão nominal, rotor e altura manométrica nominal), e as curvas características da bomba instalada (curva da bomba, rendimento e potência).

No levantamento de informações acerca dos instrumentos de medição e controle, devem ser identificados os medidores de vazão, sensores de pressão, sensores de níveis, medidores de energia elétrica, bem como as suas localizações.

O levantamento das faturas de energia elétrica é importante porque fornecem dados como o consumo de energia elétrica, a demanda contratada, a demanda fornecida e o fator de potência, para cada período de referência considerado.

Importante ressaltar que essa primeira etapa compreende também a verificação em campo dos dados levantados durante a etapa, visando minimizar, na medida do possível, o risco de se trabalhar com informações inconsistentes, uma vez que o estado atual pode ser diferente daquele projetado.

2ª Etapa: Definição dos indicadores de desempenho

Os principais indicadores de desempenho relacionados ao consumo de energia elétrica em sistemas elevatórios, levantados por meio da revisão de literatura, estão sistematizados e descritos na seção 3.5.2 desse trabalho. Convém ressaltar, entretanto, que cabe à operadora do sistema definir quais indicadores de desempenho pretende acompanhar ao longo dos anos. Essa decisão deve levar em consideração os dados disponíveis para o cálculo dos indicadores.

Para essa proposta metodológica, foram selecionados os indicadores consumo específico de energia (*CE*), o consumo específico de energia normalizado (*CEN*) e o consumo específico de energia por quilômetro de adutora (CEE_L). Contribuiu para a escolha desses indicadores o fato que suas aplicações não necessitam de *softwares* de simulação hidráulica, o que permite que as equipes de operação e controle das companhias de saneamento possam realizar o monitoramento do consumo energético de seus sistemas de forma prática, rotineira e permanente.

Adicionalmente a estes indicadores, deve-se verificar o ponto de trabalho e calcular o rendimento global dos conjuntos motobomrba (η).

3ª Etapa: Medição e estimativa das variáveis hidráulicas

Para o cálculo dos indicadores de desempenho é necessário a medição de um conjunto de variáveis hidráulicas e elétricas. Importante destacar que as medições dessas variáveis devem ser realizadas simultaneamente e registradas em um banco de dados.

Variáveis hidráulicas

Para os indicadores selecionados nessa proposta, devem ser obtidos os dados das seguintes variáveis hidráulicas: vazão, altura manométrica, tempo de funcionamento do conjunto motobomba e o nível do reservatório.

A vazão, que é determinada pelo volume de água bombeado por um determinado período de tempo, pode ser medida por meio de medidores eletromagnéticos de vazão ou ultrassônico. Seu dimensionamento e instalação

devem seguir orientações do fabricante para não ocorrerem erros de medição por instalação inadequada.

A altura manométrica pode ser definida a partir da diferença entre a pressão de recalque e a de sucção. Nesse caso, os sensores de pressão devem estar instalados imediatamente a jusante e a montante do conjunto motobomba. Segundo Gomes (2009), os fabricantes das bombas preveem pontos perfurados nas flanges de entrada e saída da bomba para tal finalidade. Caso os sensores de pressão não estejam localizados imediatamente a jusante e a montante da bomba, as perdas de carga (localizadas e contínuas) e as diferenças de cota, entre o eixo da bomba e os sensores de pressão, precisam ser consideradas no cálculo da altura manométrica. Nos sistemas em que não existam informações das pressões de recalque e de sucção, a altura manométrica pode ser estimada. Nesses casos, faz-se necessária a construção da curva do sistema, por meio da somatória das estimativas das perdas de carga contínuas e localizadas (na sucção e no recalque), adicionado ao desnível geométrico. Entretanto, essa estimativa só é possível se houver o registro do volume bombeado no tempo e o desnível geométrico.

O tempo de funcionamento do conjunto motobomba pode ser realizado por meio de um horímetro ou por meio de registro de grandezas elétricas. Já o nível do reservatório deve ser medido com sensores de níveis para determinação dos desníveis geométricos.

Variáveis elétricas

No caso dos indicadores selecionados nessa proposta devem ser obtidos o consumo de energia elétrica e a potência ativa.

As informações de consumo de energia elétrica, geralmente, são obtidas por medidores de consumo das concessionárias de energia e, em alguns casos, pelas próprias companhias de saneamento. Nas situações em que há vários grupos de conjuntos motobomba e apenas uma medição, o consumo de energia de um determinado grupo pode ser estimado multiplicando a potência ativa pelo tempo de operação das bombas.

A potência ativa pode ser determinada em função da tensão elétrica (V), da corrente elétrica (I) e do fator de potência ($\cos\varphi$). Em circuitos monofásicos a potência ativa (Pa) pode ser definida pela Equação 18 e em circuitos trifásicos, pela Equação 19.

$$Pa = \frac{V\ x\ I\ x\ cos\varphi}{1000} \quad (18)$$

$$Pa = \frac{\sqrt{3}\ x\ V\ x\ I\ x\ cos\varphi}{1000} \quad (19)$$

Na impossibilidade de medir as variáveis elétricas, a energia elétrica consumida pode ser estimada a partir das faturas de energia elétrica, desde que, o consumo medido seja exclusivamente do grupo de conjuntos motobomba em estudo e que, os consumos devido a iluminação não sejam siginificativas.

4ª Etapa: Cálculo dos indicadores de desempenho

Uma vez estabelecidos os indicadores de desempenho a serem utilizados e realizadas as medições e estimativas necessárias para a obtenção dos dados de suas respectivas variáveis hidráulicas e elétricas, passa-se à etapa de cálculo dos indicadores.

Conforme já apresentado, os indicadores utilizados nessa proposta de metodologia são o consumo específico de energia (*CE*), expresso pela Equação 6, consumo específico de energia normalizado (*CEN*), expresso pela Equação 8, e o consumo específico de energia por quilômetro de adutora (CEE_L), expresso pela Equação 11.

5ª Etapa: Análise dos resultados

A partir dos resultados obtidos para cada indicador, a próxima etapa procederá à análise dos resultados. Para tanto, são apresentadas as seguintes sugestões:

1. Identificar inconsistências nos dados primários (por exemplo: leitura não efetuada, operação anormal) e retirá-los do processamento dos dados. Recomenda-se, portanto, retirar os dois valores anteriores e os dois posteriores a fim de evitar qualquer interferência nos resultados dos dados próximos a essas inconsistências;

2. Para cada ano, realizar o tratamento estatístico dos dados. Verificar no mínimo a média, o desvio padrão;
3. Realizar teste estatístico (teste t, ANOVA) sobre os resultados para verificar se os mesmos são significativamente semelhantes para o período da análise;
4. A partir dos valores de vazão e da altura manométrica, verificar o ponto de trabalho e rendimento e compará-los aos estabelecidos em projeto;
5. Avaliar o desempenho dos indicadores ao longo dos anos. Para o indicador *CEN*, comparar os resultados do ERSAR/LNEC conforme apresentado na TABELA 13;
6. Avaliar o impacto da sazonalidade sobre o desempenho energético das elevatórias;
7. Sugerir a necessidade da medição de dados adicionais para aferição dos resultados e de melhorias no sistema.

TABELA 13 – VALORES DE REFERÊNCIA DO INDICADOR *CEN* PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS SERVIÇOS

QUALIDADE DO SERVIÇO	VALORES DE REFERÊNCIA [kWh/(m³ x 100 m)]	EFICIÊNCIA DO CONJUNTO (%)
Excelente	[0,30; 0,35]	76 - 88
Boa	]0,36; 0,44]	75 - 61
Mediana	]0,45; 0,56]	60 – 48
Insatisfatória	]0,56; +∞[	< 48

FONTE: ADAPTADO DE ERSAR/ LNEC (2013)

5 ESTUDO DE CASOS

De forma a aplicar e aprimorar o método desenvolvido foram realizados dois estudos de caso em elevatórias do Sistema Integrado de Abastecimento de Água de Curitiba e Região Metropolitana (SAIC). O primeiro estudo de caso foi desenvolvido no “Sistema Iraí: estação elevatória de água tratada Tarumã/Jacob Macanhann”. Esse sistema foi selecionado porque possui instrumentos de medição e controle como, por exemplo, medidores de vazão, de pressão, do tempo de operação de cada conjunto motobomba, de tensão elétrica e corrente elétrica. O segundo estudo de caso foi realizado no “Sistema Cotia: estação elevatória de água bruta 01”. Esse sistema foi selecionado por não possuir muitos instrumentos de medição e controle, contando apenas com medidor de vazão e de tempo de bombeamento.

5.1 ESTUDO DE CASO 1 - SISTEMA IRAÍ: ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE ÁGUA TRATADA TARUMÃ/JACOB MACANHANN

1ª Etapa: Levantamentos preliminares

O primeiro estudo de caso é baseado nas estações elevatórias de água tratada (EET) B1 a B5, integrantes do Sistema Iraí, denominadas como Tarumã/Jacob Macanhann, localizadas no município de Pinhais, região metropolitana de Curitiba, Paraná, Brasil.

Esse grupo de elevatórias é constituído por cinco conjuntos motobomba (sendo uma reserva instalada) operando em paralelo, cujos eixos estão instalados na cota de 877,325 m. As elevatórias recalcam a água tratada do reservatório da ETA Iraí (cujo nível mínimo da água encontra-se na cota de NAmín = 874,50 m e o nível máximo da água encontra-se na cota de NAmáx = 879,90 m) para dois centros de reservação distintos, o Tarumã (Nmáx = 904,20 m) e o Jacob Macanhann (Nmáx = 926,35 m). O transporte da água é realizado por duas adutoras, uma com diâmetro de 900 mm (DN900) e outra com diâmetro de 1000 mm (DN1000) e 800 mm (DN800), totalizando 16,2 quilômetros. A pressão de saída das elevatórias é mensurada por um sensor de pressão (PT38) instalado no barrilete de recalque. Os sensores de níveis (LT68 e LT69) estão instalados no reservatório do Iraí (câmaras 1 e 2) e indicam o nível de água no reservatório, ou seja, a carga de água disponível

para as bombas. Já os medidores de vazão (FT45 e FT46) instalados nas adutoras (um na adutora com tubulação DN900 e outro na adutora com tubulação DN1000), medem o volume de água recalcado para cada um dos reservatórios. A FIGURA 14 apresenta o diagrama esquemático do descrito acima.

Conforme informações retiradas dos projetos, a sucção é dada por meio de um sino de sucção em aço de diâmetro DN800, afastado em 30 cm do fundo do reservatório. Também compõem o barrilete de sucção uma curva de 90°, uma válvula borboleta, uma junta de montagem e uma redução excêntrica. Já no recalque, os acessórios que compõem o barrilete, até o sensor de pressão PT38, são: uma redução concêntrica, uma válvula de retenção, uma válvula borboleta e uma curva de 45° (FIGURA 15).

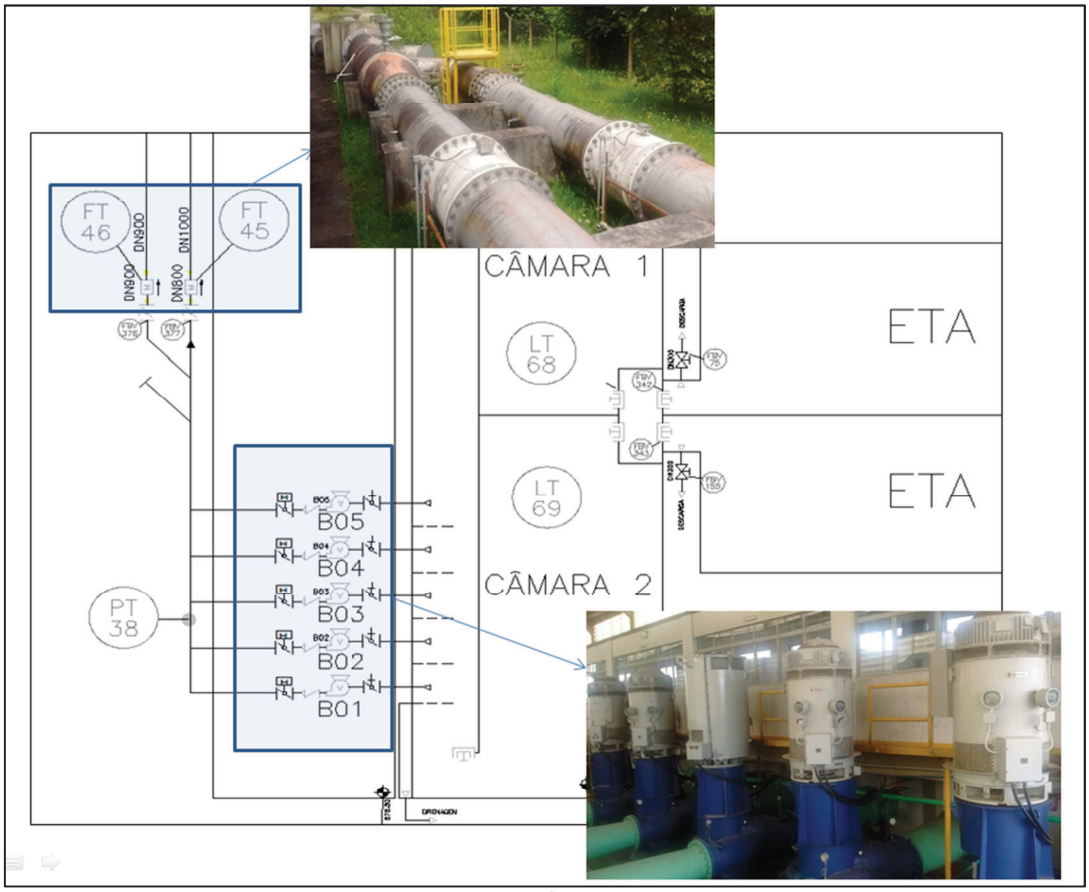


FIGURA 14 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS EET´S – B1 A B5, PT38, FT45, FT46, LT68 E LT69, DO SISTEMA IRAÍ
FONTE: ADAPTADO DE SANEPAR (2015)

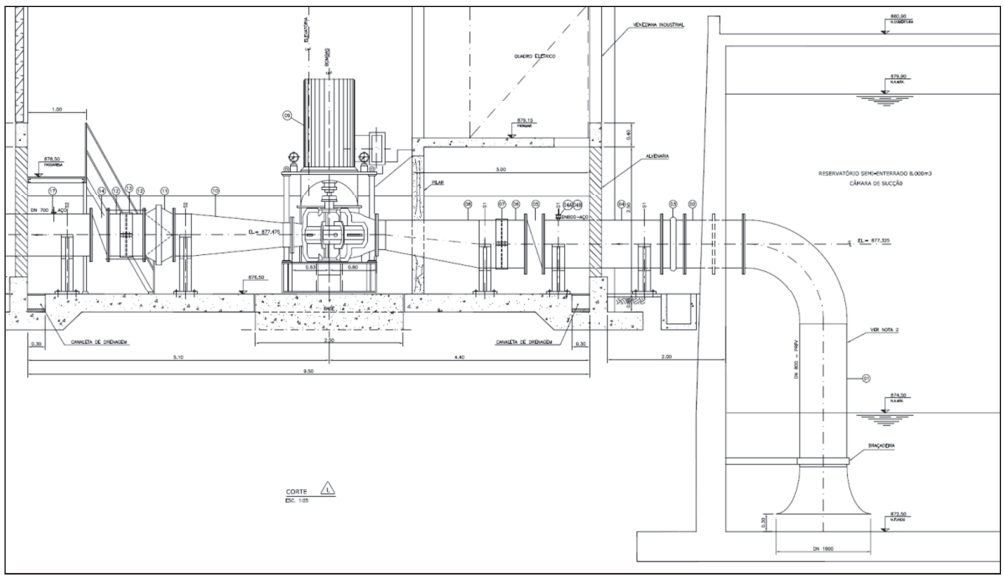


FIGURA 15 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS NÍVES DE ÁGUA E DO EIXO DA ESTAÇÃO ELEVATÓRIA TARUMÃ/ JACOB MACANHANN DO SAA IRAÍ
FONTE: SANEPAR (2015)

As bombas são bipartidas de eixo vertical e foram projetadas para funcionar de forma escalonada e operar sob diversas condições de níveis de água nos reservatórios. Algumas dessas condições estão apresentadas na TABELA 14 e nas curvas do sistema apresentadas na FIGURA 16.

TABELA 14 – PONTO OPERACIONAL DAS BOMBAS PARA DIVERSAS CONDIÇÕES DE NÍVEIS DE ÁGUA DOS RESERVATÓRIOS

CONDIÇÃO OPERACIONAL					PONTO OPERACIONAL (POR BOMBA)	
BOMBAS EM OPERAÇÃO	NÍVEL DE ÁGUA DO RESERVATÓRIO			OUTRAS CONDIÇÕES	VAZÃO Q [l/s]	ALTURA MANOMÉTRICA Hm [m]
	IRAÍ	JACOB MACANHANN	TARUMÃ			
4	médio	médio	médio	FCV* operando	737,07	57,83
4	máximo	mínimo	mínimo		803,07	53,90
4	máximo	máximo	máximo		723,11	58,65
4	máximo	mínimo	máximo		794,18	54,44
4	máximo	máximo	mínimo		727,86	58,37
4	mínimo	mínimo	mínimo		750,28	57,05
4	mínimo	máximo	máximo		665,19	62,01
4	mínimo	mínimo	máximo		741,88	57,55
4	mínimo	máximo	mínimo		668,46	61,83
4	médio	reservatório fechado	médio	FCV* desligada	726,83	58,43
3	médio	reservatório fechado	médio		849,21	51,11

*FCV - Válvula controladora de vazão. Válvula instalada na entrada do reservatório do Tarumã.
FONTE: SANEPAR (2015)

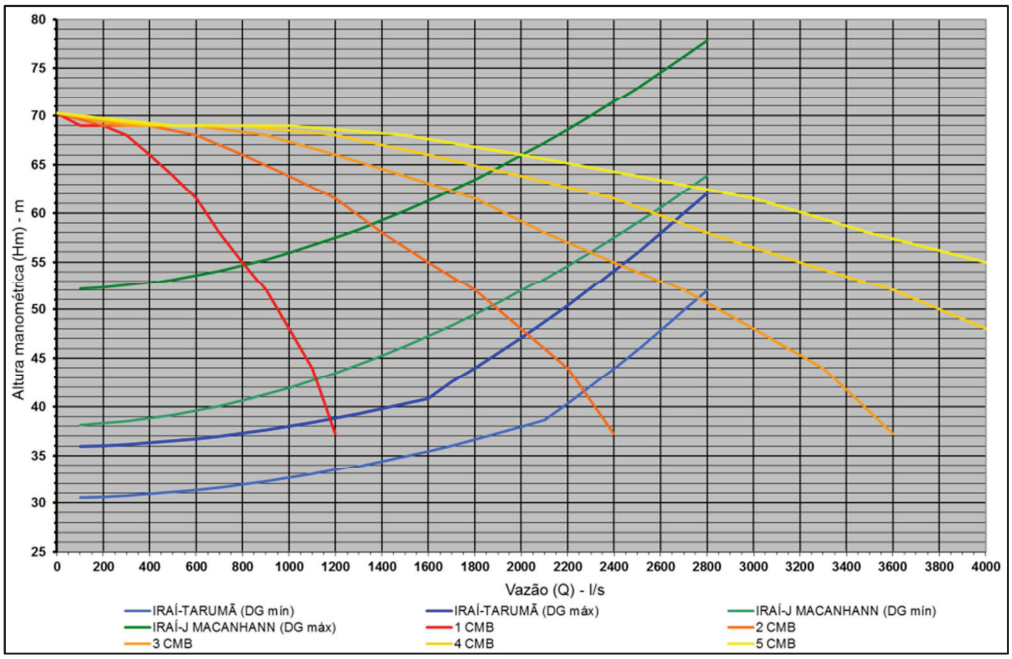


FIGURA 16 – CURVAS DO SISTEMA E PONTOS OPERACIONAIS EM FUNÇÃO DA QUANTIDADE DE BOMBAS OPERANDO E DOS NÍVEIS DE ÁGUA DOS RESERVATÓRIOS
FONTE: SANEPAR (2015)

Os dados de placa das bombas e dos motores acoplados a elas encontram-se nas TABELAS 15 e 16.

TABELA 15 – DADOS DE PLACA DAS BOMBAS DA EET TARUMÃ/JACOB MACANHANN (B1 A B5)

BOMBA	1	2	3	4	5
Marca	KSB	KSB	KSB	KSB	KSB
Tipo	RDL V 500-790F	RDL V 500-790F	RDL V 500-790F	RDL V 500-790F	RDL V 500-790F
Altura manométrica (m)	57	57	57	57	57
Vazão (l/s)	750	750	750	750	750
Rendimento (%)	88	88	88	88	88
Diâmetro do rotor (mm)	730	730	730	730	730
Velocidade (rpm)	880	880	880	880	880

FONTE: SANEPAR (2015)

TABELA 16 – DADOS DE PLACA DO MOTOR ACOPLADO ÀS BOMBAS DA EET TARUMÃO/JACOB MACANHANN (B1 A B5)

MOTOR	1	2	3	4	5
Marca/ Modelo	Gevisa	Gevisa	Gevisa	Gevisa	Gevisa
Potência (CV)	800	800	800	800	800
Tensão (V)	6600	6600	6600	6600	6600
Corrente (A)	63,2	63,2	63,2	63,2	63,2
Rotação (rpm)	884	884	884	884	884
Fator de potência	0,862	0,862	0,862	0,862	0,862
Rendimento (%)	94,5	94,5	94,5	94,5	94,5
Tipo de partida	Direta	Direta	Direta	Direta	Direta

FONTE: SANEPAR (2015)

A fatura de energia elétrica não foi obtida, nesse caso, porque o consumo de energia foi medido apenas na entrada da ETA. Ou seja, a energia consumida refere-se a todos os equipamentos existentes na ETA. Por parte da operadora do sistema, não existe medição individual do consumo de energia elétrica desse grupo de elevatórias. Entretanto, é realizada a medição, em tempo real, da tensão elétrica, da corrente elétrica e do tempo de funcionamento de cada uma das bombas.

2ª Etapa: Definição dos indicadores de desempenho

Conforme já apresentado, os indicadores utilizados neste estudo de caso são:

- *CE*: Consumo específico de energia;
- *CEN*: Consumo específico de energia normalizado;
- $CEE_{L:}$ Consumo específico de energia por quilômetro de adutora.

Além desses indicadores, também será verificado o ponto de trabalho e calculado o rendimento global do conjunto motobomba (η).

3ª Etapa: Medição e estimativa das variáveis hidráulicas

As variáveis hidráulicas e elétricas medidas diariamente pela operadora do sistema são armazenadas em um *software* de gerenciamento de dados denominado *Proficy Historian* (FIGURA 17). Para obtenção dessas variáveis, definiram-se previamente as informações de entrada, como o *tag name* (nomenclatura dada aos instrumentos de medição e controle), o período de referência (data de início e fim da pesquisa) e o intervalo de tempo desejado para o processamento dos dados.

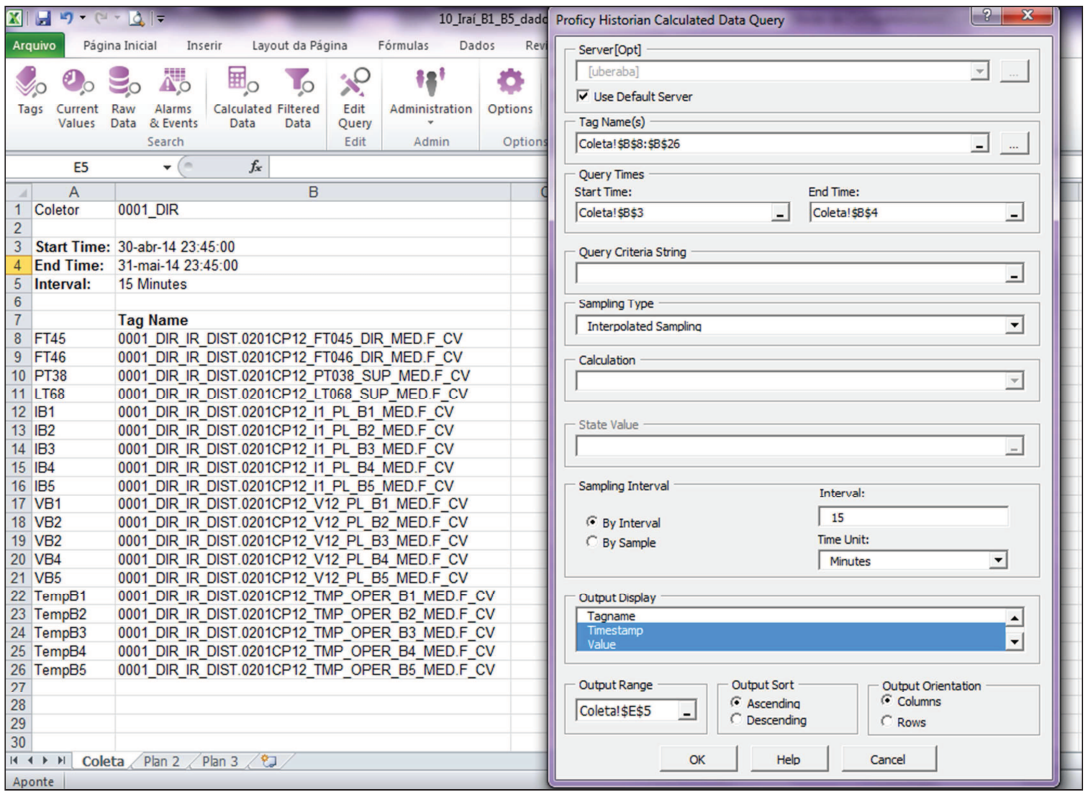


FIGURA 17 – APRESENTAÇÃO DO *SOFTWARE* DE GERENCIAMENTO DE DADOS (*PROFICY HISTORIAN*) UTILIZADO PARA OBTENÇÃO DAS VARIÁVEIS HIDRÁULICAS E ELÉTRICAS

FONTE: SANEPAR (2015)

Para o estudo de caso em questão, os dados em questão foram coletados diariamente, a cada 15 minutos, para o período de dois anos (janeiro de 2014 a dezembro de 2015). A tabulação dos dados contemplou o volume recalcado (m³), a carga de água disponível na sucção (m), a pressão de recalque (m), o tempo de funcionamento das bombas (horas), a tensão elétrica (kV) e a corrente elétrica (A) das bombas.

Os volumes de recalque foram obtidos pela somatória dos valores registrados para cada um dos medidores de vazão (FT45 e FT46). A estimativa da altura manométrica (H_m) foi obtida a partir da diferença entre o valor mensurado no sensor de pressão de recalque (PT38) acrescidas das perdas de carga entre o conjunto motobomba e o valor indicado pelo PT38, e o resultado da diferença entre o nível de água no reservatório (LT68) e o eixo da bomba (877,325 m) menos as perdas de carga no barrilete de sucção.

A fim de elucidar a explicação acima, as TABELAS 17, 18, 19 e 20 apresentam parcialmente as etapas necessárias para determinação do volume de água recalcado e da altura manométrica, para o mês de maio/2015. Entretanto,

ressalta-se que o processamento dos dados foi realizado para o período de dois anos (janeiro/2014 até dezembro/2015) e estão disponibilizados no CD anexado a este trabalho.

TABELA 17 – DADOS PARCIAIS DO VOLUME BOMBEADO PELOS MEDIDORES FT45 E FT46 REFERENTE AO MÊS DE MAIO/2015 (EXEMPLO)

DATA E HORA	A	B	A+B = C
	VOLUME ADUZIDO A CADA 15 MIN. – FT45 (m³)[1]	VOLUME ADUZIDO A CADA 15 MIN. – FT46 (m³)[1]	VOLUME ADUZIDO TOTAL – FT45 + FT46 (m³)[2]
01/05/2015 00:15	1160,00	808,00	1968,00
01/05/2015 00:30	1200,00	816,00	2016,00
01/05/2015 00:45	1176,00	820,00	1996,00
01/05/2015 01:00	1160,00	800,00	1960,00
: :	: :	: :	: :
31/05/2015 23:00	1192,00	824,00	2016,00
31/05/2015 23:15	1192,00	820,00	2012,00
31/05/2015 23:30	1200,00	824,00	2024,00
31/05/2015 23:45	1192,00	820,00	2012,00

[1] Valores obtidos pelo *software Proficy Historian*
[2] Valores calculados
FONTE: SANEPAR (2015)

TABELA 18 – DADOS PARCIAIS DA PRESSÃO DE RECALQUE REFERENTE AO MÊS DE MAIO/2015 (EXEMPLO)

DATA E HORA	D	E	F	D+E+F = G
	PRESSÃO NO PT38 (m)[1]	PERDA DE CARGA TOTAL ENTRE A BOMBA E O PT38 (m)[2]	DESNÍVEL ENTRE O PT38 E O EIXO DA BOMBA (m)[2]	PRESSÃO DE RECALQUE (m)[2]
01/05/2015 00:15	57,69	0,62	0,75	59,05
01/05/2015 00:30	57,69	0,62	0,75	59,05
01/05/2015 00:45	57,69	0,62	0,75	59,05
01/05/2015 01:00	57,69	0,62	0,75	59,05
: :	: :	: :	: :	: :
31/05/2015 23:00	62,14	0,62	0,75	63,50
31/05/2015 23:15	62,14	0,62	0,75	63,51
31/05/2015 23:30	62,14	0,62	0,75	63,51
31/05/2015 23:45	62,15	0,62	0,75	63,51

[1] Valores obtidos pelo *software Proficy Historian*
[2] Valores calculados
FONTE: SANEPAR (2015)

TABELA 19 – DADOS PARCIAIS DA PRESSÃO DE SUCÇÃO REFERENTE AO MÊS DE MAIO/2015 (EXEMPLO)

DATA E HORA	H	I	J	I+J = K	K-H = L	M	L-M = N
	NÍVEL EIXO DA BOMBA (m)	NA MÍN. DO RESERV. IRAÍ (m)	SENSOR DE NÍVEL LT68 (m)[1]	NA FINAL (NÍVEL MÍN. + LT68) (m)[2]	ALTURA DE SUCÇÃO H_s (m)[2]	PERDA DE CARGA TOTAL NA SUCÇÃO H_f (m)[2]	PRESSÃO DE SUCCÇÃO (m)[2]
01/05/2015 00:15	877,33	874,50	4,95	879,45	2,12	0,13	1,99
01/05/2015 00:30	877,33	874,50	4,94	879,44	2,12	0,13	1,99
01/05/2015 00:45	877,33	874,50	4,94	879,44	2,11	0,13	1,98
01/05/2015 01:00	877,33	874,50	4,95	879,45	2,13	0,13	2,00
: :	: :	: :	: :	: :	: :	: :	: :
31/05/2015 23:00	877,33	874,50	4,34	878,84	1,51	0,13	1,38
31/05/2015 23:15	877,33	874,50	4,34	878,84	1,51	0,13	1,38
31/05/2015 23:30	877,33	874,50	4,34	878,84	1,52	0,13	1,39
31/05/2015 23:45	877,33	874,50	4,34	878,84	1,52	0,13	1,39

[1] Valores obtidos pelo *software Proficy Historian*
[2] Valores calculados
FONTE: SANEPAR (2015)

TABELA 20 – DADOS PARCIAIS DA ALTURA MANOMÉTRICA REFERENTE AO MÊS DE MAIO/2015 (EXEMPLO)

DATA E HORA	G	N	G-K = L
	PRESSÃO DE RECALQUE (m)	PRESSÃO DE SUCCÇÃO (m)[1]	ALTURA MANOMÉTRICA *Hm* - (m)[1]
01/05/2015 00:15	59,05	1,99	57,06
01/05/2015 00:30	59,05	1,99	57,06
01/05/2015 00:45	59,05	1,98	57,07
01/05/2015 01:00	59,05	2,00	57,05
: :	: :	: :	: :
31/05/2015 23:00	63,50	1,38	62,12
31/05/2015 23:15	63,51	1,38	62,12
31/05/2015 23:30	63,51	1,39	62,12
31/05/2015 23:45	63,51	1,39	62,13

[1] Valores calculados
FONTE: SANEPAR (2015)

A estimativa da potência ativa P_a (kW), dada pela Equação 19, foi realizada para todas as elevatórias. Como o fator de potência (cosφ,) não é medido, atribui-se, para todos os casos, o valor de 0,95 para o *cosφ*, que é o valor corrigido do fator de potência nominal da placa do motor que, segundo a Resolução n° 456/2000, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), devem ser maiores que 0,92. Já para o cálculo da energia elétrica consumida EE_{cons} (kWh), realizou-se o produto da potência ativa P_a pelo tempo de funcionamento de cada uma das bombas.

Por fim, a potência ativa e a energia elétrica total consumida pelos conjuntos motobomba foram dadas pelo somatório dos resultados dessas variáveis de cada um dos conjuntos motobomba.

Para elucidar o descrito acima, os resultados encontrados para o mês de maio/2015, da potência ativa e da energia elétrica consumida pela bomba 1, estão parcialmente apresentados na TABELA 21. As TABELAS 22 e 23 ilustram o cálculo da potência ativa e da energia elétrica total consumida pelos conjuntos motobombas. Entretanto, ressalta-se que o processamento dos dados foi realizado para o período de dois anos (janeiro/2014 até dezembro/2015) e estão disponibilizados no CD anexado a este trabalho.

TABELA 21 – DADOS PARCIAIS DA POTÊNCIA ATIVA E DA ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA PARA O CONJUNTO MOTOBOMBA B1 REFERENTE AO MÊS DE MAIO/2015 (EXEMPLO)

DATA E HORA	CM B1				
	TEMPO DE FUNCIONAMENTO DA BOMBA (h)[1]	TENSÃO ELEÉTRICA (Kv)[1]	CORRENTE ELÉTRICA (A)[1]	POTÊNCIA ATIVA (kW)[2]	ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA (kWh)[2]
01/05/2015 00:15	0,25	6,53	61,00	655,73	163,29
01/05/2015 00:30	0,25	6,53	61,00	655,73	163,29
01/05/2015 00:45	0,25	6,53	61,00	655,73	163,29
01/05/2015 01:00	0,25	6,53	61,00	655,73	163,29
: :	: :	: :	: :	: :	: :
31/05/2015 23:00	0,11	6,53	49,67	534,07	57,63
31/05/2015 23:15	0,11	6,53	49,83	535,80	57,82
31/05/2015 23:30	0,11	6,53	49,99	537,54	58,27
31/05/2015 23:45	0,11	6,53	50,15	539,27	58,19

[1] Valores obtidos pelo *software Proficy Historian*
[2] Valores calculados
FONTE: SANEPAR (2015)

TABELA 22 – DADOS PARCIAIS DA POTÊNCIA ATIVA CONSUMIDA PARA OS CONJUNTOS MOTOBOMBA REFERENTE AO MÊS DE MAIO/2015 (EXEMPLO)

DATA E HORA	CM B1	CM B2	CM B3	CM B4	CM B5	POTÊNCIA ATIVA TOTAL CONSUMIDA (kW)[1]
	POTÊNCIA ATIVA (kW)[1]	POTÊNCIA ATIVA (kW)[1]	POTÊNCIA ATIVA (kW)[1]	POTÊNCIA ATIVA (kW)[1]	POTÊNCIA ATIVA (kW)[1]	
01/05/2015 00:15	655,73	0,00	660,54	645,77	0,00	1962,047
01/05/2015 00:30	655,73	0,00	660,54	645,77	0,00	1962,047
01/05/2015 00:45	655,73	0,00	660,54	645,77	0,00	1962,047
01/05/2015 01:00	655,73	0,00	660,54	645,77	0,00	1962,047
:	:	:	:	:	:	:
31/05/2015 23:00	534,07	583,09	165,63	583,29	584,38	2450,462
31/05/2015 23:15	535,80	583,05	163,76	583,25	584,38	2450,258
31/05/2015 23:30	537,54	583,01	161,90	583,22	584,38	2450,054
31/05/2015 23:45	539,27	582,98	160,04	583,18	584,38	2449,849

[1] Valores calculados
FONTE: SANEPAR (2015)

TABELA 23 – DADOS PARCIAIS DA ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA PARA OS CONJUNTOS MOTOBOMBA REFERENTE AO MÊS DE MAIO/2015 (EXEMPLO)

DATA E HORA	CM B1	CM B2	CM B3	CM B4	CM B5	EE_{cons} TOTAL (kWh)[1]
	EE_{cons} (kWh)[1]	EE_{cons} (kWh)[1]	EE_{cons} (kWh)[1]	EE_{cons} (kWh)[1]	EE_{cons} (kWh)[1]	
01/05/2015 00:15	163,29	0,00	164,49	160,81	0,00	488,596
01/05/2015 00:30	163,29	0,00	164,49	160,81	0,00	488,596
01/05/2015 00:45	163,29	0,00	164,49	160,81	0,00	488,596
01/05/2015 01:00	163,29	0,00	164,49	160,81	0,00	488,596
:	:	:	:	:	:	:
31/05/2015 23:00	57,63	58,08	26,12	136,99	132,68	411,513
31/05/2015 23:15	57,82	58,08	25,83	136,70	132,97	411,394
31/05/2015 23:30	58,27	58,07	25,61	136,98	132,68	411,616
31/05/2015 23:45	58,19	58,07	25,24	136,68	132,97	411,156

FONTE: SANEPAR (2015)

4ª Etapa: Cálculo dos indicadores de desempenho

Uma vez mensuradas as variáveis hidráulicas e elétricas (ou estimadas, quando da impossibilidade ou inviabilidade da medição), calcularam-se o consumo específico de energia (*CE*), o consumo específico de energia normalizada (*CEN*), o consumo específico de energia por quilômetro de adutora (CEE_L) e o rendimento dos conjuntos motobomba (η).

A TABELA 24 ilustra parte dos resultados calculados para os indicadores CE, CEN, CEE_L e η – os dados processados contemplam um o período de dois anos

(janeiro/2014 a dezembro/2015) e estão disponibilizados no CD anexado a este trabalho.

TABELA 24 – DADOS PARCIAIS DOS INDICADORES CE, CEN, CEE_L E DO RENDIMENTO GLOBAL DOS CONJUNTOS MOTOBOMBAS REFERENTE AO MÊS DE MAIO/2015 (EXEMPLO)

DATA E HORA	CE (kWh/m³)	CEN (kWh/m³/100m)	CEE_L (kWh/m³xkm)	η (%)
01/05/2015 00:15	0,25	0,44	0,015	63,59
01/05/2015 00:30	0,24	0,42	0,015	65,15
01/05/2015 00:45	0,24	0,43	0,015	64,51
01/05/2015 01:00	0,25	0,44	0,0159	63,33
: :	: :	: :	: :	: :
31/05/2015 23:00	0,20	0,33	0,013	56,78
31/05/2015 23:15	0,20	0,33	0,013	56,68
31/05/2015 23:30	0,20	0,33	0,013	57,02
31/05/2015 23:45	0,20	0,33	0,013	56,70

FONTE: SANEPAR (2015)

5ª Etapa: Análise dos resultados

Para o estudo de caso 1, referente às EETs Tarumã/Jacob Macanhann, do SAA Iraí, observou-se que o comportamento do volume recalcado, ao longo do tempo, é similar aquele registrado para a energia elétrica consumida (GRÁFICOS 3 e 4). Observou-se também que, para o ano de 2014, no período entre abril e julho, houve uma redução no volume recalcado e da energia elétrica consumida quando comparado com os demais meses desse ano. Essa redução pode ser explicada pelo fato de serem meses com temperaturas mais baixas do que os demais meses do ano, o que reflete em uma demanda de água menor por parte dos consumidores, refletindo na diminuição de água recalcada.

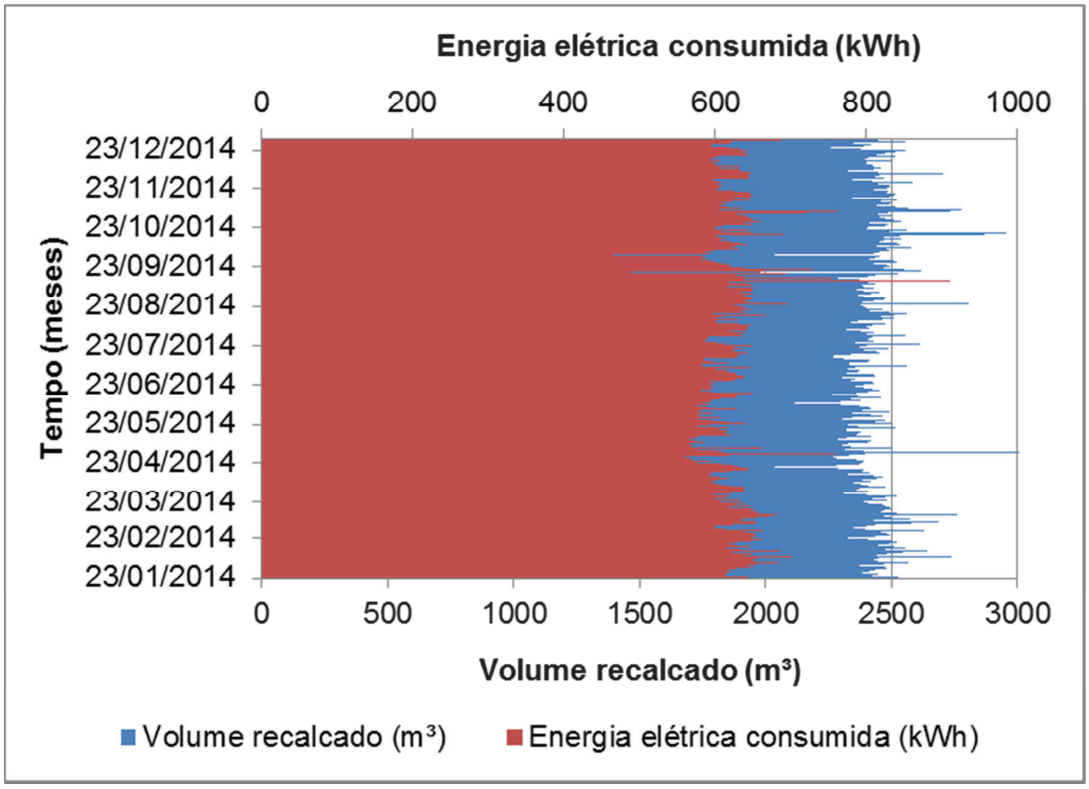


GRÁFICO 3 – COMPORTAMENTO DO VOLUME RECALCADO E DA ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA A CADA 15 MINUTOS AO LONGO DO ANO DE 2014 PARA A ESTAÇÃO ELEVATÓRIA TARUMÃ/JACOB MACANHANN

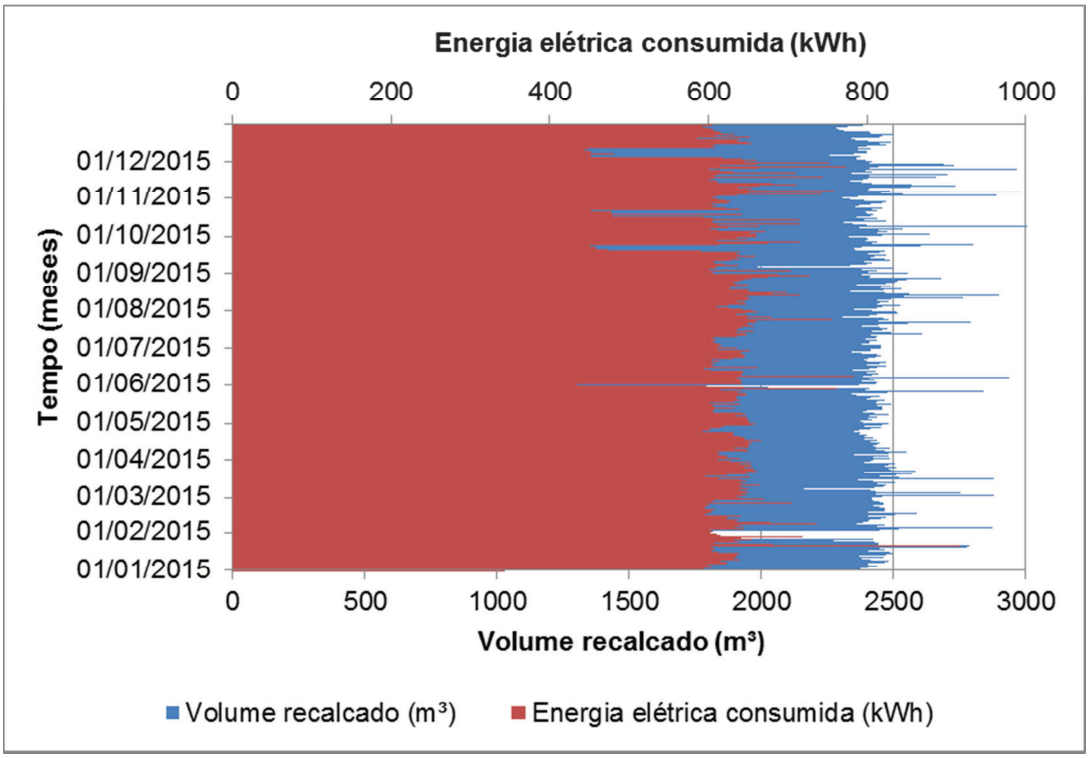


GRÁFICO 4 – COMPORTAMENTO DO VOLUME RECALCADO E DA ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA A CADA 15 MINUTOS AO LONGO DO ANO DE 2015 PARA A ESTAÇÃO ELEVATÓRIA TARUMÃ/JACOB MACANHANN

Verificou-se, ao inserir os dados estimados para a vazão e altura manométrica no gráfico das curvas do sistema com as curvas da bomba, que o sistema está apresentando um comportamento operacional dentro da faixa concebida no projeto. Essa situação pode ser observada nas FIGURAS 18 e 19, uma vez que cada ponto de operação calculado está dentro da faixa estipulada pelas curvas do sistema. Ressalta-se, entretanto, que para melhor visualização, os dados apresentados referem-se apenas aos meses de fevereiro, maio, agosto e novembro do ano de 2014 e de 2015, respectivamente.

Importante ressaltar que essa avaliação pode ser realizada periodicamente pela operação do sistema. Caso os dados operacionais não estejam apresentando um comportamento esperado pelo projeto, deve-se realizar uma avaliação do sistema a fim de identificar as possíveis causas para o problema.

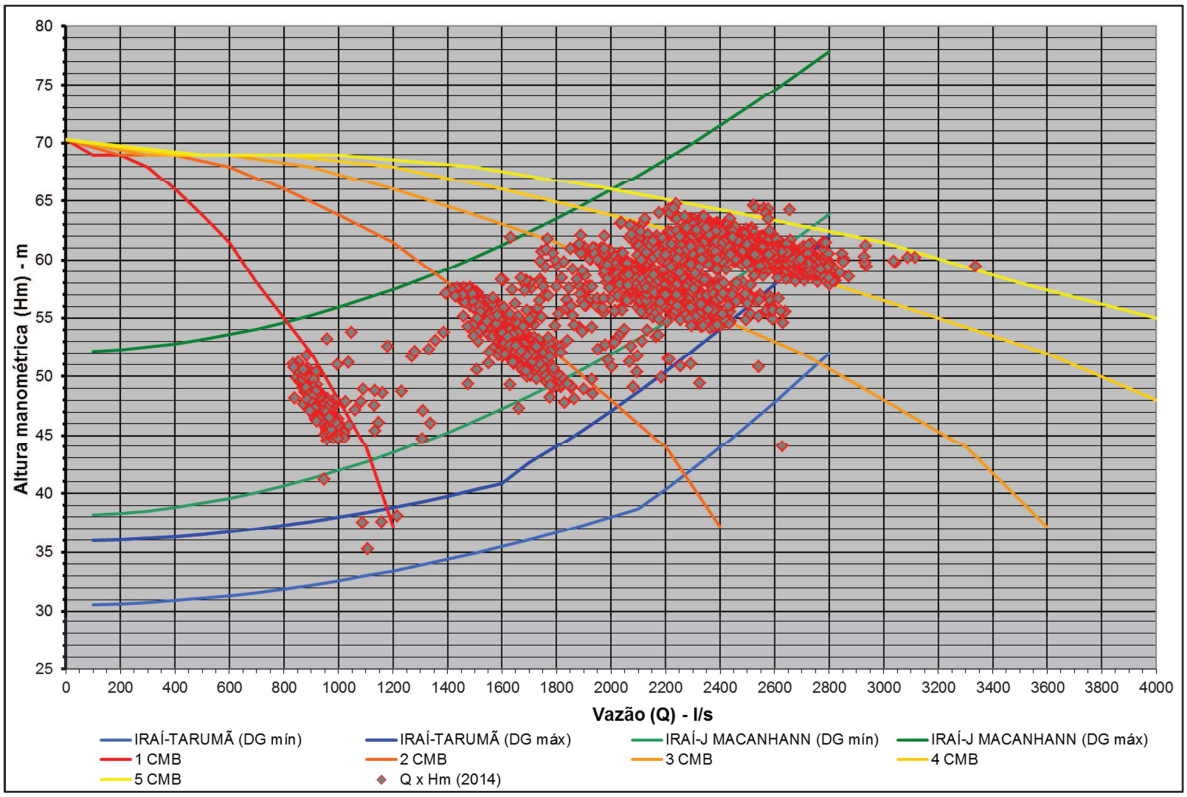


FIGURA 18 – COMPORTAMENTO OPERACIONAL PARA OS MESES DE FEVEREIRO, MAIO, AGOSTO E NOVEMBRO PARA O ANO DE 2014

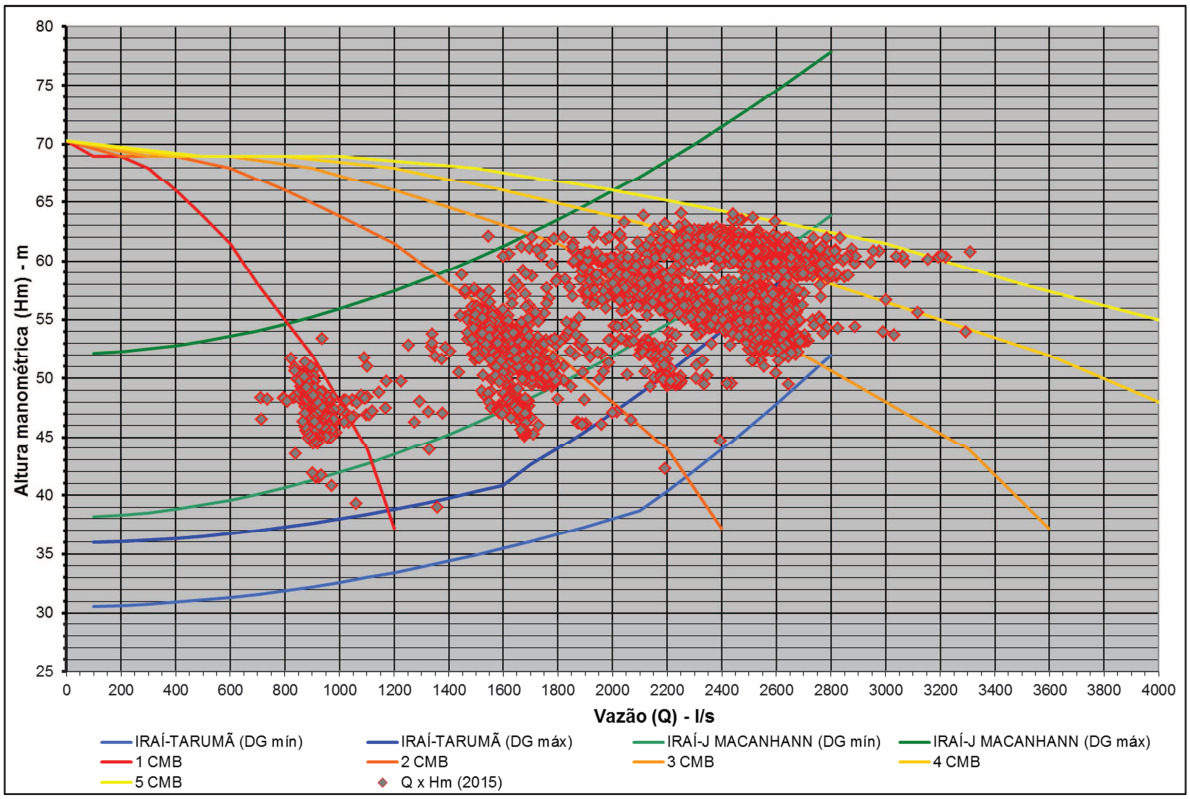


FIGURA 19 – COMPORTAMENTO OPERACIONAL PARA OS MESES DE FEVEREIRO, MAIO, AGOSTO E NOVEMBRO PARA O ANO DE 2015

A frequência relativa percentual com que os resultados do indicador *CE* ocorreram para o ano de 2014 e 2015, pode ser observada no GRÁFICO 5. O valor que apareceu com a maior frequência para o ano de 2014, foi de 0,255 kWh/m³ e, para o ano de 2015, de 0,258 kWh/m³. A média para o ano de 2014 foi de (0,2468±0,0002) kWh/m³ e, para o ano de 2015, de (0,2475±0,0002) kWh/m³. Por meio de um teste de hipótese (teste t), verificou-se que, a média de *CE* para 2014 é significativamente diferente daquele verificado para o ano de 2015. Nesse caso, pode-se afirmar, com 95% de confiança, que o valor de *CE* para o ano de 2015 aumentou com relação ao do ano de 2014, ou seja, o desempenho energético em 2015 foi menos eficiente do que em 2014. Entretanto, a partir da comparação das médias de *CE* dos anos de 2014 e de 2015, com a média nacional brasileira (TABELA 9), verifica-se que o sistema avaliado, apresenta um menor consumo energético (em torno de 62%).

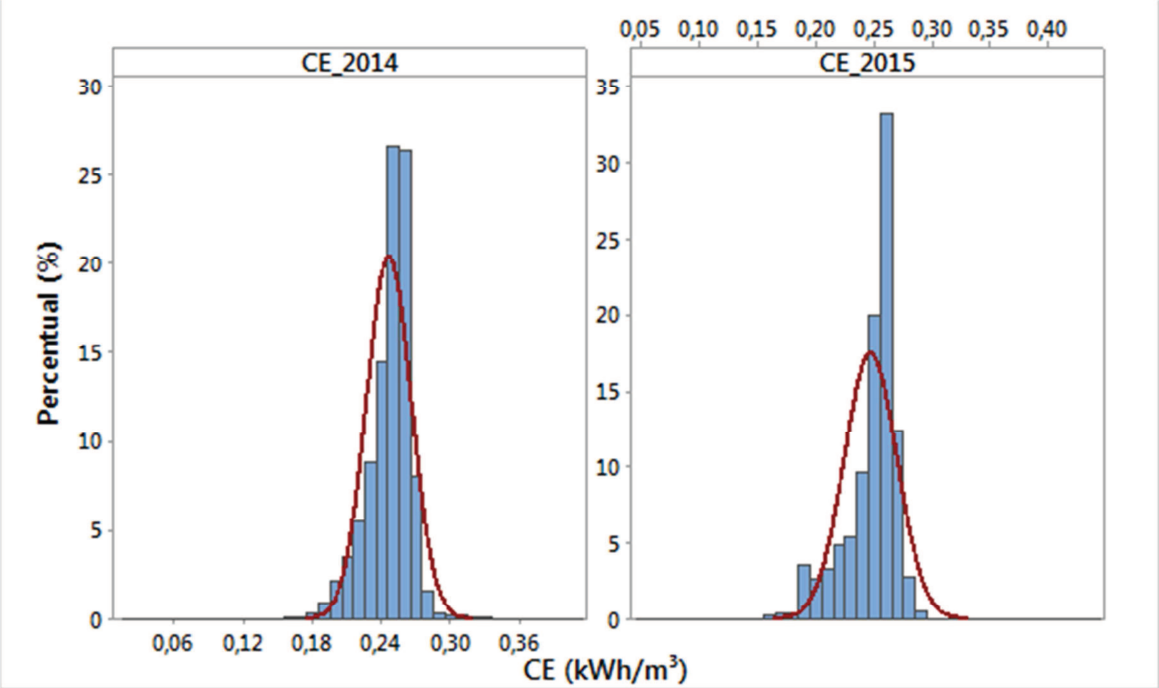


GRÁFICO 5 – HISTOGRAMA DE *CE* PARA OS ANOS DE 2014 E 2015 PARA O SISTEMA IRAÍ

Já os resultados encontrados para o indicador *CEN* para os anos de 2014 e 2015 estão apresentados no GRÁFICO 6. O valor que apareceu com maior frequência foi o de 0,423 kWh/m³x100m, o mesmo para os dois anos avaliados. A média de (0,4189±0,0002) kWh/m³x100m, para o ano de 2014, é significativamente diferente do que a média de 2015, cujo valor médio foi de (0,4264±0,0004) kWh/m³x100m. Essa observação foi obtida por meio do teste t, de forma que, pode-se afirmar, com 95% de confiança, que o valor de *CEN* estimado para 2014 é menor do que o valor de 2015.

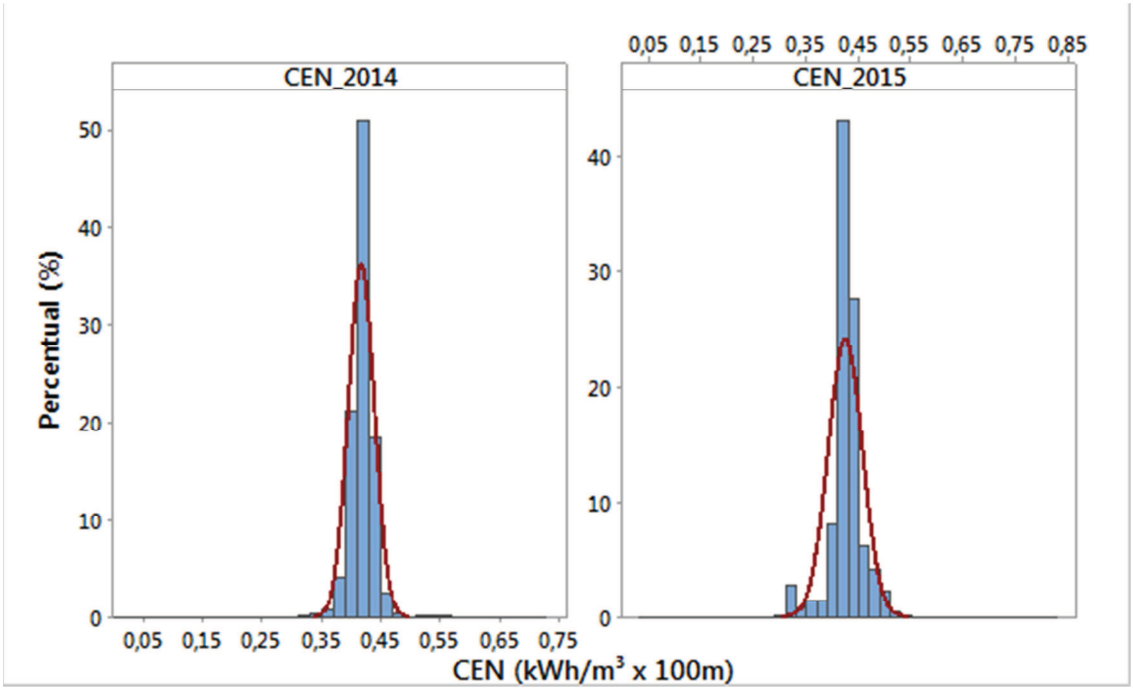


GRÁFICO 6 – HISTOGRAMA DE *CEN* PARA OS ANOS DE 2014 E 2015 PARA O SISTEMA IRAÍ

Da mesma forma que para *CE* e *CEN*, o indicador de CEE_L apresentou, segundo o teste de hipótese (teste t), uma média significativamente diferente e maior em 2015 do que em 2014. O valor que apareceu com maior frequência foi o de 0,0160 kWh/m³xkm para CEE_L, o mesmo para os dois anos. Já a média, para o ano de 2014, o valor de CEE_L foi de (0,0152±0,000013) kWh/m³x100m, enquanto que, para o ano de 2015, foi de (0,0153±0,0000156) kWh/m³x100m (GRÁFICO 7).

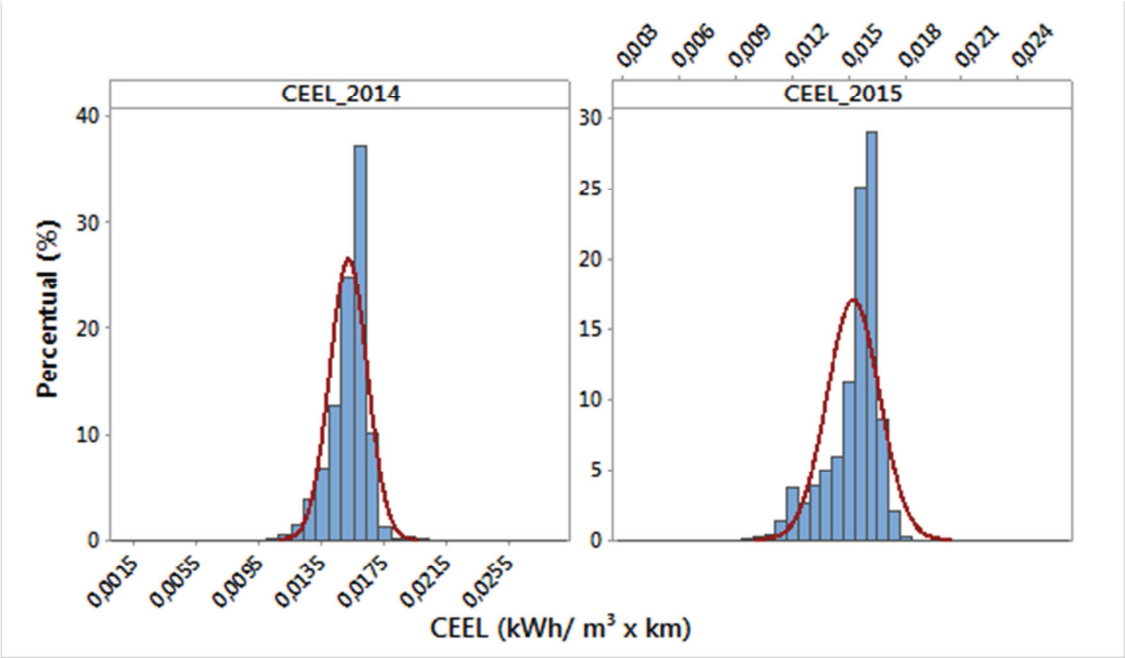


GRÁFICO 7 – HISTOGRAMA DO CEE_L PARA OS ANOS DE 2014 E 2015 PARA O SISTEMA IRAÍ

Já o rendimento global do conjunto motobomba, segundo o teste de hipótese (teste t), é significativamente menor para o ano de 2015 do que para o ano de 2014 (GRÁFICO 8). Esse resultado confirma que, quanto menor o valor do indicador de desempenho, maior é o desempenho do sistema. O valor que apareceu com maior frequência no ano de 2014 foi de 65,44 %, enquanto que para o ano de 2015, foi de 64,55%. Já a média, para o ano de 2014, foi de (66,02 ± 0,03) % e, para o ano de 2015, de (64,81 ± 0,06) %.

Entretanto, importante ressaltar que, para o ponto operacional projetado, o rendimento mínimo esperado para o conjunto motobomba é de 68,61%, valor acima ao que o sistema vem apresentando nos últimos anos.

Segundo a classificação adaptada de ERSAR/ LNEC (TABELA 13), quando comparamos os resultados encontrados para o *CEN* e o η, o sistema apresentou, para o período avaliado, uma boa eficiência energética. Importante destacar, entretanto, que o rendimento dos dois anos avaliados está abaixo do mínimo esperado para o sistema.

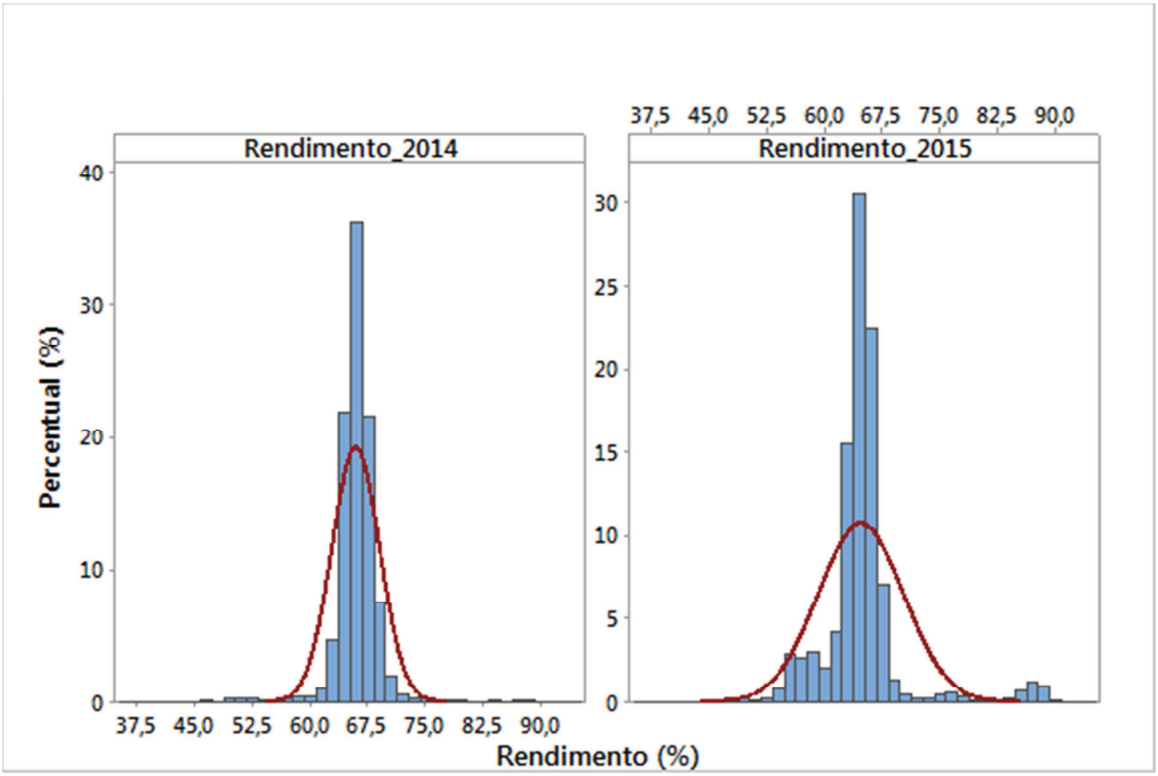


GRÁFICO 8 – HISTOGRAMA DO η PARA OS ANOS DE 2014 E 2015 PARA O SISTEMA IRAÍ

De forma a avaliar a influência da sazonalidade na média anual dos indicadores, realizou-se, entre a média anual e a média dos meses referente a cada

estação do ano, uma análise de variância (ANOVA). O período referente a cada estação do ano está apresentado na TABELA 25.

TABELA 25 – PERÍODOS DAS ESTAÇÕES DO ANO PARA OS ANOS DE 2014 E 2015

Ano referência	Estação	Período
2014	Outono	março/2014 até maio/2014
	Inverno	junho/2014 até agosto/2014
	primavera	setembro/2014 até novembro/2014
2015	Verão	dezembro/2014 até fevereiro/2015
	Outono	março/2015 até maio/2015
	Inverno	junho/2015 até agosto/2015
	primavera	setembro/2015 até novembro/2015

FONTE: O AUTOR (2016)

Os resultados, conforme pode ser observado nos GRÁFICOS 16 ao 21 (APÊNDICE A), indicaram que as médias por estação do ano, são significativamente diferentes com relação à média anual. Observou-se também que, para os meses com temperaturas mais baixas, ou seja, para o outono e inverno, os indicadores apresentaram valores superiores aos das estações com temperaturas mais elevadas (verão e primavera). Esse fato ocorreu em cinco, das seis análises realizadas. Isso pode ser explicado pelo fato de que, como a demanda de água diminui nos períodos cujas temperaturas são mais baixas, o sistema pode estar operando em condições desfavoráveis quando comparada às condições para as quais foi projetada.

Nesse sentido, sugere-se que a equipe de operação, juntamente com a equipe de projetos, reavalie a operação nesses períodos buscando um desempenho uniforme ao longo do ano. Sugere-se também, que seja realizada pela companhia, a simulação hidráulica do sistema. Essa simulação deverá definir, dentro das expectativas e metas da empresa, o valor mínimo para esses indicadores. Cabe, entretanto, à operação, acompanhá-los ao longo dos anos, podendo para isso, utilizar o método proposto neste trabalho.

5.2 ESTUDO DE CASO 2 - SISTEMA COTIA: ELEVATÓRIA DE ÁGUA BRUTA 01

1ª Etapa: Levantamentos preliminares

O segundo estudo de caso foi realizado na estação elevatória de água bruta (EEB-01) da captação superficial do SAA Cotia, localizada no município de São José dos Pinhais, região metropolitana de Curitiba, Paraná, Brasil.

A EEB-01 tem como função recalcar a água bruta do Rio Cotia até a estação de tratamento de água – ETA (NAmáx. = 930,60 m). O transporte de água é realizado por meio de uma adutora de água de bruta (AAB-01) de diâmetro de 300mm (DN300), conforme representado esquematicamente na FIGURA 20.

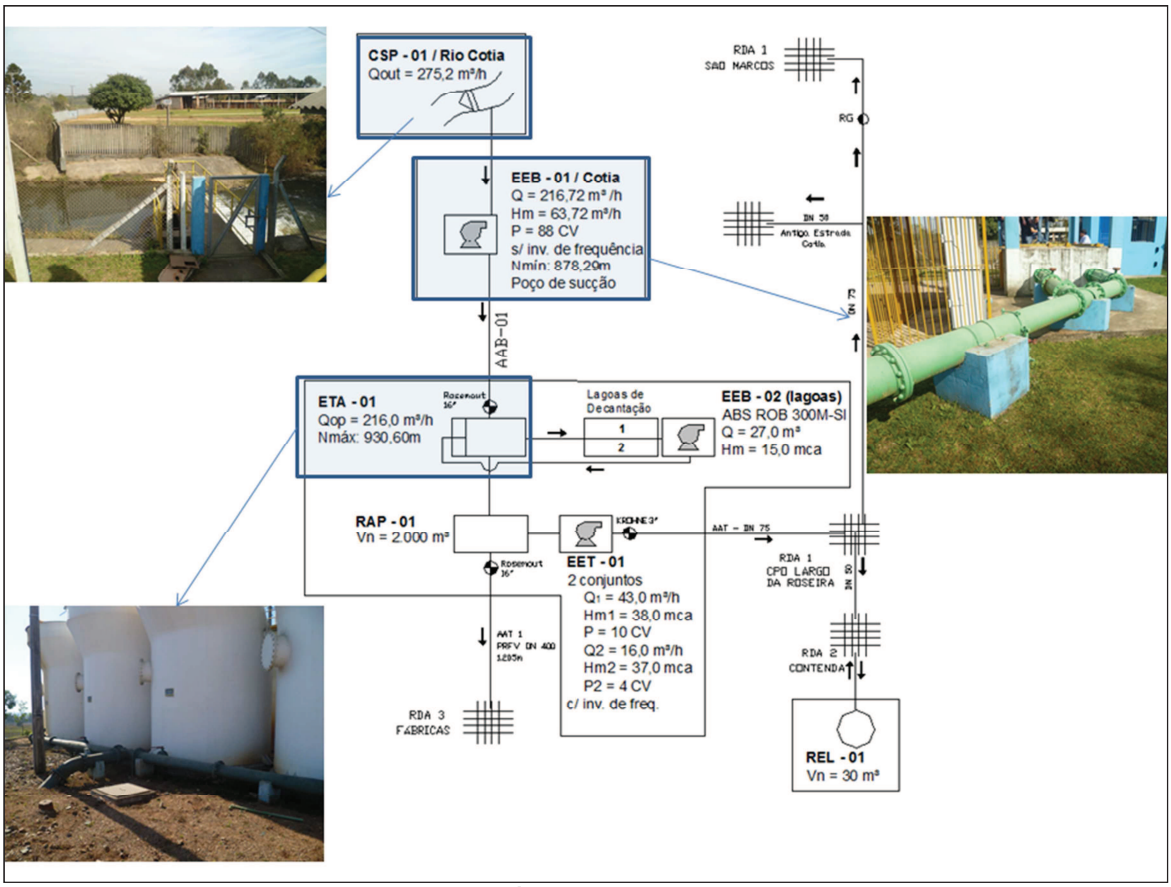


FIGURA 20 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO SAA COTIA
FONTE: ADAPTADO SANEPAR (2015)

A elevatória é composta por dois conjuntos motobomba, submersíveis, sendo uma reserva, e estão instaladas dentro de um poço de sucção (NAmín=878,29 m e NAmáx=878,70 m). Os dados nominais da EEB-01 foram fornecidos pela operadora do sistema e estão apresentados na TABELA 26. Cabe

ressaltar que não existe medição de pressão de recalque, tão pouco o acompanhamento do nível de água do poço de sucção em tempo real.

TABELA 26 – DADOS NOMINAIS DA EEB-01 DO SAA COTIA

EEB-01	1	2
Marca	Flygt	Flygt
Modelo	3300.180 HT462	3300.180 HT462
Altura manométrica (m)	63,9	63,9
Vazão (l/s)	60,2	60,2
Rendimento bomba (%)	62	62
Velocidade (rpm)	1770	1770
Rendimento motor (%)	89	89
Potência (CV)	88	88

FONTE: SANEPAR (2015)

O barrilete de recalque, a AAB-01 e o barrilete na entrada da ETA são compostos por tubulações e acessórios, conforme apresentado na TABELA 27.

TABELA 27 – CARACTERÍSTICAS DA ADUTORA DE ÁGUA BRUTA DO SISTEMA COTIA

TRECHO*	COMPRIMENTO (m)	DIÂMETRO NOMINAL (mm)	DIÂMETRO INTERNO (mm)	MATERIAL	ACESSÓRIOS TIPO/ QUANTIDADE	
1	8,92	250	263	ferro dúctil	ampliação gradual curva 90º curva 45º Junção válvula borboleta aberta válvula de retenção	2 2 2 1 1 1
2	1,75	300	314,6	ferro dúctil	curva 45º tê de passagem direta	2 1
3	4.601	300	299,8	PVC DEFoFo	curva 90º curva 22º tê de passagem direta	2 18 8
4	20,5	250	263	ferro dúctil	ampliação gradual curva 45º medidor de vazão tê de saída bilateral	1 2 1 1
5	4,46	200	211,2	ferro dúctil	redução gradual tê de passagem direta tê de saída de lado	1 1 1
6	0,2	150	159,6	ferro dúctil	saída de canalização válvula borboleta aberta	1 1

* Trechos 1 e 2: barrilete de recalque. Trecho 3: adutora de água bruta. Trecho 4: tubulação reduzida para instalação do medidor de vazão; Trecho 5 e 6: entrada na ETA.
FONTE: SANEPAR (2015)

O volume de água bruta recalcada foi mensurado com o auxílio de um medidor eletromagnético de vazão, o qual está instalado apenas na entrada da ETA, cujo equipamento e o conversor eletrônico estão ilustrados na FIGURA 21.

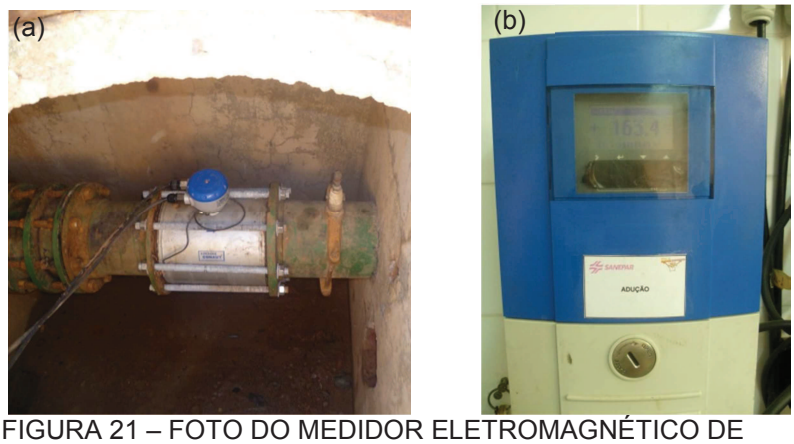


FIGURA 21 – FOTO DO MEDIDOR ELETROMAGNÉTICO DE VAZÃO (a); CONVERSOR ELETRÔNICO (b)
FONTE: O AUTOR (2014)

Não existe medição individual do consumo de energia elétrica da elevatória em tempo real por parte da operadora do sistema. Entretanto, essas elevatórias são as principais consumidoras de energia da área e, portanto, as faturas de energia elétrica foram levantadas para estimar o consumo mensal de energia elétrica. A FIGURA 22 ilustra os valores entre o mês de agosto de 2013 a maio de 2014. Os demais valores utilizados neste estudo de caso estão disponibilizados no CD anexado a este trabalho.

• **Visualização de faturas**

Cliente: 03926156-5 **Concessionária:** COPEL-AGRUPADA **Nº da conta:** 81292-01-705-025370
Unidade de negócio: USPD-I **Localidade:** CACHOEIRA(S.J.D.PINHAIS) **Situação:** Ativo
Endereço: CPO LGO ROSEIRA CIA P0468 **Tarifa:** ALTA TENSAO 2,3 A 25 KV HORO-SAZ VERDE
USEM: USEMCT
Descrição: SANEPAR CSP1 CAP RIO COTIA

Tarifa Verde

Ref.	Leitura	FP	Dias de consumo	Consumo - Fora Ponta			Consumo - Ponta			Demanda - Fora Ponta			Demanda - Ponta			Ultrap. - Fora Ponta		
				Medido (kwh)	Faturado (kwh)	Importe (R$)	Medido (kwh)	Faturado (kwh)	Importe (R$)	Medida (kW)	Faturada (kW)	Importe (R$)	Medida (kW)	Faturada (kW)	Importe (R$)	Faturada (kW)	Importe (R$)	Fa
06/2014	08/05/2014	92,32	30	18.832	18.832	3.617,14	2.842	2.842	2.427,61	62	68	466,32	0	0	0,00	0	0,00	
05/2014	08/04/2014	86,45	31	23.991	23.991	4.608,05	3.663	3.663	3.128,90	66	68	473,59	0	0	0,00	0	0,00	
04/2014	08/03/2014	96,36	28	20.134	20.134	3.867,22	3.142	3.142	2.683,87	66	68	473,44	0	0	0,00	0	0,00	
03/2014	08/02/2014	96,38	32	27.616	27.616	5.304,32	3.965	3.965	3.386,87	66	68	473,02	0	0	0,00	0	0,00	
02/2014	07/01/2014	91,18	33	19.625	19.625	3.769,46	2.721	2.721	2.324,25	66	68	474,27	0	0	0,00	0	0,00	
01/2014	05/12/2013	82,76	28	18.634	18.634	3.579,11	2.958	2.958	2.526,70	66	68	473,16	0	0	0,00	0	0,00	
12/2013	07/11/2013	82,76	30	19.927	19.927	3.827,46	3.559	3.559	3.040,07	66	68	473,44	0	0	0,00	0	0,00	
11/2013	07/10/2013	83,83	33	22.198	22.198	4.263,66	3.743	3.743	3.197,24	66	68	473,59	0	0	0,00	0	0,00	
10/2013	04/09/2013	83,84	33	21.513	21.513	4.132,09	2.839	2.839	2.425,05	66	68	474,15	0	0	0,00	0	0,00	
09/2013	02/08/2013	89,29	28	19.804	19.804	3.803,84	3.218	3.218	2.748,79	66	68	474,98	0	0	0,00	0	0,00	

FIGURA 22 – DADOS DA FATURA DE ENERGIA ELÉTRICA DA CAPTAÇÃO DO SAA COTIA
FONTE: SANEPAR (2015)

2ª Etapa: Definição dos indicadores de desempenho

Conforme já apresentado, os indicadores utilizados na proposta metodológica aplicada a esse estudo de caso são:

- CE: Consumo específico de energia;
- CEN: Consumo específico de energia normalizado;
- $CEE_{L:}$ Consumo específico de energia por quilômetro de adutora.

Também será verificado o ponto de trabalho e calculado o rendimento global do conjunto motobomba (η).

3ª Etapa: Medição e estimativa das variáveis hidráulicas

As variáveis hidráulicas medidas (volume recalcado e tempo de funcionamento das bombas) são registradas diariamente pelo operador da ETA e foram obtidas de um banco de dados do Sistema Corporativo de Gestão Industrial (SCI) da companhia de saneamento. A FIGURA 23 apresenta os valores registrados para o tempo de funcionamento de cada conjunto motobomba e o volume recalcado para alguns dias do mês março do ano de 2014. Os demais valores utilizados neste estudo de caso estão disponibilizados no CD anexado a este trabalho.

As variáveis elétricas, por sua vez, foram obtidas da fatura de energia elétrica, tomando a precaução de observar a data da leitura, para que se tenha uma comparação entre o volume de água recalcado pelas bombas e o respectivo consumo de energia elétrica em um mesmo período.

SISTEMA CORPORATIVO DE GESTÃO INDUSTRIAL

Boletim de Controle Operacional

1065 USPD | 25 - SAO JOSE DOS PINHAIS | CSP01 COT | 03/2014

Resumo			
Valores	Tempo Func.	Volume Aduzido	Vazão
Max.	23,53	3.992,00	182,79
Med.	13,20	2.263,00	171,48
Min.	5,44	953,00	159,27
Total.	409,19	70160,00	–

Dia	Sem	Temp. Amb.	Cond. Tempo	Hor. Leitura	Conjunto	Leitura (h)	Tempo (h)	Tensão (V)	Corrente (A)	Macro	Leitura (m3)	Volume (m3 x K)	Volume Total (m3)	Tempo Total (h)	Vazão (m3 / h)	Observações
1	Sáb	17	Nublado	00.00	1	31.542,10	9,88			1	1.064.582	1.706	1.706	9,88	172,67	
					2	12.569,60	0,00									
2	Dom	18	Nublado	00.00	1	31.551,98	8,05			1	1.066.288	1.393	1.393	8,05	173,04	
					2	12.569,60	0,00									
3	Seg	18	Nublado	00.00	1	31.560,03	8,20			1	1.067.681	1.415	1.415	8,20	172,56	
					2	12.569,60	0,00									
4	Ter	18	Nublado	00.00	1	31.568,23	8,67			1	1.069.096	1.496	1.496	8,67	172,55	
					2	12.569,60	0,00									
5	Qua	17	Nublado	00.00	1	31.576,90	8,00			1	1.070.592	1.385	1.385	8,00	173,12	
					2	12.569,60	0,00									
6	Qui	18	Nublado	00.00	1	31.584,90	8,85			1	1.071.977	1.531	1.531	8,85	172,99	
					2	12.569,60	0,00									
7	Sex	18	Nublado	00.00	1	31.593,75	9,41			1	1.073.508	1.636	1.636	9,41	173,86	
					2	12.569,60	0,00									
8	Sáb	18	Ceu Limpo	00.00	1	31.603,16	9,18			1	1.075.144	1.601	1.601	9,18	174,40	
					2	12.569,60	0,00									
9	Dom	19	Chuvoso	00.00	1	31.612,34	5,44			1	1.076.745	953	953	5,44	175,18	
					2	12.569,60	0,00									

FIGURA 23 – APRESENTAÇÃO PARCIAL DO BOLETIM DE CONTROLE OPERACIONAL REFERENTE AO MÊS DE MARÇO/2014.
FONTE: SANEPAR (2015)

Para o estudo de caso, os dados foram coletados mensalmente para o período de três anos (janeiro de 2012 até dezembro de 2014). A tabulação dos dados levantados elencou, para os diversos meses, o volume recalcado (m³), o tempo de funcionamento das bombas (horas), a energia elétrica consumida (kWh) e a vazão média (m³/h). A TABELA 28 ilustra as variáveis tabuladas.

TABELA 28 – TABULAÇÃO DOS DADOS DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA E VOLUME DE ÁGUA ADUZIDO DO SISTEMA COTIA (EXEMPLO)

REFERÊNCIA	VOLUME ADUZIDO [m³]	TEMPO DE FUNCIONAMENTO DAS BOMBAS [h]	ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA [kWh]	VAZÃO MÉDIA [m³/h]
Jan_2012	72.319	443	27.875	163,23
Fev_2012	67.131	403	25.565	166,69
Mar_2012	79.895	454	28.872	175,99
: :	: :	: :	: :	: :
Out_2014	64.525	394	24.724	163,71
Nov_2014	67.343	410	26.092	164,34
Dez_2014	59.223	358	23.303	165,25

FONTE: SANEPAR (2015)

Como não existe medição da pressão de recalque na EEB-01, construiu-se a curva do sistema por meio da somatória das estimativas das respectivas perdas de carga (contínuas e localizadas) e do desnível geométrico para estimar a altura manométrica (H_m).

Para a estimativa das perdas de carga contínuas (H_c) foi utilizada a fórmula de Hazen-Williams (Equação 2), utilizando os coeficientes inerentes a uma tubulação com aproximadamente 10 anos de operação. Nesse sentido, atribuíram-se valores de literatura de C = 120 para o trecho com ferro fundido e C = 135 para o trecho de PVC. Adicionalmente, adotou-se um intervalo de vazões entre 0 e 70 L/s. Já para as perdas de cargas localizadas (H_l) foi utilizada a Equação 1. Para esse cálculo foram levantadas todas as peças existentes na topologia, como apresentado anteriormente na TABELA 26.

O desnível geométrico (DG) foi obtido pela diferença entre o nível de água mínima no poço de sucção (878,29m) e o nível de água máximo na ETA (930,60m).

Por fim, com a curva do sistema determinada, foi possível estimar a altura manométrica (H_m) dada em função das vazões médias.

4ª Etapa: Cálculo dos indicadores de desempenho

Uma vez mensuradas as variáveis hidráulicas e elétricas (ou estimadas, quando da impossibilidade ou inviabilidade da medição), calcularam-se o consumo específico de energia (*CE*), o consumo específico de energia normalizada (*CEN*), o consumo específico de energia por quilômetro de adutora (CEE_L) e o rendimento dos conjuntos motobomba (η).

A TABELA 29 apresenta parte dos resultados calculados para os indicadores CE, CEN, CEE_L e o η – os dados processados abarcam um o período de três anos (janeiro de 2012 até dezembro de 2014) e estão disponibilizados no CD anexado a este trabalho.

TABELA 29 – DADOS PARCIAIS DOS INDICADORES *CE*, *CEN*, CEE_L E DO RENDIMENTO GLOBAL DA EEB-01 DO SISTEMA COTIA (EXEMPLO)

REFERÊNCIA	CE [kWh/m³]	CEN [kWh/m³/100m]	CEE_L [kWh/m³xkm]	η [%]
Jan_2012	0,385	0,565	0,083	49,2
Fev_2012	0,381	0,552	0,082	50,28
Mar_2012	0,361	0,511	0,078	54,41
: :	: :	: :	: :	: :
Out_2014	0,383	0,561	0,083	49,56
Nov_2014	0,387	0,566	0,084	49,10
Dez_2014	0,393	0,573	0,085	48,47

FONTE: SANEPAR (2015)

5ª Etapa: Análise dos resultados

Para a EEB-01, do SAA Cotia, observou-se que o comportamento do volume recalcado, ao longo do tempo, é similar aquele registrado para a energia elétrica consumida (GRÁFICOS 9, 10 e 11). Observou-se também que as médias anuais dessas variáveis diminuíram ao longo dos anos.

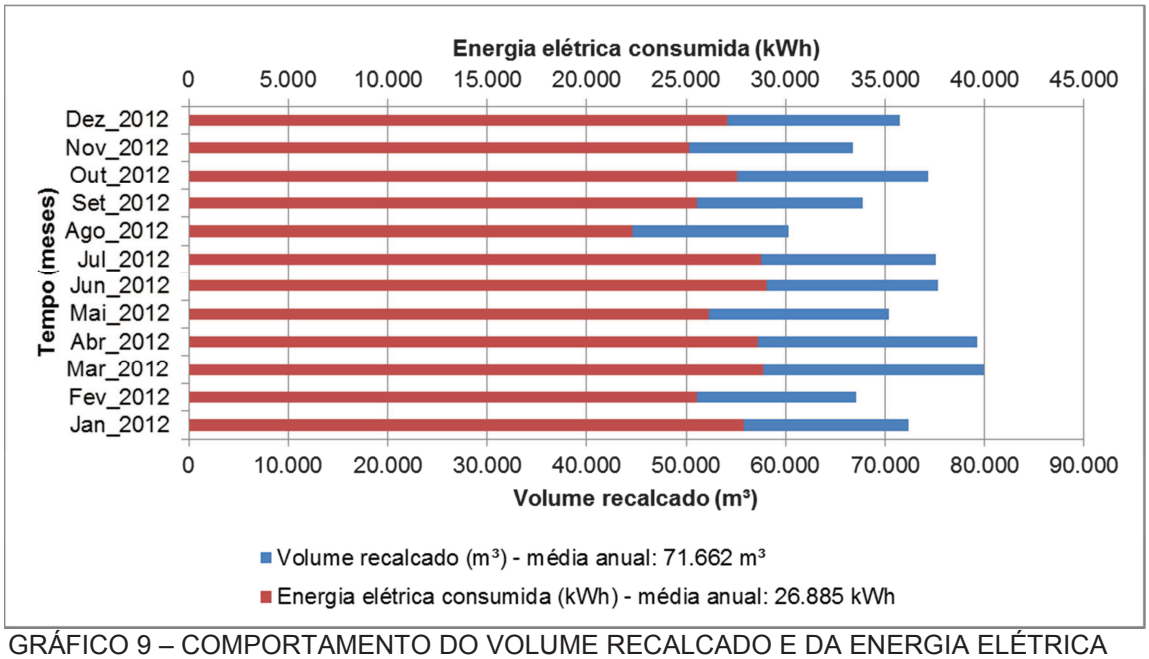


GRÁFICO 9 – COMPORTAMENTO DO VOLUME RECALCADO E DA ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA AO LONGO DO ANO DE 2012 DO SISTEMA COTIA

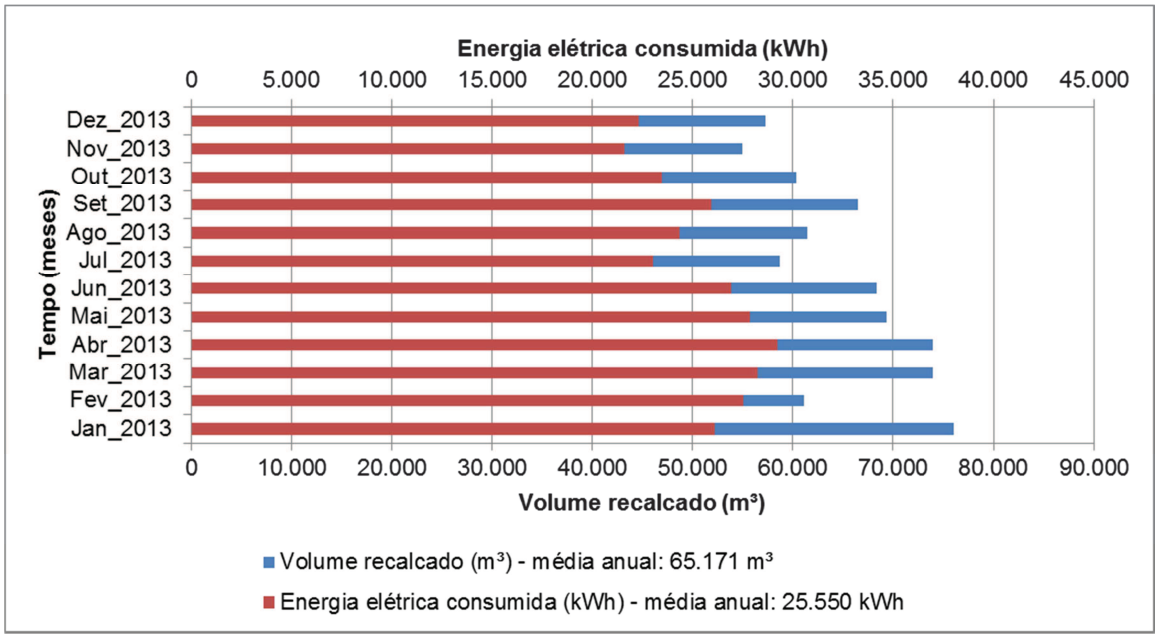


GRÁFICO 10 – COMPORTAMENTO DO VOLUME RECALCADO E DA ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA AO LONGO DO ANO DE 2013 DO SISTEMA COTIA

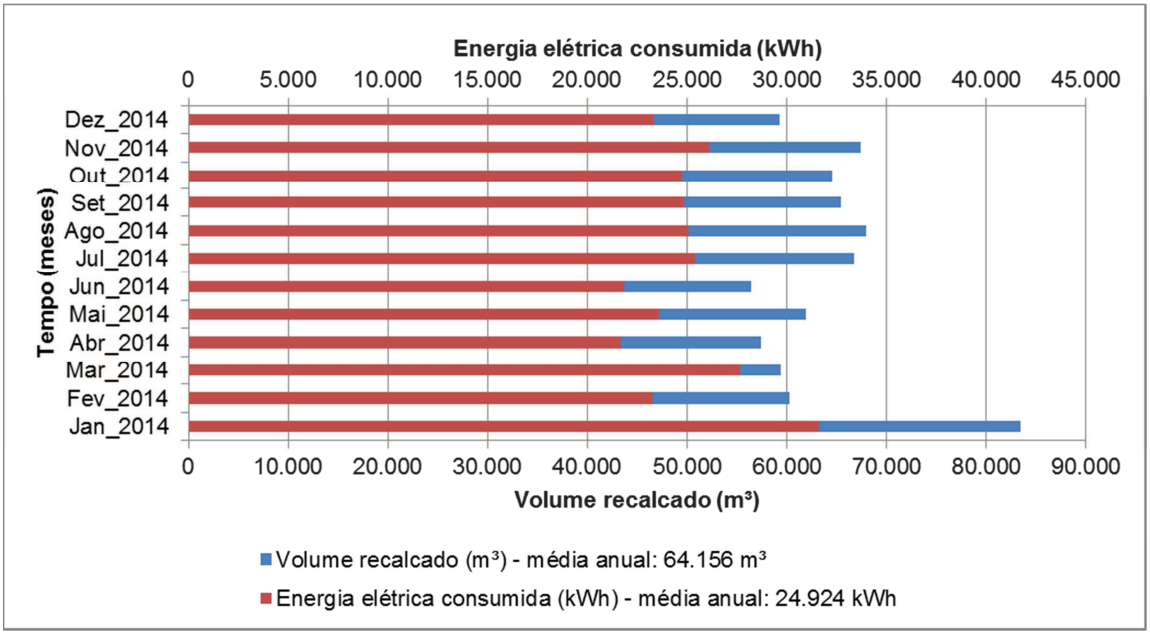


GRÁFICO 11 – COMPORTAMENTO DO VOLUME RECALCADO E DA ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA AO LONGO DO ANO DE 2014 DO SISTEMA COTIA

De posse das informações da curva bomba do fabricante e da construção da curva do sistema, verificou-se que, o ponto de trabalho estimado está muito próximo do ponto de trabalho projetado (FIGURA 24). Nesse ponto de trabalho, pela curva da bomba do fabricante, verifica-se que o rendimento da bomba é de 58,8% e, do motor, de 92%. Diante disso e, considerando as perdas de rendimento devido ao acoplamento da bomba com o motor, a eficiência do conjunto motobomba mínima esperada para esta condição é de 52,85%.

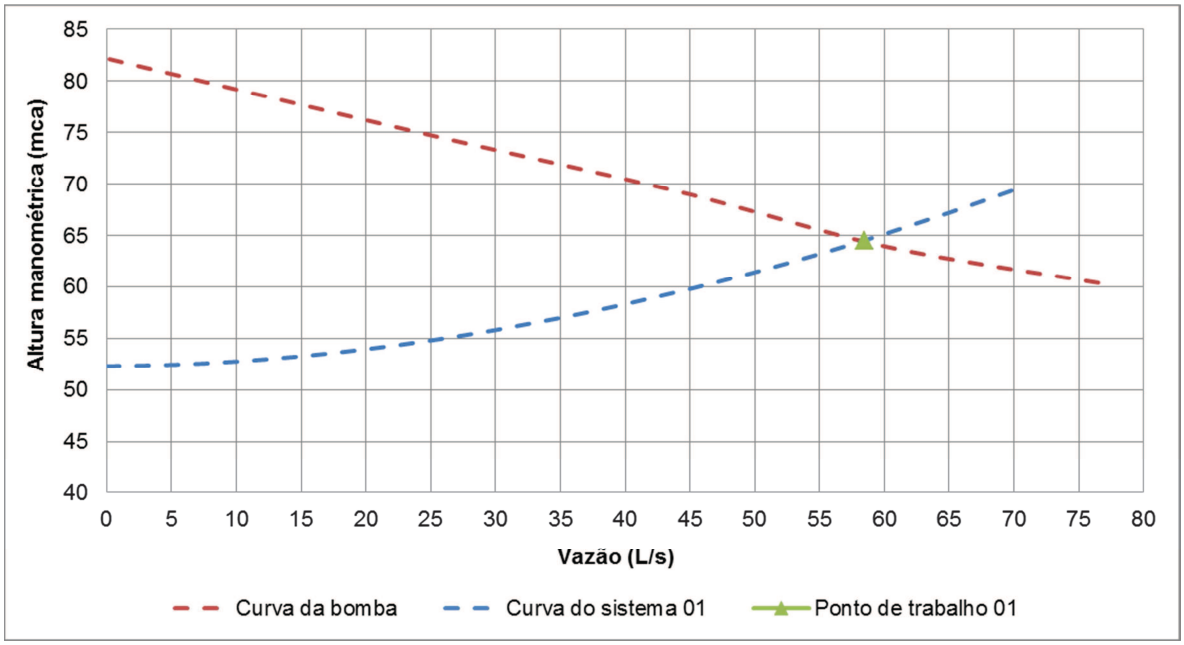


FIGURA 24 – CURVA DA BOMBA, CURVA DO SISTEMA E PONTO DE TRABALHO DO SAA COTIA

Entretanto, a vazão média dos três anos analisados foi de 46,77 L/s, valor inferior à vazão para qual a elevatória foi projetada, ou seja, o sistema está operando fora do ponto de trabalho estabelecido em projeto. Diante dessa informação, verificou-se junto à operação do sistema que, na entrada da ETA, uma válvula está parcialmente restringida, o que faz diminuir a vazão de recalque da elevatória. Essa restrição deve-se ao fato de que a ETA, que possui capacidade nominal de tratamento de 60 L/s, não consegue efetivamente tratar essa vazão devido à qualidade insatisfatória do manancial.

Importante destacar, entretanto, que devido a perda de carga extra imposta ao sistema (válvula restringida), há provavelmente um aumento na altura manométrica da bomba. Neste estudo de caso, estimou-se que essa perda de carga corresponde a um k = 32 (valor do coeficiente de perda de carga do acessório extra) no trecho 6. Portanto, a nova curva do sistema estimada e o novo ponto de trabalho, representadas pelo número 02, estão apresentadas na FIGURA 25. No entanto, é de suma importância que sejam realizadas medições da altura manométrica simultaneamente a da vazão recalcada para aferição dessa estimativa.

Com a nova curva do sistema, estimou-se a altura manométrica para cada vazão registrada mensalmente.

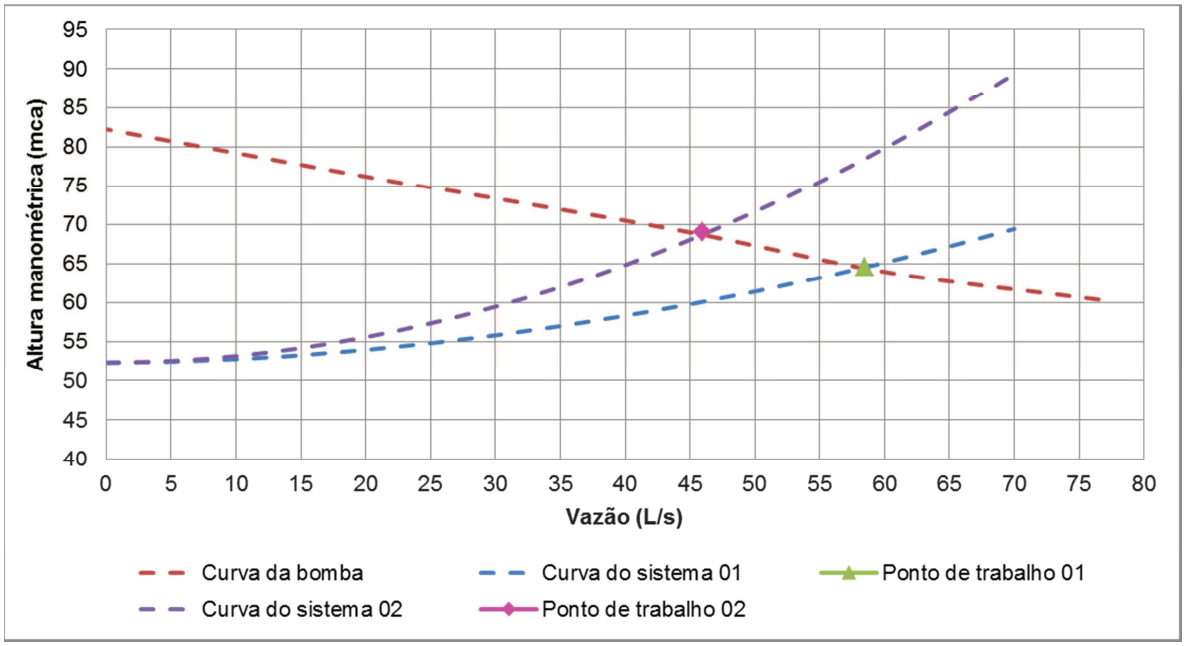


FIGURA 25 – CURVA DO SISTEMA PROJETADA (1) E ESTIMADA (2) E SEUS RESPECTIVOS PONTOS DE TRABALHO DO SAA COTIA

A frequência relativa percentual com que os resultados do indicador *CE* ocorreram, para o ano de 2012, 2013 e 2014, pode ser observada no GRÁFICO 12. O valor que apareceu com a maior frequência, para o ano de 2012, foi de 0,377 kWh/m³, para o ano de 2013, de 0,390 kWh/m³, e, para o ano de 2014, de 0,387 kWh/m³. A média para o ano de 2012 foi de (0,375±0,005) kWh/m³. Para 2013, (0,393±0,015) kWh/m³ e, para 2014, (0,389±0,016) kWh/m³. Por meio de uma análise de variância (ANOVA), verificou-se que, a média de *CE* para 2012 é significativamente diferente daquela calculada para o ano de 2013. Entretanto, a média de *CE* para o ano de 2013 não é significativamente diferente daquela calculada para o ano de 2014. Nesse caso, pode-se afirmar, com 95% de confiança, que o valor de *CE* foi menor em 2012 quando da comparação com os anos de 2013 e 2014, ou seja, o desempenho energético do conjunto motobomba em 2012 foi mais eficiente dos que os desempenhos em 2013 e 2014. A partir da comparação da média de *CE* dos três últimos anos, com a média nacional brasileira (TABELA 9), verifica-se que o sistema apresenta um consumo energético menor de 46, 43 e 44% para os anos de 2012, 2013 e 2014, respectivamente.

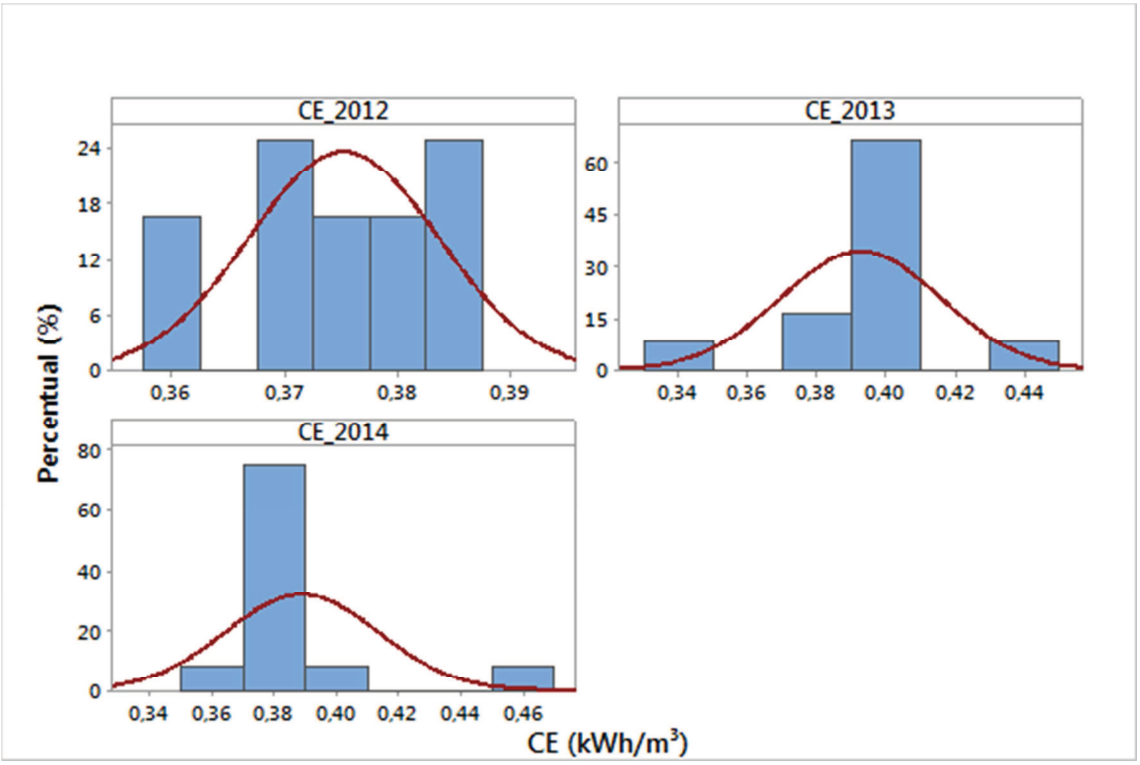


GRÁFICO 12 – HISTOGRAMAS DO *CE* PARA OS ANOS DE 2012, 2013 E 2014 PARA O SAA COTIA

Já os resultados encontrados para o indicador *CEN* para os anos de 2012, 2013 e 2014 estão apresentados no GRÁFICO 13. O valor que apareceu com maio frequência em 2012 foi de 0,552 kWh/m³x100m e para 2013, de 0,564 kWh/m³x100m. Já para 2014, os valores 0,546 e 0,549 kWh/m³x100m apareceram com a mesma frequência. A média de (0,540±0,012) kWh/m³x100m, para o ano de 2012, é significativamente diferente daquelas referentes aos anos de 2013 e 2014, que apresentaram, respectivamente, médias de (0,569±0,021) e (0,563±0,021) kWh/m³x100m. Essa observação foi obtida por meio da análise de variância (ANOVA), de forma que, pode-se afirmar, com 95% de confiança, que o valor de *CEN* estimado para 2012 é menor do que os valores de 2013 e 2014.

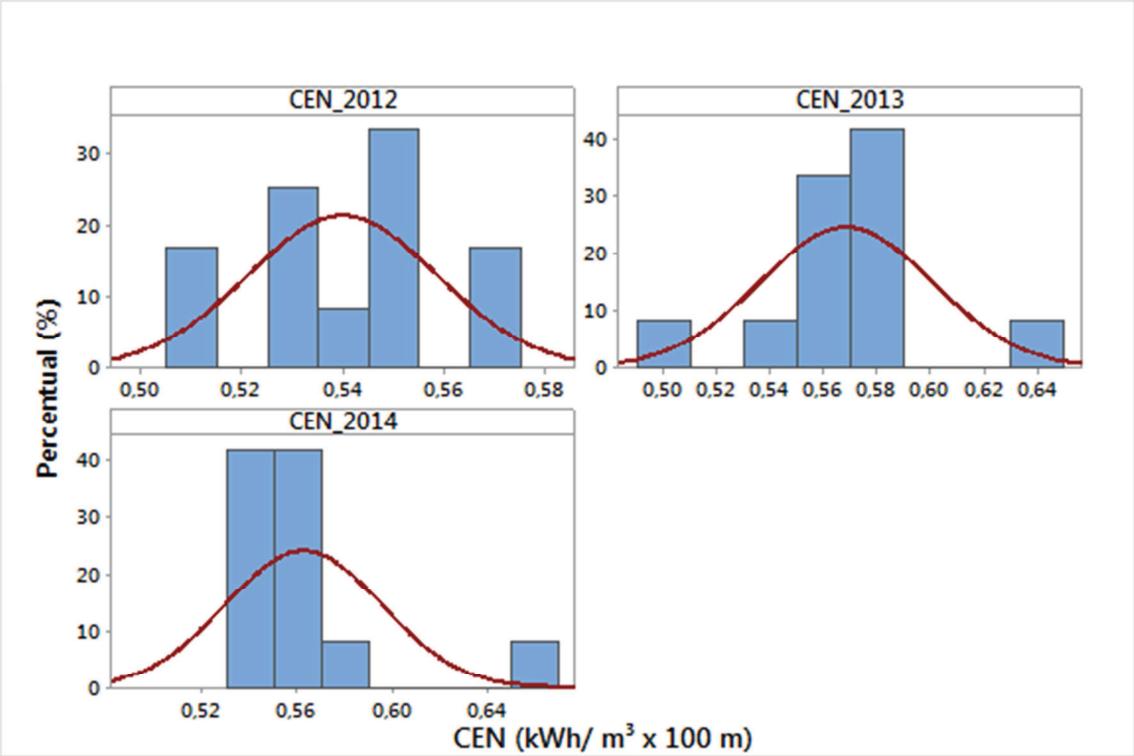


GRÁFICO 13 – HISTOGRAMAS DO *CEN* PARA OS ANOS DE 2012, 2013 E 2014 PARA O SAA COTIA

Da mesma forma que para *CE* e *CEN*, as médias do indicador CEE_L são significativamente iguais em 2013 e 2014 e maiores do que a média do ano de 2012. O valor que apareceu com maior frequência para 2012 foi de 0,083 kWh/m³xkm enquanto que, para 2013 e 2014 os valores foram de 0,085 e 0,082 kWh/m³xkm, respectivamente. A média para 2012 foram de (0,0809±0,0011) kWh/m³xkm. Já para 2013, o valor de CEE_L foi de (0,0847±0,0032) kWh/m³xkm. Para 2014, o valor foi de (0,0841±0,0035) kWh/m³xkm (GRÁFICO 14).

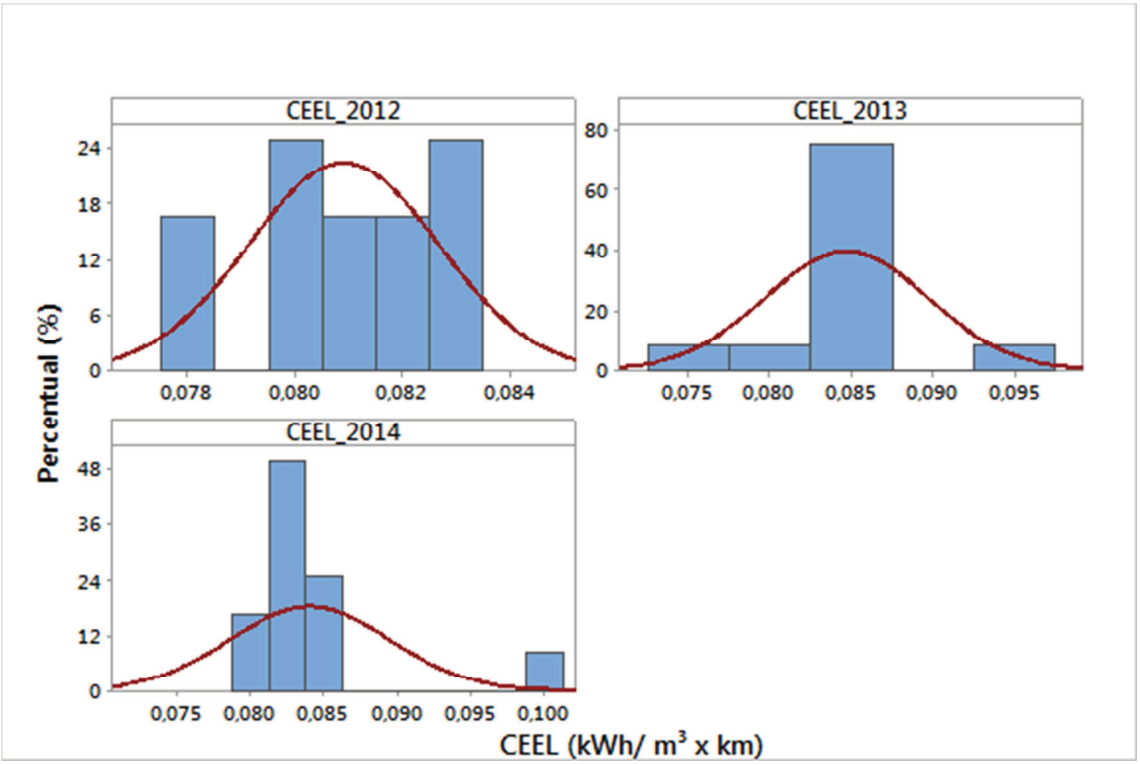


GRÁFICO 14 – HISTOGRAMAS DO CEE_L PARA OS ANOS DE 2012, 2013 E 2014 PARA O SAA COTIA

Conforme apresentaram os indicadores ao longo dos anos, o rendimento do conjunto motobomba em 2012, também é significativamente diferente dos rendimentos estimados para 2013 e 2014, segundo a ANOVA. Para 2012, a média do rendimento foi de (51,51±1,15) % enquanto que, para 2013 e 2014, a média do rendimento foi de (49,00±1,79) e (49,49±1,64) %, respectivamente (GRÁFICO 15). Não houve, para os anos de 2012 e 2014, valores repetidos para o rendimento. Entretanto, para 2013, o valor que apareceu com maior frequência foi igual a 49,27%. Entretanto, cabe ressaltar, que o rendimento mínimo esperado para o sistema, era de 52,85%, ou seja, o conjunto motobomba apresentou rendimento menor que o teórico em 3, 7 e 6% para os anos de 2012, 2013 e 2014, respectivamente.

Segundo a classificação adaptada de ERSAR/ LNEC (TABELA 13), quando se compara os resultados encontrados para o *CEN* e o rendimento, o sistema apresentou, para o período avaliado, uma eficiência “mediana”. Importante destacar, entretanto, que o rendimento inicialmente projetado também se enquadrava nessa classificação, porém, com um rendimento melhor do que o sistema apresentou no período avaliado.

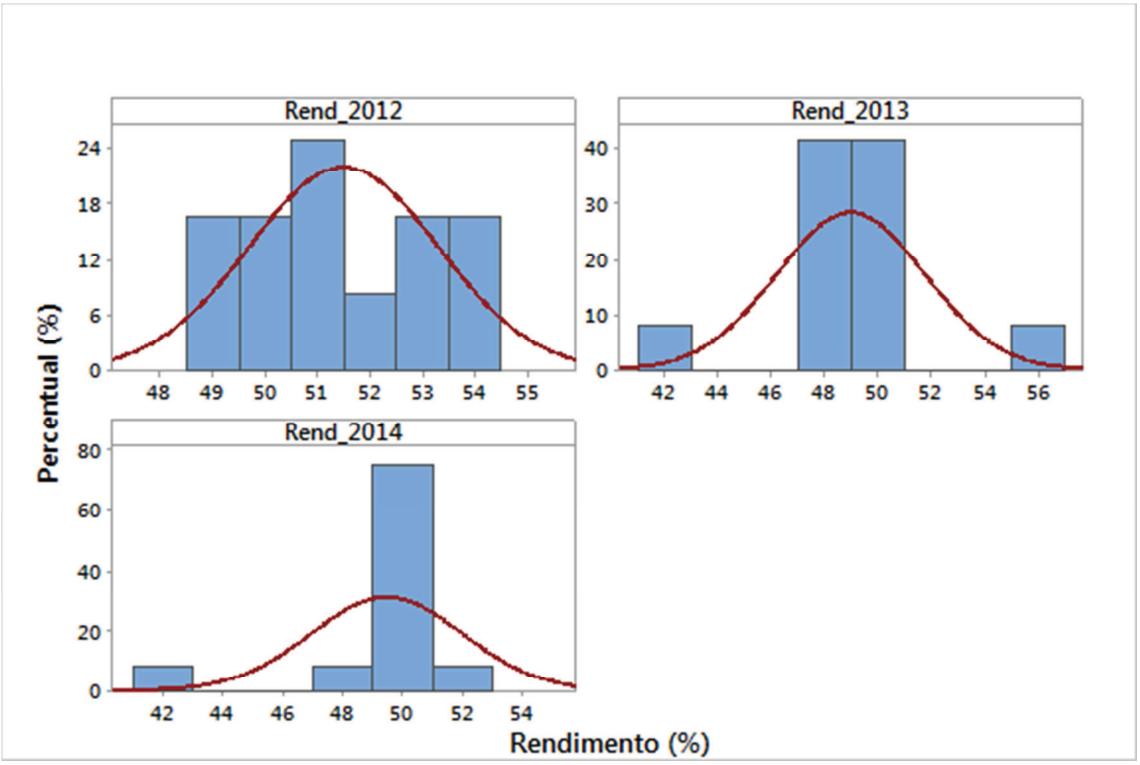


GRÁFICO 15 – HISTOGRAMAS DO η PARA OS ANOS DE 2012, 2013 E 2014 PARA O SAA COTIA

De forma a avaliar a influencia da sazonalidade na média anual dos indicadores, realizou-se uma análise de variância (ANOVA) entre a média anual e a média dos meses referente a cada estação do ano. O período referente a cada estação do ano está apresentado na TABELA 30.

TABELA 30 – PERÍODOS DAS ESTAÇÕES DO ANO PARA DOS ANOS DE 2012, 2013 E 2014

Ano referência	Estação	Período
2012	verão	dezembro/2011 até fevereiro/2012
	outono	março/2012 até maio/2012
	inverno	junho/2012 até agosto/2012
	primavera	setembro/2012 até novembro/2012
2013	verão	dezembro/2012 até fevereiro/2013
	outono	março/2013 até maio/2013
	inverno	junho/2013 até agosto/2013
	primavera	setembro/2013 até novembro/2013
2014	verão	dezembro/2013 até fevereiro/2014
	outono	março/2014 até maio/2014
	inverno	junho/2014 até agosto/2014
	primavera	setembro/2014 até novembro/2014

FONTE: O AUTOR (2016)

Os resultados, conforme pode ser observado nos GRÁFICOS 22 ao 30 (APÊNDICE A) indicaram que a média por estação de ano, não são significativamente diferentes com relação à média anual.

Observou-se também que, na maioria dos casos, não houve estações do ano que se sobressaíram em relação a outras, ou seja, as médias não variaram significativamente ao longo do ano, concluindo que, uma análise anual dos indicadores, para esse sistema, é suficiente.

.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 CONCLUSÕES

A partir das orientações encontradas na revisão de literatura, o presente trabalho estruturou e aplicou um método para a avaliação do desempenho energético de estações elevatórias de sistemas de abastecimento de água em escala plena.

Para tanto, utilizou-se como ferramenta os indicadores consumo específico de energia (*CE*), o consumo específico de energia normalizado (*CEN*) e o consumo específico de energia por quilômetro de adutora (CEE_L). Esses dois últimos indicadores tem a vantagem de permitir comparar o desempenho de sistemas com características e desníveis geométricos diferentes. Adicionalmente aos indicadores, o método também se propôs a verificar o ponto de trabalho e o rendimento global do conjunto motobomba.

No primeiro estudo de caso, realizado nas estações elevatórias de água tratada Tarumã/Jacob-Macanhann, do Sistema Iraí, verificou-se que o sistema está operando dentro da faixa operacional para a qual foi projetada. Constatou-se, entretanto, ao analisar os indicadores, que o sistema está perdendo em desempenho energético, uma vez que os indicadores *CE*, *CEN* e CEE_L estão aumentando e, o rendimento, diminuindo ao longo do tempo. No entanto, o sistema apresenta, quando se compara os resultados do *CEN* e do η com a classificação adaptada de ERSASR/LNEC, uma boa eficiência energética. Importante ressaltar, entretanto, que o rendimento de (66,02±0,03) % e (64,81±0,06) % que o sistema apresentou em 2014 e 2015, respectivamente, é inferior ao rendimento de 68,61% esperado em projeto, na ordem de 4 e 5%, respectivamente. Verificou-se, também, ao analisar o efeito da sazonalidade nesse sistema, que nos períodos de menor temperatura, o sistema apresenta um desempenho energético inferior quando comparado com os períodos mais quentes do ano. Nesse sentido, cabe à equipe de operação, juntamente com a equipe de projetos, reavaliar a operação nesses períodos buscando um desempenho uniforme ao longo do ano.

No segundo estudo de caso, realizado na estação elevatória de água bruta 01, do Sistema Cotia, observou-se que o sistema está operando fora do ponto de trabalho para a qual foi projetada. Uma das possibilidades causais dessa condição

seria uma válvula restringida na entrada da estação de tratamento de água alterando o ponto de trabalho para outro ponto de menor rendimento da bomba. Verificou-se, também, a partir da análise dos resultados encontrados para os indicadores *CE*, *CEN* e CEE_L e, para o rendimento do conjunto motobomba, que o sistema apresentou um desempenho energético constante nos anos de 2013 e 2014, porém, menor do que aquele verificado em 2012. Constatou-se, ao comparar os resultados do *CEN* e do η com a classificação proposta pela ERSAR/LNEC, que o sistema apresenta uma eficiência "mediana", a mesma eficiência para a qual foi projetada, porém, com um rendimento menor para a qual foi projetada. Sugere-se, portanto, que seja avaliada a troca do conjunto motobomba por outro de melhor rendimento e de menor vazão, ou a instalação de inversor de frequência de forma a atender o ponto de trabalho esperado pela operação. Entretanto, importante ressaltar que o ponto de máximo rendimento do novo conjunto motobomba, deve coincidir com o ponto de trabalho. Sugere-se também, que seja realizada pela companhia, a simulação hidráulica do sistema. Essa simulação deverá definir, dentro das expectativas e metas da empresa, o valor mínimo para esses indicadores. Cabe, entretanto, à operação do sistema, acompanhá-los ao longo dos anos. Para isso, deve ser realizada a medição da energia elétrica consumida e da altura manométrica da estação elevatória, simultaneamente à medição do volume recalcado, de forma a permitir, por parte da operação, o acompanhamento em tempo real desses indicadores. Por fim, sugere-se que seja instalado um medidor de vazão na captação, a fim de identificar possíveis vazamentos ao longo da adutora de água bruta.

Com relação aos efeitos da sazonalidade, o sistema apresenta o mesmo desempenho energético em todas as épocas do ano.

A partir da comparação entre os dois estudo de casos verificou-se que as elevatórias do sistema Iraí apresentam melhor desempenho energético quando comparadas às elevatórias do sistema Cotia. Essa conclusão se deu a partir da comparação dos resultados dos indicadores *CEN* e CEE_L do sistema Iraí com os do sistema Cotia. Da mesma maneira, as elevatórias do Sistema Iraí apresentaram, para os dois anos de avaliação, médias do *CEN* menores, em aproximadamente 13%, do que a média do *CEN* de Portugal. Entretanto, comparando as médias desse indicador do Sistema Cotia com a média de Portugal, o sistema Cotia apresentou um consumo energético maior (aproximadamente 17%).

É possível argumentar, portanto, que o método e os indicadores propostos podem avaliar o desempenho energético de um conjunto motobomba. Cabe ressaltar que o acompanhamento do *CE* é importante para verificar o desempenho individual do conjunto motobomba. Nesse sentido, quanto menor o valor de *CE*, menor será o respectivo dispêndio com energia elétrica. Já o acompanhamento do *CEN e do* CEE_L, além de permitir o monitoramento do desempenho energético da estação elevatória, permitirá compará-lo com aquele de outras instalações.

Portanto, é valido apontar que, se o método e os indicadores de desempenho aqui abordados forem rotineiramente empregados pelas companhias de saneamento, eventuais desvios podem ser facilmente detectados e ações corretivas podem ser tomadas de modo a buscar menores valores de *CE, CEN* e CEE_L ao longo de todos os meses do ano.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se para trabalhos futuros, que seja realizada a simulação hidráulica dos dois sistemas avaliados nesta pesquisa de maneira a definir o valor mínimo teórico para cada indicador e compará-los com os resultados operacionais, avaliando, por fim, a eficiência energética das elevatórias.

Sugere-se às companhias de saneamento que os valores teóricos desses indicadores sejam apresentados nos projetos assim como, para maior confiabilidade dos resultados e melhor acompanhamento do desempenho energético, as variáveis hidráulicas e elétricas inerentes aos sistemas elevatórios, sejam medidas simultaneamente e armazenadas em banco de dados.

Sugere-se também que o método proposto seja ampliado para outros sistemas a fim de realizar *benchmarking* entre eles, bem como, aplicar em sistemas dotados de estações elevatórias com inversores de frequência.

REFERÊNCIAS

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 Suply 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 eficientização de água e energia não exploradas nos sistemas e água municipais. Washington: ALLIANCE, 2002.

ANA, Agência Nacional de Águas (Brasil). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: 2013. / Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12211: estudos de concepção de sistemas públicos de abastecimento de água. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

_____. NBR 12211: Estudos de concepção de sistemas públicos de abastecimento de agua. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

_____. NBR 12213: projeto de captação de água de superfície para abastecimento público. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

_____. NBR 12214: projeto de sistema de bombeamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

_____. NBR 12216: projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

_____. NBR 12218: projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

AUSTRALIAN GOVERNMENT. NATIONAL WATER COMISSION. National Performance Report 2010 – 2011. Canberra: Australian Government/NWC, 2012.

BARRY, J.A. Watergy: Energy and water efficiency in municipal water supply and wastewater treatment. Cost-effective savings of water and energy. Alliance to save energy. Washington, D.C. February 2007.

BRAGHIROLI, M.A., SANTOS, M.B. dos, BREGA FILHO, D. Estação Elevatória de Água de Santana: um caso de sucesso na redução de perdas e consumo de energia no setor de saneamento. 3ª International Workshop Advances in Cleaner Production. São Paulo. 2011.

BALESTIERI, J.A.P, VILANOVA, M.R.N. Energy and hydraulic in conventional water supply systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, n. 30, 2014. p. 701-714.

BALESTIERI, J.A.P, VILANOVA, M.R.N. Exploring de water-energy nexus in Brasil: The electricity use for water supple. Revista Energy, n. 85, Abril 2015. p. 415-432.

BRASIL. Fundação Nacional de Saúde. Manual de Saneamento. 3. ed. Brasília: FUNASA, 2004.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Resolução Normativa nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes e dá outras providências. Publicada no DOU nº 053, de 18/03/2005, págs. 58-63.

_____. Ministério das Cidades. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2013. Brasília: MCIDADES, 2014.

_____. Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2015 – Ano base 2014: Relatório síntese. Rio de Janeiro: EPE, 2015.

_____. ELETROBRAS. https://www.eletrobras.com. Acesso em Setembro de 2015.

BOLOGNESI, A., BRAGALI, C., LENZI, C. Energy efficiency optimization in water distribution systems. In: 12th International conference on computing and control for the water industry, Procedia Engineering, v.70, 2014, p. 181-190.

BORGES, A. Apostila Máquinas hidráulicas – bombas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2011.

CABRERA, E., PARDO, M.A., COBACHO, R. CABRERA, E.Jr. Energy Audit of water networks. Journal of water resources planning and management, v.136, 2010, p. 669-677.

CAMBOIM, W.L.L., SILVA, S.A. da, GOMES, H.P. Aplicação de técnicas Fuzzy no controle de pressão em sistemas de abastecimento de água. Revista Engenharia Sanitária Ambiental, volume 19, n.1. Jan/ mar 2014.

COELHO, B., CAMPOS, A.A. Efficiency achievement in water supply systems – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 30, 2014. p. 59-84.

DANILENKO, A., VAN DEN BERG, C., MACHEVE, B., MOFFITT, L.J. The IBNET Water Supply and Sanitation Performance Blue Book 2014: The International Benchmarking Network for Water and Sanitation Utilities Databook. Washington: World Bank Publications, 2014.

DINIZ, A.M.F., FONTES, C.H.O., DA COSTA, C.A., COSTA, G.M.N. Dynamic modeling and simulation of water supply system with applications for improving energy efficiency. Energy Efficiency, v. 8, 2015. p. 417-432.

DUARTE, P., ALEGRE, H., COVAS, D.I.C. Avaliação do desempenho energético em sistemas de abastecimento de água. VIII SEMINÁIO IBERO-AMERICANO. Lisboa – Portugal. 2008.
Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR). Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Guia de avaliação dos serviços de águas e resíduos prestados aos utilizadores – 2ª geração do sistema de avaliação. 2ª Edição. Lisboa. 2013.

_____ Relatório Anual dos Serviços de Águas e Resíduos em Portugal. Volume 1 – Caracterização do setor de águas e resíduos. Portugal. 2015.

FELDMAN, M. Aspects of energy efficiency in water supply systems. In: 5th IWA water loss reduction specialist conference. Cape Town, South Africa, Abril 2009. p. 85-89.

GAY, L.F., SINHA, S. Measuring energy efficiency in urban water systems using a mechanistic approach. Journal of infrastructure systems, v. 18, 2012, p. 139-145.

GOMES, H.P. Eficiência hidráulica e energética em saneamento: Análise Econômica de Projetos. 1ª Edição. São Paulo. ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2009.

GOMES, H.P. Sistemas de Bombeamento – Eficiência Energética. 1ª Edição. João Pessoa. Editora Universitária/ UFPB. 2009.

GOUVEIA, R.M.M. Modelo computacional de otimização para dimensionamento de redes de distribuição de água abastecidas por múltiplos bombeamentos. Tese de doutorado. Universidade Federal da Paraíba. 2012.

HAIDER, H., SADIQ, R., TESFAMARIAM, S. Performance indicators for small and medium sized water supply system: a review. Research press, v.22, 2014, p. 1-40.

HASHEMI, S., FILION, Y.R., SPEIGHT, V.L. Pipe-level energy metrics for energy assessment in water distribution networks. In: 13th Computer control for water industry conference. Published by Elsevier, v.119, 2015, p. 139-147.

LENZI, C., BRAGALLI, C., BOLOGNESI, A., ARTINA, S. From energy balance to energy efficiency indicators including water losses, Water science and technology: water supply, v. 13.4, 2013, p. 889-895

MENKES, M. Eficiência Energética, Política Públicas e Sustentabilidade. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília. 2004.

MOREIRA, D.F., RAMOS, H.M. Energy cost optimization in a water supply system case study. Journal of Energy, v. 2013. 9 páginas.

NETTO, J.M.A., ALVAREZ, G.A. Manual de Hidráulica. 7ª Edição. São Paulo. Editora Edgard Blucher Ltda. 1982.

NETTO, J.M.A., FERNANDEZ, M.F., ARAUJO, R., ITO, A.E. Manual de Hidráulica. 8ª Edição. São Paulo. Editora Edgard Blucher Ltda. 1998.

NATIONAL RESEARCH CONCIL OF CANADA – NRC. Model framework for assessment of state, performance, and management of Canada´s core public infrastructure. 2009.

PELLI, T., HITZ, H.U. Energy Indicators and savings in water supply. AWWA Journal, v. 92, n. 6, Junho 2000. p. 55-62.

PERRONI, J.C.A., WENDLAND, E. Avaliação da Eficiência Energética em Poços Profundos Utilizados para Abastecimento Público. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, volume 11, n.3. Jul/ Set 2006.

PETTERSON, M;G. What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues. Energy Policy, v. 24, no. 5, 1996, p. 377-390.

PLAPPALLY, A.K., LIENHARD, J.H.V. Energy requirements for water production, treatment, end use, reclamation, and disposal. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 16, Issue 7, 2012, p. 4818–4848.

PULEO, V., SAMBITO, M., FRENI, G. An environmental analysis of the effect of energy saving, production and recovery measures on water supply systems under scarcity conditions. Journal Energies, v. 8, 2015, p. 5937-5951.

REDES CIDADES EFICIENTES. http://www.rce.org.br/RCE/saneamento.html/ acesso em janeiro/2016.

RODRIGUES, R.C. Análise do Desempenho Hidroenergético de Sistemas de Abastecimento de Água do Município de Marabá/PA. Universidade Federal do Pará. 2012.

SANEPAR, Companhia de Saneamento do Paraná. Sistema corporativo de gestão industrial – SCI. Curitiba-PR. 2015.

_____. Companhia de Saneamento do Paraná. Relatório Anual de Administração e Demonstrações Contábeis de 2014. Curitiba. 2015.

SCANLAN, M. FILION, Y.R. Application of energy use indicators to evaluate energy dynamics in Canadian warter distribution systems. In: 13th Computer control for water industry conference. Published by Elsevier, v. 119, 2015, p. 1039-1048.

THE ECONOMIC REGULATOR OF THE WATER SECTOR IN ENGLAND AND WALES – OFWAT. http://www.ofwat.gov.uk/about-us/. Acesso em janeiro/2016.

TONIAL, F.C. Eficiência energética de estações de bombeamento: Estudo de caso do Campus do Vale da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Dissertação de mestrado. 2014

TSUTIYA, M.T. Redução do custo de energia elétrica em estações elevatórias de água e esgoto. In: 19º Congresso Brasileiro de engenharia sanitária e ambiental, Anais...Foz do Iguaçu: ABES, p. 2611-2625. 1997.

TSUTIYA, M.T. Sistemas de abastecimento de água. São Paulo. ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2004.

TSUTIYA, M.T. Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água. São Paulo. ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2005.

VIEIRA, F., RAMOS, H.M. Hybrid solution and pump-storage optimization in water supply system efficiency: A case study. Energy Policy, v. 36, 2008. p. 4142-4148.

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. Tese de doutorado. Universidade Estadual Paulista. 2012.

WWAP. United Nations World Water Assessment Programme. The United Nations World Water Development Report 2014: Water and Energy. Paris: UNESCO, 2014.

APÊNDICE A

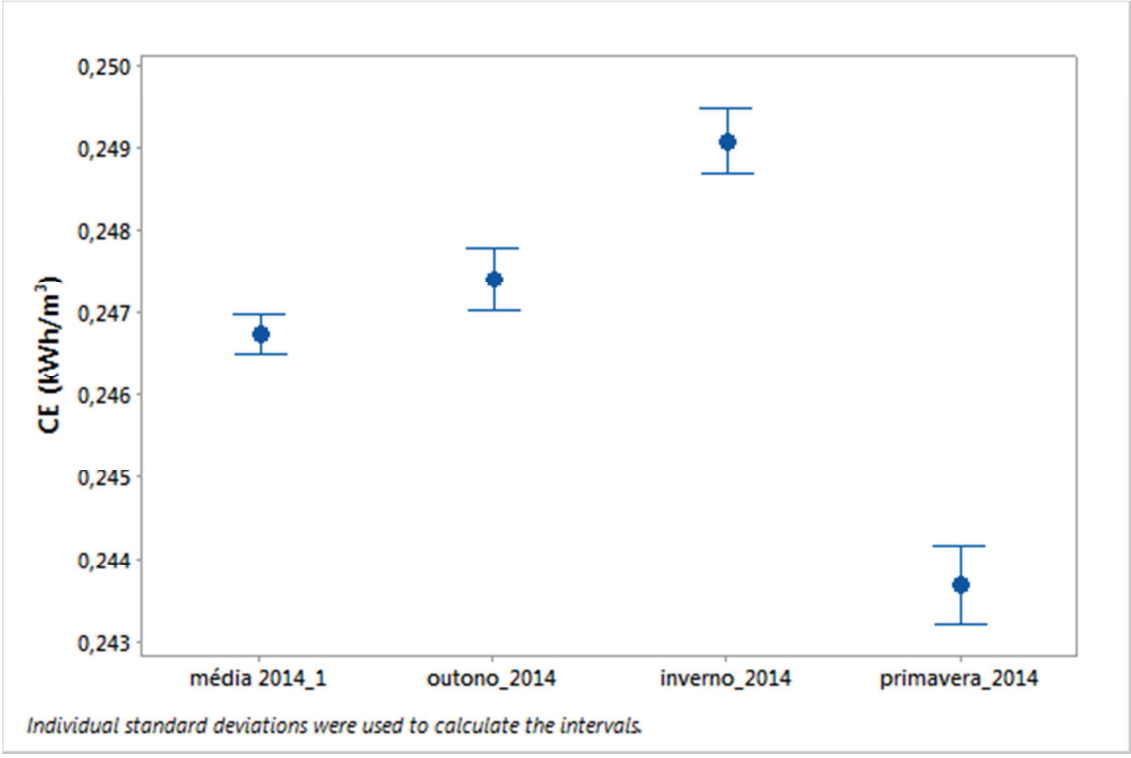


GRÁFICO 16 – INTERVALO DE DADOS PARA O *CE* PARA AS ESTAÇÕES DO ANO DE 2014

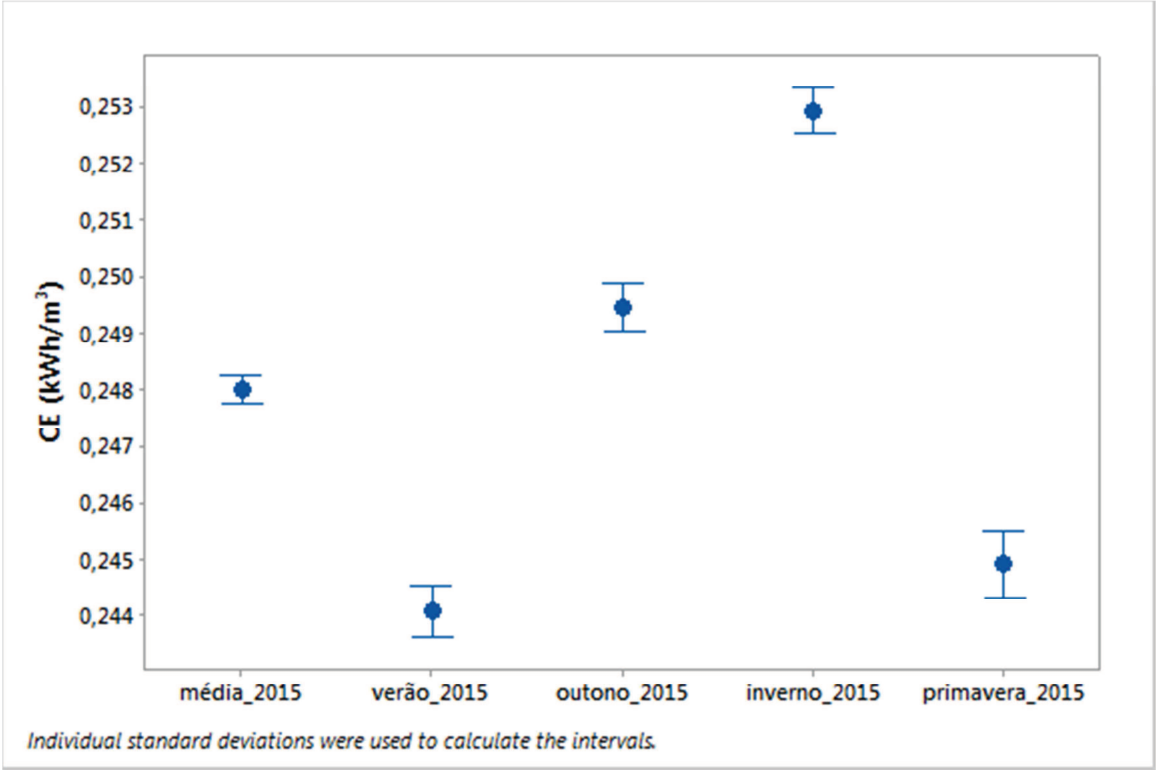


GRÁFICO 17 – INTERVALO DE DADOS PARA O *CE* PARA AS ESTAÇÕES DO ANO DE 2015

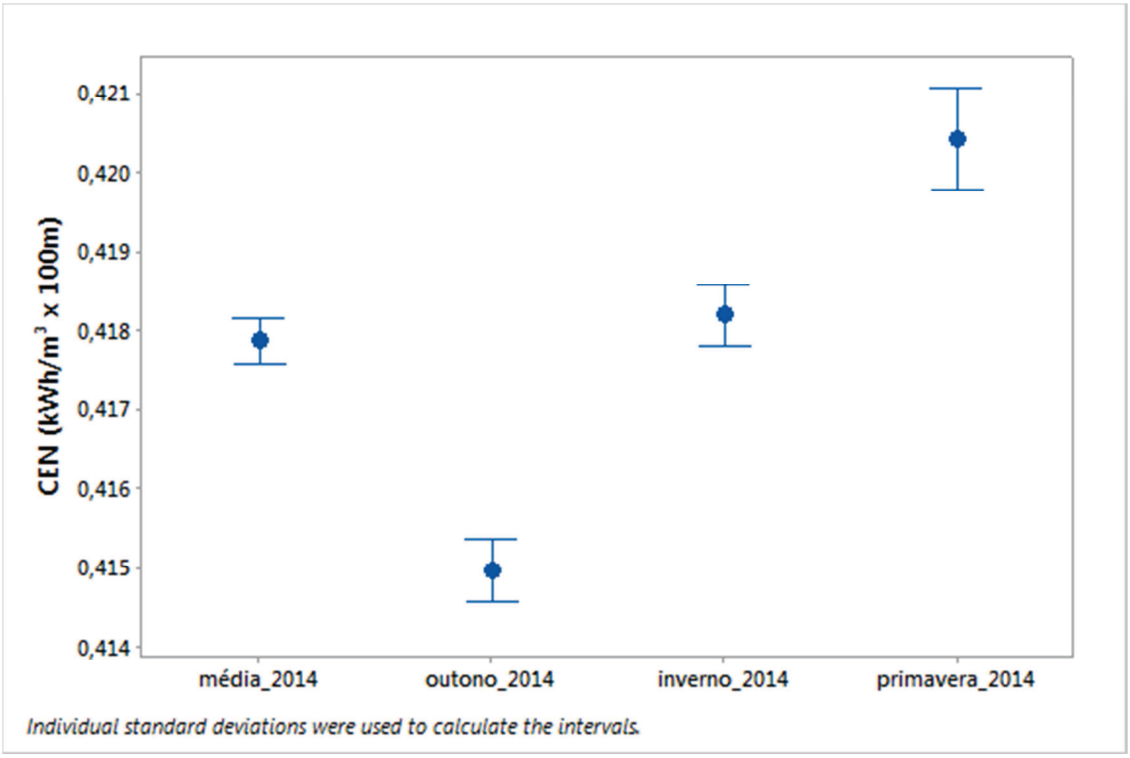


GRÁFICO 18 – INTERVALO DE DADOS PARA O *CEN* PARA AS ESTAÇÕES DO ANO DE 2014

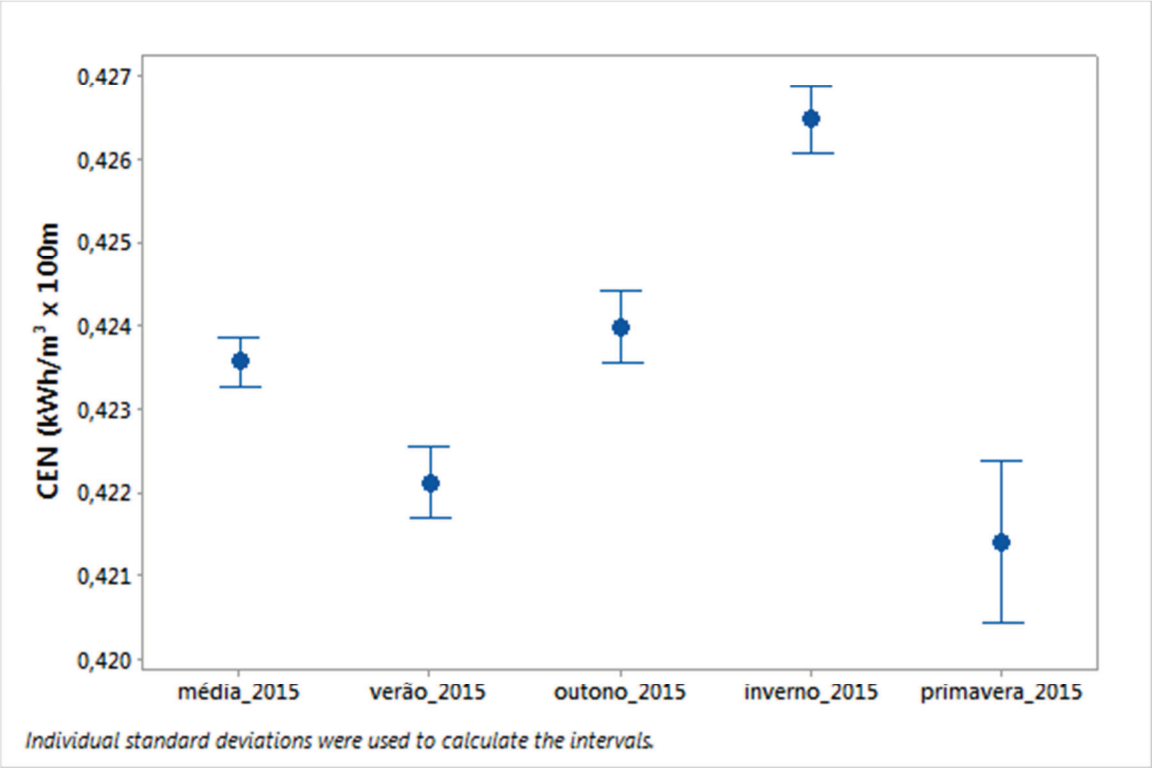


GRÁFICO 19 – INTERVALO DE DADOS PARA O *CEN* PARA AS ESTAÇÕES DO ANO DE 2015

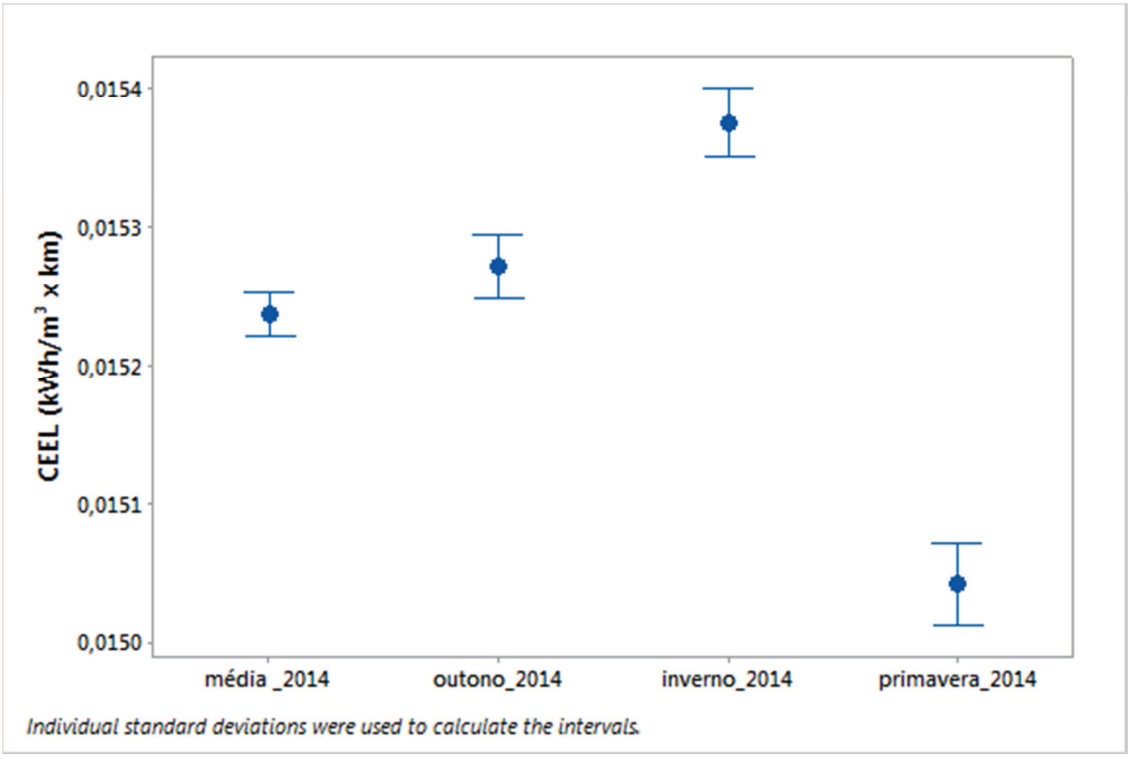


GRÁFICO 20 – INTERVALO DE DADOS PARA O CEE_L PARA AS ESTAÇÕES DO ANO DE 2014

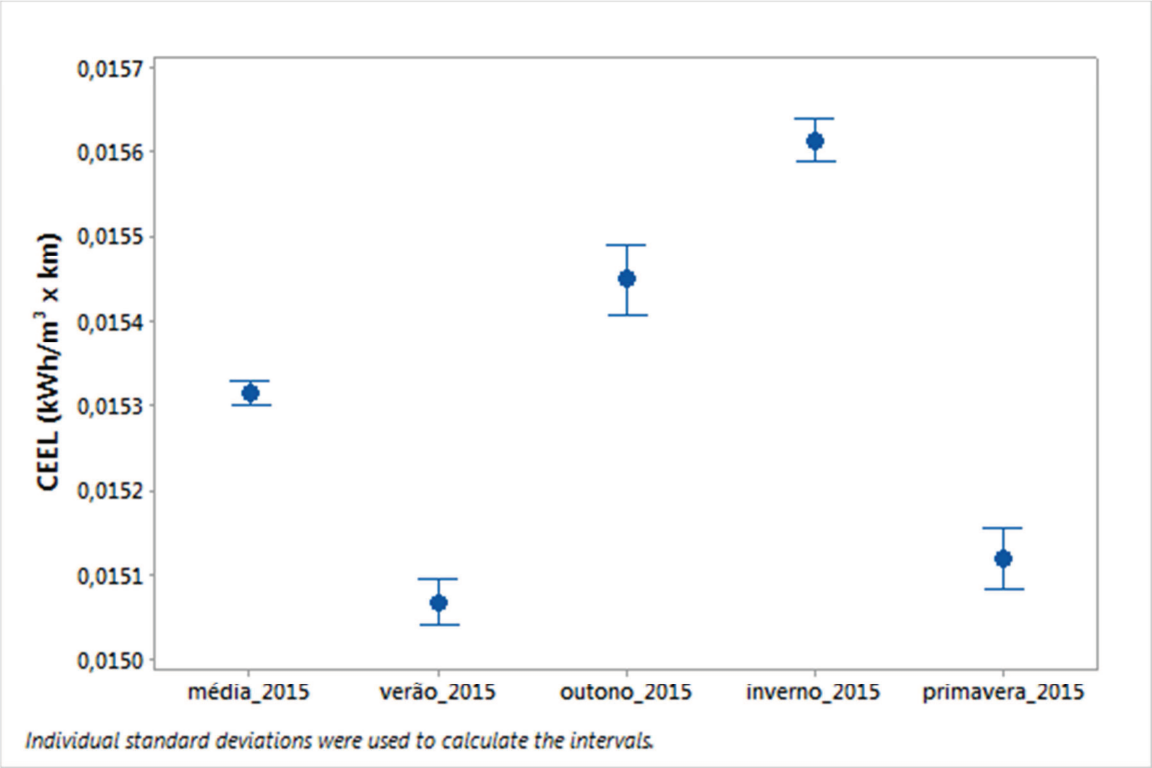


GRÁFICO 21 – INTERVALO DE DADOS PARA O CEE_L PARA AS ESTAÇÕES DO ANO DE 2015

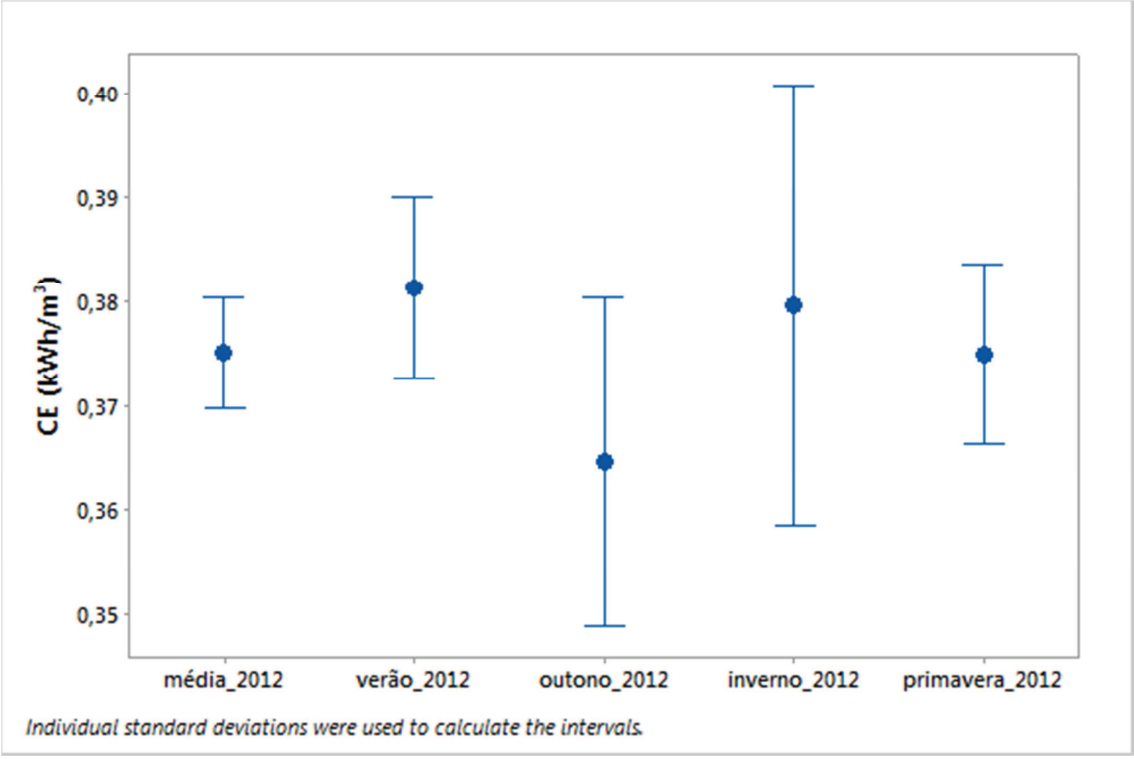


GRÁFICO 22 – INTERVALO DE DADOS PARA O *CE* PARA AS ESTAÇÕES DO ANO DE 2012

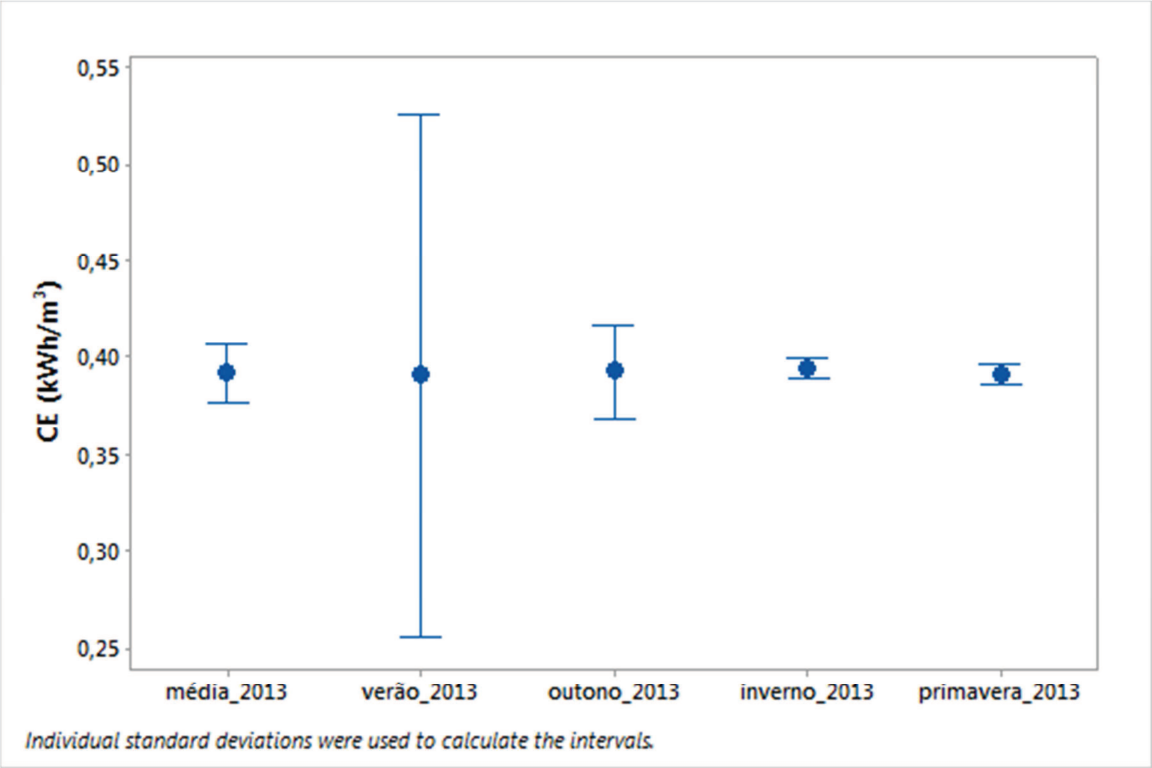


GRÁFICO 23 – INTERVALO DE DADOS PARA O *CE* PARA AS ESTAÇÕES DO ANO DE 2013

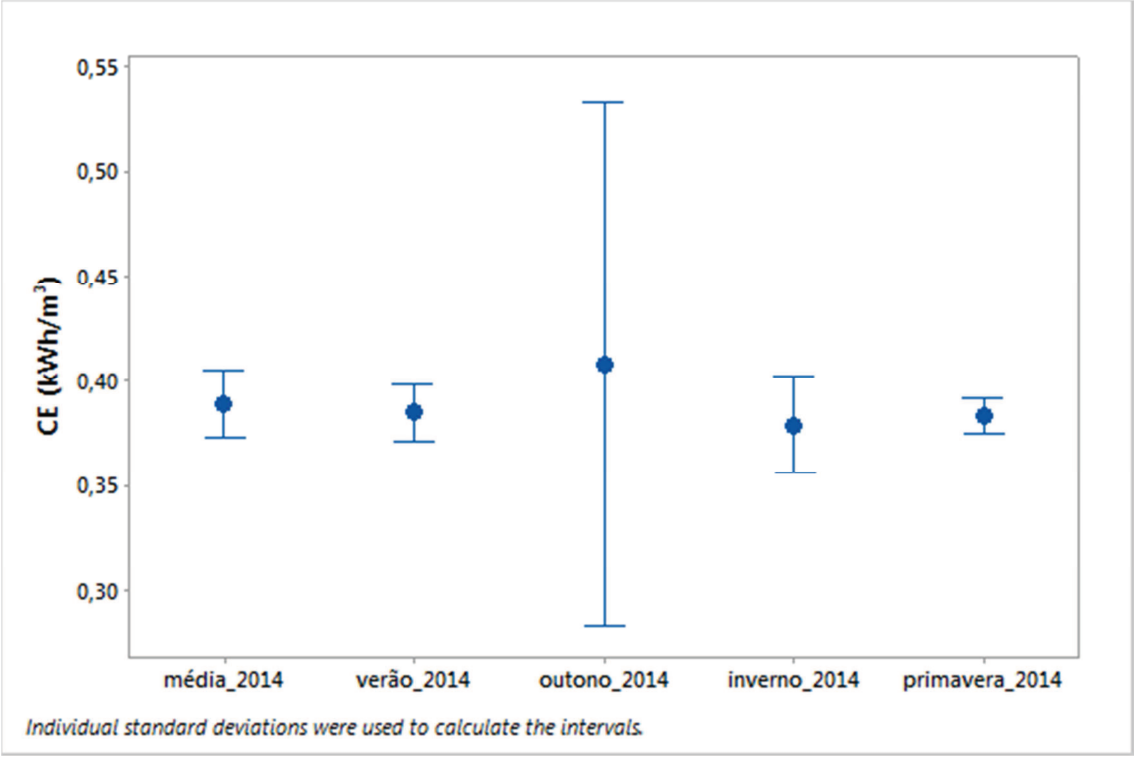


GRÁFICO 24 – INTERVALO DE DADOS PARA O *CE* PARA AS ESTAÇÕES DO ANO DE 2014

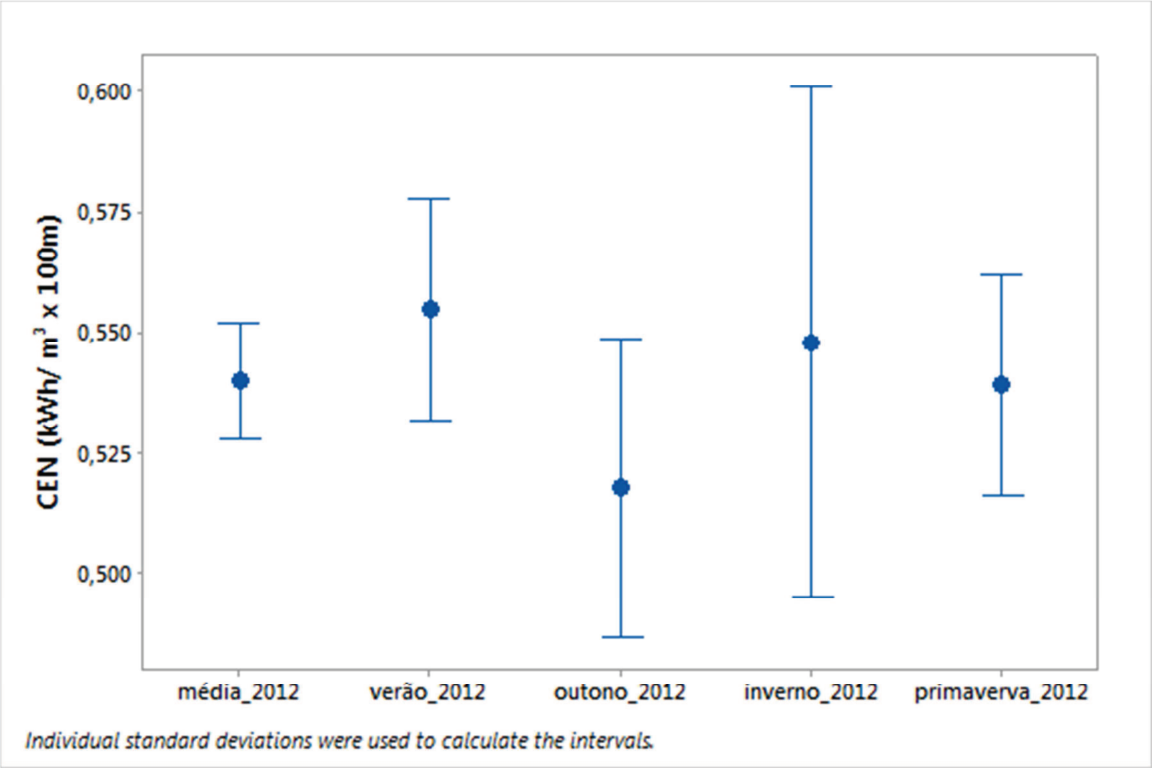


GRÁFICO 25 – INTERVALO DE DADOS PARA O *CEN* PARA AS ESTAÇÕES DO ANO DE 2012

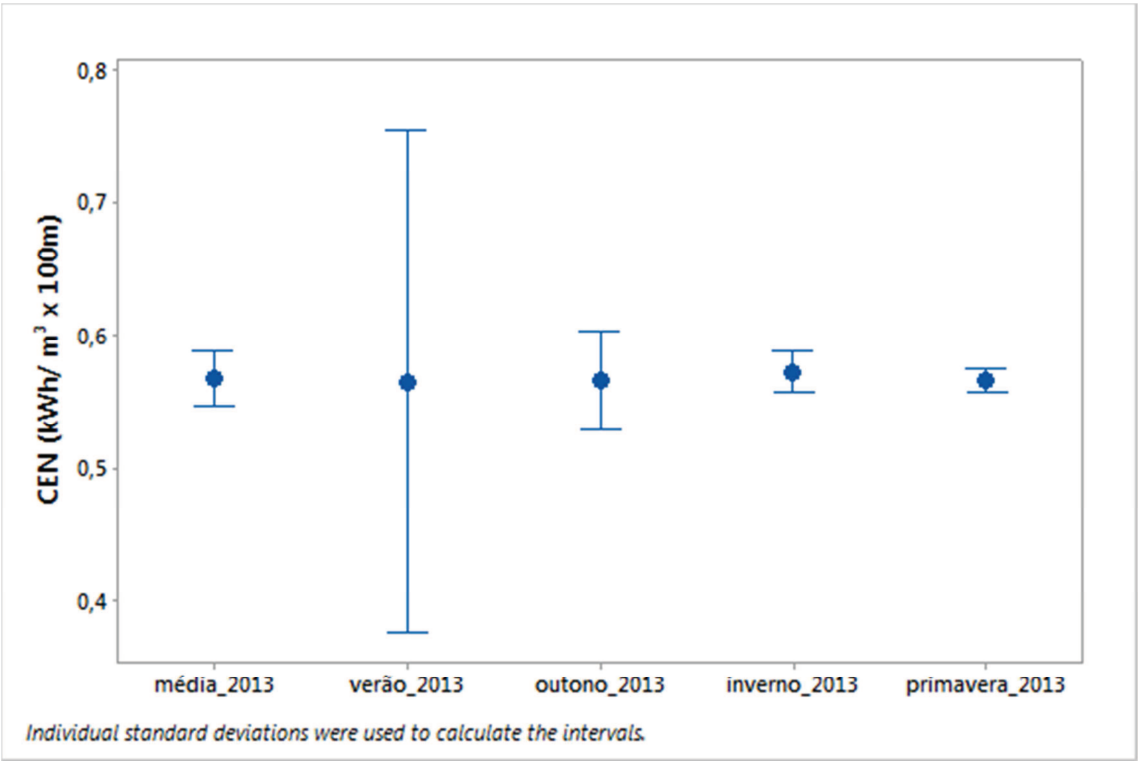


GRÁFICO 26 – INTERVALO DE DADOS PARA O *CEN* PARA AS ESTAÇÕES DO ANO DE 2013

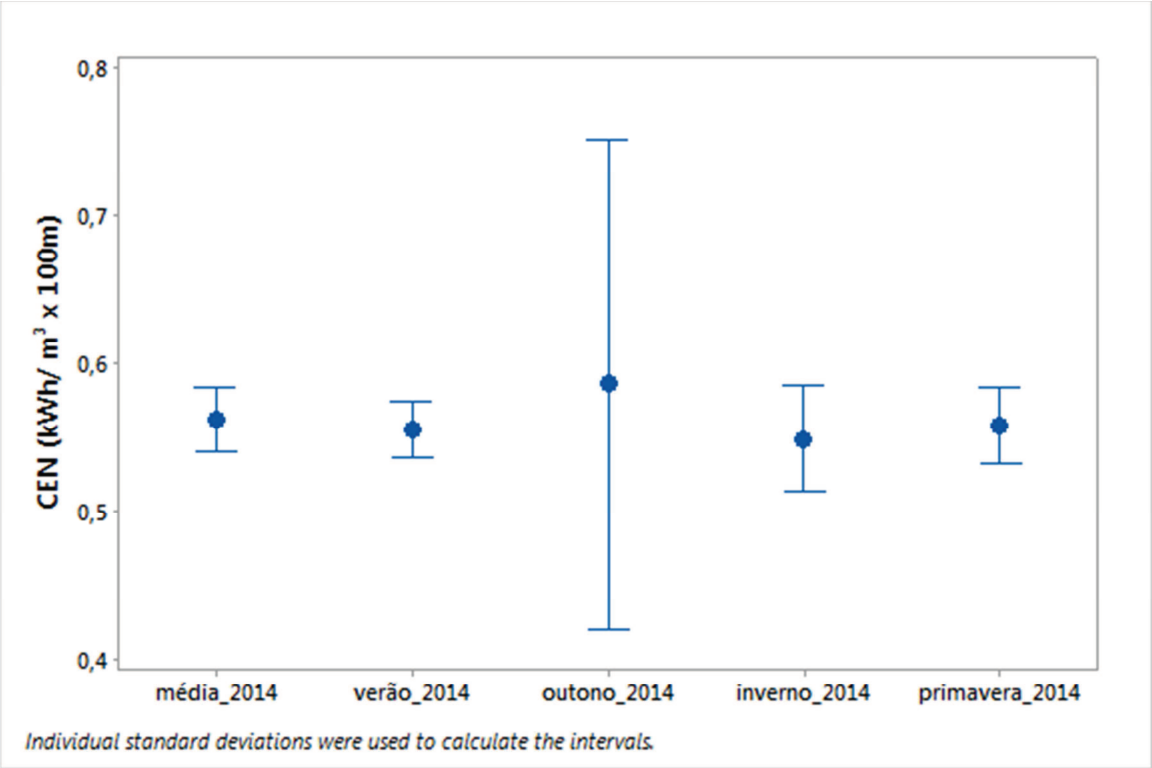


GRÁFICO 27 – INTERVALO DE DADOS PARA O *CEN* PARA AS ESTAÇÕES DO ANO DE 2014

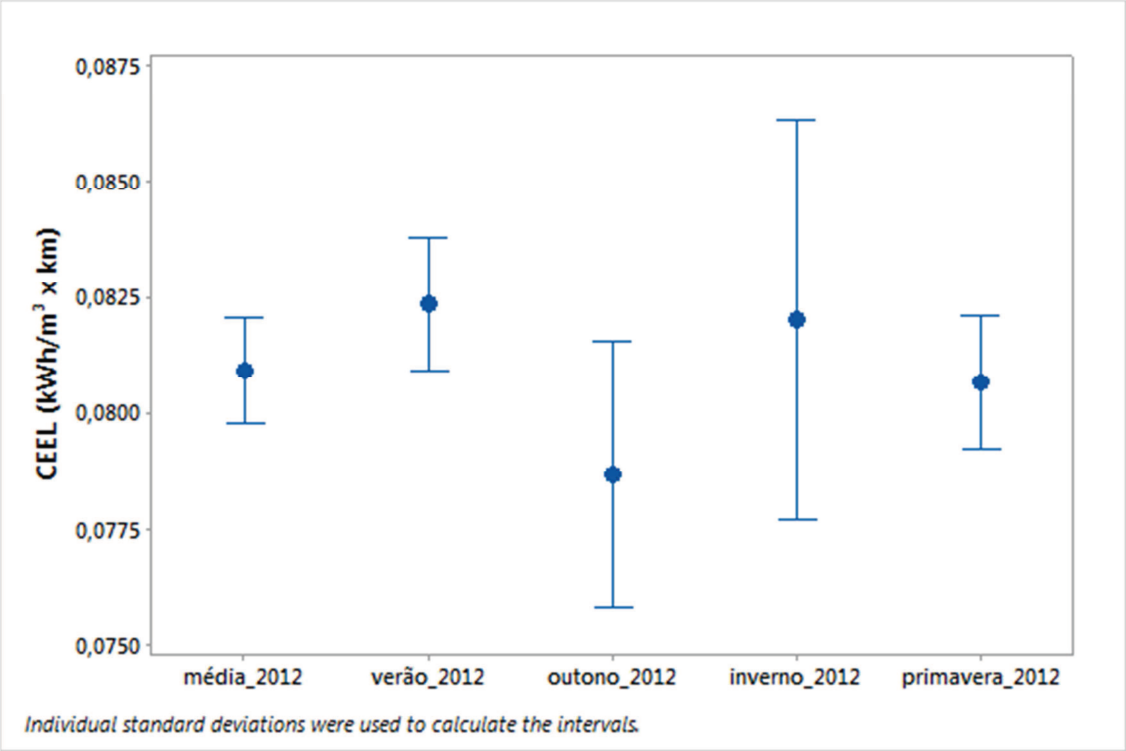


GRÁFICO 28 – INTERVALO DE DADOS PARA O CEE_L PARA AS ESTAÇÕES DO ANO DE 2012

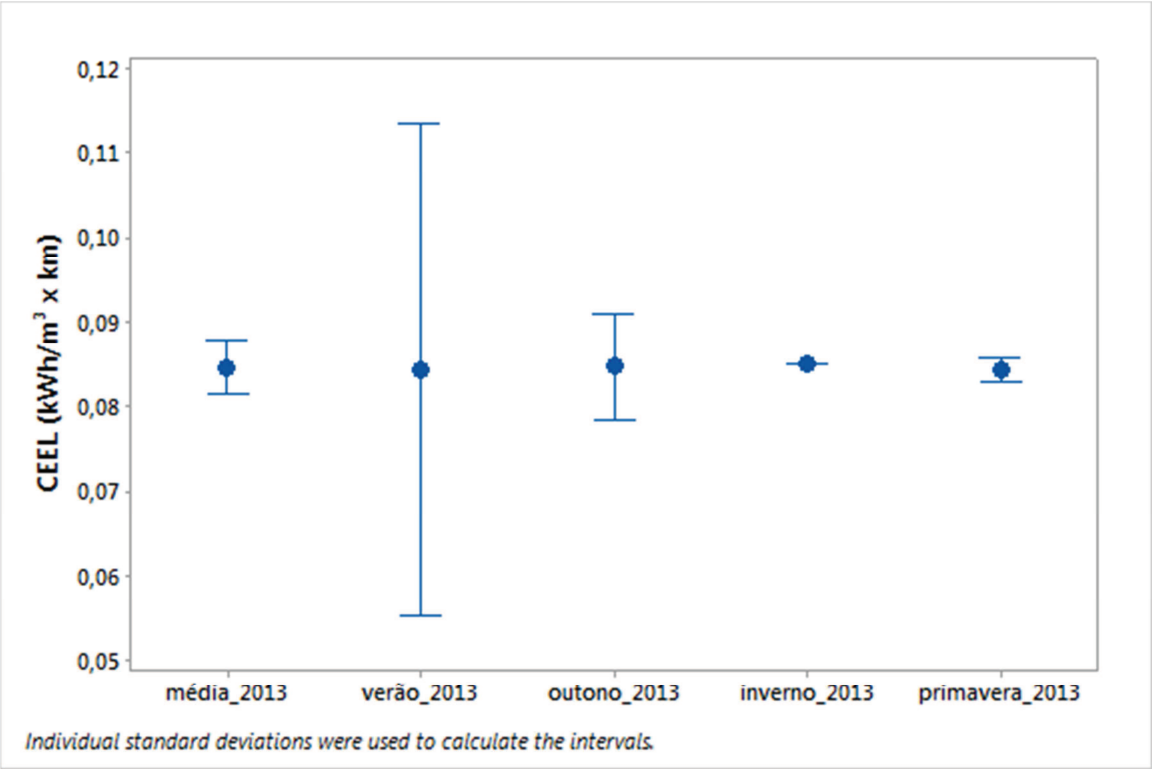


GRÁFICO 29 – INTERVALO DE DADOS PARA O CEE_L PARA AS ESTAÇÕES DO ANO DE 2013

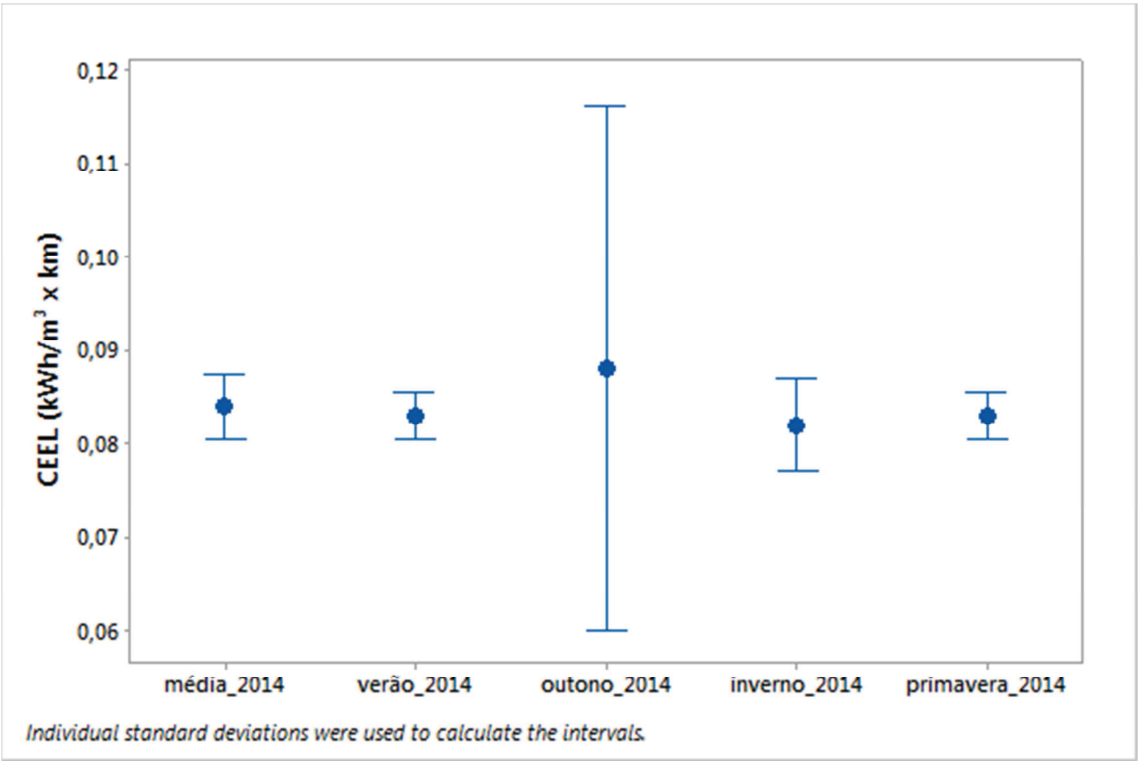


GRÁFICO 30 – INTERVALO DE DADOS PARA O CEE_L PARA AS ESTAÇÕES DO ANO DE 2014

APÊNDICE B

CD contendo processamento estendido dos dados para os estudos de caso 1 e 2.