

**XII Simposio Iberoamericano sobre planificación de sistemas de abastecimiento y drenaje**

**“ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO CONJUNTO MOTOBOMBA: ESTUDO DE CASO ESTAÇÃO DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA TRATADA OSCAR PEREIRA (ASCENSÃO)”**

*Marcelo Travassos de Mattos (1), Rafael Guerra Ortiz (2), Douglas da Silveira de Lima (3),  
Elisa Alberton Machado (4), Marcelo Giulian Marques (5)*

(1), (2), (3), (4), (5) Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500. Porto Alegre, RS, Brasil, (51) 3308 6114, mtm5587@gmail.com

**RESUMO**

Os sistemas de abastecimento de água no Brasil apresentam boas oportunidades de melhorias. Sabe-se que o bombeamento é o maior responsável pela eletricidade consumida por um sistema. O Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal do Rio Grande do Sul com o Departamento Municipal de Água e Esgoto, órgão responsável pelos processos sanitários de Porto Alegre, escolheram a Estação de Bombeamento de Água Tratada Oscar Pereira, subsistema do Menino Deus. A partir do estudo sintetizado dos dados coletados tornou-se possível quantificar as perdas do bombeamento e aferir a viabilidade para implantação de medidas de eficiência energética.

**Palabras claves:** sistema de abastecimento de água, eficiência energética, viabilidade econômica.

**ABSTRACT**

The water supply systems in Brazil show significantly opportunities for improvements. It is known that the water pumping is the main electricity consumer of a system. The Laboratory of Energy and Hydraulic Efficiency at Federal University of Rio Grande do Sul with the City Department of Water and Sanitation chose the Water Pumping Station Oscar Pereira, subsystem of Menino Deus, to analyze electric-hydraulic magnitudes in order to diagnose the system aiming future improvements. Based on the synthesized study of the collected data it became possible to quantify the hydraulic losses of the pumping and assess the viability of energy efficiency actions.

**Key words:** water supply system, energy efficiency, economic viability.

**SOBRE O AUTOR PRINCIPAL**

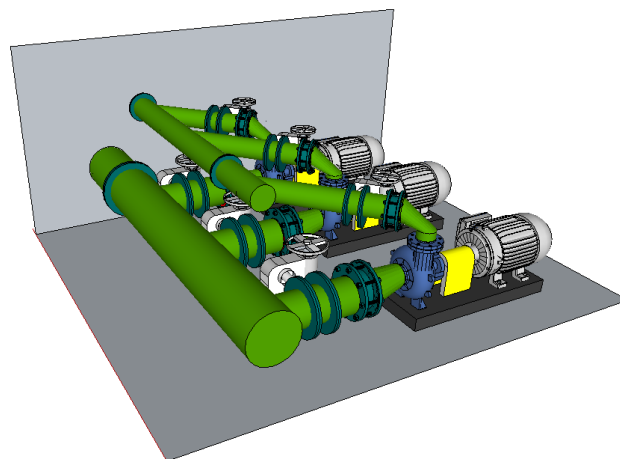
**Autor 1:** Engenheiro Eletricista pela Faculdade Pio Décimo, Especialista em Gerenciamento de Projetos Elétricos na Indústria pela FANESE, Mestrando em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental na UFRGS.

## INTRODUÇÃO

O uso consciente da água e da energia no setor produtivo é um requisito imperativo para o desenvolvimento econômico e social no mundo moderno, pela necessidade imprescindível da preservação do meio ambiente e da minimização dos gastos operacionais.

Nos últimos tempos, em virtude principalmente da repercussão do custo energético na operação das estações de bombeamento, as empresas prestadoras de serviço de saneamento estão buscando adotar medidas para aumentar a eficiência energética e, conseqüentemente, diminuir seus custos operacionais. De uma maneira geral, os diagnósticos e as ações de engenharia voltadas para solucionar os problemas da ineficiência são realizados por uma equipe multidisciplinar, que envolve profissionais com domínios técnicos nos campos da hidráulica, da mecânica e da elétrica.

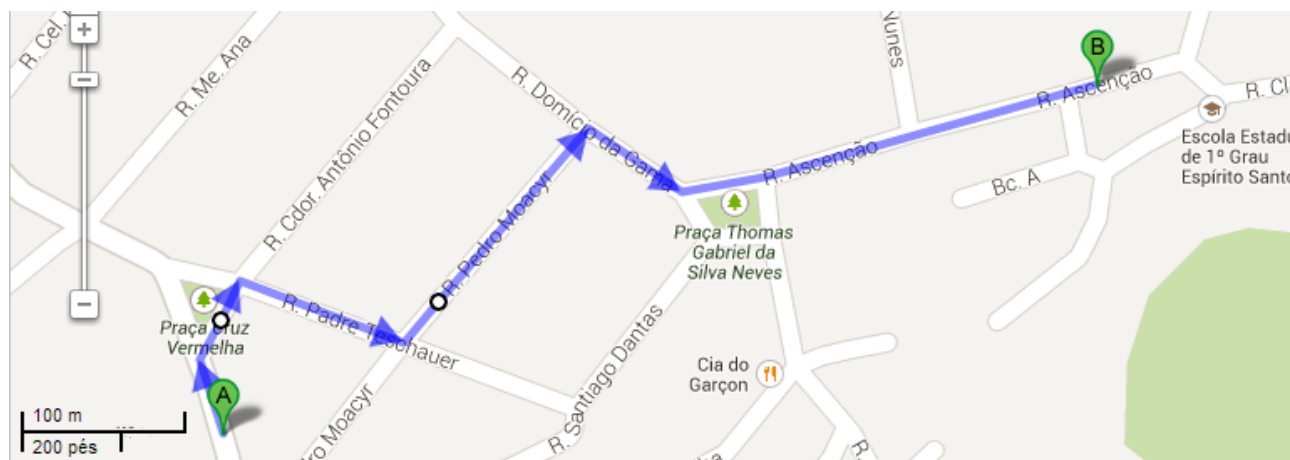
Dentre vários sistemas que o Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE) possui para abastecimentos dos bairros de Porto Alegre, capital do Rio Grande do Sul, foi escolhida para monitoramento das grandezas eletro-hidráulicas a Estação de Bombeamento de Água Tratada (EBAT), que é um dos subsistemas que compõem o sistema Menino Deus. A EBAT analisada possui três motobombas (figura 1) com dados nominais 100cv, 288m<sup>3</sup>/h e 55mca, transportando água tratada da casa de bombas na Av. Oscar Pereira, 3.495 (ponto A na figura2) para o reservatório na Rua Ascensão, 239 (ponto B na figura 2), com aproximadamente 700m de tubulação, como mencionado pelo Plano Diretor de Água Porto Alegre RS (DMAE, 2010).



**Figura 1. Disposição das bombas.**

A casa de bombas é suprida pela EBAT Cascatinha, ou reservatório Catumbi, de 10.000m<sup>3</sup> com cota fixa de 79m por uma tubulação de diâmetro nominal 600mm, que destina-se à sucção das três motobombas de 100cv do subsistema Oscar Pereira e de outras três motobombas de 300cv do subsistema 1º de maio. A estação de bombeamento estudada encontra-se numa cota fixa de 54m e recalca a água tratada por uma tubulação de diâmetro nominal 300mm para o reservatório com volume 450m<sup>3</sup> a uma cota fixa de 117m.

Utilizando equipamentos e métodos adequados, foram monitoradas as grandezas eletro-hidráulicas com a finalidade de diagnosticar o funcionamento atual do conjunto motobomba e, assim, encontrar pontos ineficientes que poderão receber futuras melhorias.



**Figura 2. Trajeto do sistema. Fonte: Google maps**

## BASE CIENTÍFICO - TEÓRICO

Para avaliar a eficiência do conjunto motobomba, é necessário determinar o rendimento do mesmo, de modo que possa ser feita a comparação com equipamentos mais eficientes, bem como os estudos de perdas e de viabilidade de melhorias. O procedimento de cálculo descrito a seguir é baseado na norma ISO 9906 (1999) e também pelo Manual de Sistemas de Bombeamento (Gomes *et al*, 2012). Primeiramente, calcula-se a altura manométrica através da equação 1.

$$H = \left( \frac{P_2}{\rho \cdot g} - \frac{P_1}{\rho \cdot g} \right) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot g} + (z_2 - z_1) \quad (1)$$

Onde:

H [mca] - altura manométrica;

$p_2/\rho g$  [m] - pressão no manômetro ou transdutor no recalque da bomba;

$p_1/\rho g$  [m] - pressão na manovacuômetro ou transdutor na sucção da bomba;

$v_2$  [m/s] - velocidade média de escoamento no recalque da bomba;

$v_1$  [m/s] - velocidade média de escoamento na sucção da bomba;

$z_2$  [m] - cota de posição no recalque da bomba;

$z_1$  [m] - cota de posição na sucção da bomba.

As velocidades médias da água na bomba são calculadas em função dos diâmetros da sucção e do recalque, conforme apresentado na equação 2:

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \quad (2)$$

Onde:

v [m/s] - velocidade média de escoamento;

Q [m<sup>3</sup>/s] – vazão volumétrica de água no conduto;

D [m] - diâmetro da sucção e recalque da bomba.

A diferença entre as cotas de posição  $z_2$  e  $z_1$  é determinada tomando-se como referência os pontos onde são realizadas as tomadas de pressão na entrada e saída da bomba. Com a altura manométrica calcula-se a potência hidráulica da bomba pela equação 3.

$$P_{hid} = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q \quad (3)$$

Onde:

$P_{hid}$  [kW] - potência hidráulica da bomba;

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] - massa específica da água;

g [m/s<sup>2</sup>] - aceleração da gravidade;

Com a potência hidráulica calculada, podemos então relacioná-la com a potência mecânica envolvida e chegarmos ao rendimento através da equação 4:

$$\eta_b = \frac{P_{hid}}{P_m} \quad (4)$$

Onde:

$\eta_b$  [%] - rendimento da bomba;

$P_m$  [kW] - potência mecânica no eixo.

De maneira análoga encontra-se o rendimento do motor utilizando-se a equação 5:

$$\eta_m = \frac{P_m}{P_{el}} \quad (5)$$

Onde:

$\eta_m$  [%] - rendimento do motor elétrico;

$P_{el}$  [kW] - potência elétrica ativa do motor.

Porém, para chegar ao resultado final deste trabalho não foi utilizado medidor de torque para determinar a potência mecânica. Assim as equações 4 e 5 se relacionam.

$$P_m = \frac{P_{hid}}{\eta_b} \therefore P_m = \frac{\eta_m}{P_{el}}$$

Com os rendimentos da bomba e do motor elétrico, é encontrado o rendimento do conjunto pela equação 6.

$$\eta_{mb} = \eta_b \cdot \eta_m \quad (6)$$

Ou, analogamente, pela equação 7:

$$\eta_{mb} = \frac{P_{hid}}{P_{el}} \quad (7)$$

Onde:

$\eta_{mb}$  [%] - rendimento do conjunto motobomba;

Tendo em vista que o diâmetro do rotor e a rotação de trabalho estão distintos do valor nominal do fabricante, determina-se a curva da bomba atual em uma estação de bombeamento utilizando-se as Leis de Afinidade. A equação 8 é utilizada para bombas girando na mesma rotação, porém com diâmetros diferentes, e a equação 9, para bombas iguais com velocidade de rotação diferente.

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{D_2^2}{D_1^2} \quad (8)$$

$$\frac{H_1}{N_1^2} = \frac{H_2}{N_2^2} \quad (9)$$

Onde:

$H_1$  [mca] – Altura manométrica na condição 1;

$H_2$  [mca] - Altura manométrica na condição 2;

$D_1$  [m] – Diâmetro do rotor na condição 1;

$D_2$  [m] – Diâmetro do rotor na condição 2;

$N_1$  [rpm] – Rotação na condição 1;

$N_2$  [rpm] – Rotação na condição 2.

Entretanto, nossa análise da eficiência envolve um estudo mais aprofundado das demais grandezas eletromecânicas envolvidas neste sistema, como por exemplo, o fator de potência, o escorregamento e o nível de tensão.

Para encontrar a potência ativa em “cargas reativas”, em nosso caso de um motor de indução, onde existe defasagem entre o ângulo da tensão e da corrente, aplica-se a equação 10:

$$P_{el} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (10)$$

Onde:

$P_{el}$  [W] - potência elétrica ativa;

$U$  [V] - tensão de linha;

$I$  [A] - corrente de linha;

$\cos \varphi$  [rad] - Fator de potência.

Para a potência aparente utiliza-se a equação 11.

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad (11)$$

Onde:

$S$  [VA] - potência elétrica aparente;

O procedimento para a potência reativa é ilustrado pela equação 12. Esta, em especial, é importante ser encontrada e calculada, pois comumente grandes consumidores que praticam uma boa gestão da energia fazem o controle desta para evitar tarifas extras no faturamento.

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (12)$$

Onde:

$Q$  [VAr] - potência elétrica reativa;

$\varphi$  [°] - ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente de fase.

Outra grandeza importante no estudo é o fator de potência, indicado por  $\cos \varphi$ , que é a relação entre a potência ativa ( $P$ ) e a potência aparente ( $S$ ) dada pela equação 13.

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (13)$$

Assim, para carga resistiva, o  $\cos \varphi = 1$ . Em carga indutiva, o  $\cos \varphi$  denomina-se “atrasado” e em carga capacitiva, o  $\cos \varphi$  é “adiantado”. Os termos atrasado e adiantado referem-se ao ângulo da corrente em relação à tensão.

Um motor não consome somente potência ativa, que depois é convertida em trabalho mecânico e calor (perdas), mas também potência reativa, necessária para magnetização, e que, no entanto, não produz trabalho.

No Brasil foi criada uma portaria pelo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE) em 25 de março de 1992 de número 085, com o objetivo de aperfeiçoar o aproveitamento do sistema elétrico brasileiro, determinando um fator de potência de referência das cargas de 0,92.

Logo, é imprescindível a utilização de motores que tenham fator de potência acima de 0,92, com alto rendimento e bem dimensionado para seu trabalho. Além disso, são utilizados outros equipamentos em conjunto, como o banco de capacitores e o inversor de frequência, para chegar ao valor de referência de fator de potência, reduzindo assim a energia reativa.

Para a análise do motor, é descrito pela equação 14 o escorregamento, isto é, quando o eixo do motor gira a uma velocidade diferente da velocidade síncrona. Este se relaciona com o conjugado fornecido à carga e, assim, com a potência mecânica, respeitando a seguinte natureza: quanto maior a carga, maior terá que ser o conjugado necessário para acioná-la.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \quad (14)$$

Onde:

$s$  [%] – escorregamento;

$n_s$  [rpm] – velocidade síncrona

$n$  [rpm] – velocidade do motor

Portanto, à medida que a carga aumenta, a rotação do motor diminui. Quando a carga é zero, motor em

vazio, o rotor girará praticamente com a rotação síncrona.

A velocidade síncrona do motor é definida pela velocidade de rotação do campo girante, a qual depende do número de pólos do motor e da frequência da rede, conforme mostrado na equação 15.

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{2p} \quad (15)$$

Onde:

$n_s$ [rpm] – velocidade síncrona;

$f$ [Hz] – frequência da rede;

$p$  – número de pares de pólos do motor.

## METODOLOGIA

A viabilização do estudo realizado ocorre a partir da aquisição e da comparação dos dados da equipe LENHS RS junto aos equipamentos da EBAT Oscar Pereira.

Os aparelhos de medição consistem em um registrador analisador de energia HIOKI 3197 e um alicate amperímetro multiteste Extech para as medições elétricas e um tacômetro Homis DT2236B para aferir a rotação de trabalho do conjunto motobomba. Ainda, foram usados dois medidores de pressão LAMON 0-100mca e 0-50mca, que medem a pressão de recalque e sucção da bomba, respectivamente, e dois manômetros analógicos de ponteiro.

Os dados de pressão e de energia foram coletados em intervalos de um minuto, com um total de 24 aquisições, divididas em oito minutos em estado de repouso e 16 minutos em estado de pleno funcionamento.

Respeitando as normas de segurança vigente, os equipamentos foram instalados para realizar as medições elétricas através de alicates amperímetros e garras de tensão do analisador, já pré-programado para medir os parâmetros desejados (fotografia 1). Além disso, foi feita comparação com o alicate amperímetro multiteste (fotografia 2).



**Fotografia 1. Instalação dos alicates amperímetro do analisador de energia.**



**Fotografia 2. Alicate amperímetro multiteste.**

Na programação do Analisador Registrador de Energia, foi definido o cálculo do fator de potência desconsiderando a influência das harmônicas de tensão e corrente. O fator de potência foi calculado a partir da defasagem entre as formas de onda das duas grandezas, conforme a equação 13.

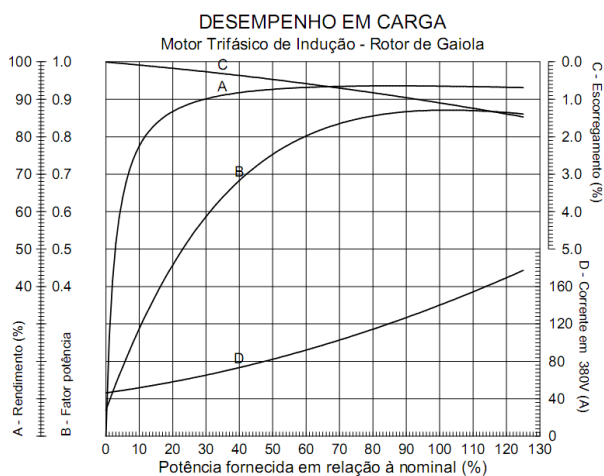
Para determinação do escorregamento do motor, utilizou-se a equação 14. A velocidade do rotor foi obtida através do Tacômetro a laser (fotografia 3).



**Fotografia 3. Tacômetro.**

Já a velocidade síncrona é proporcional à frequência e ao número de pólos do motor, conforme a equação 15.

Com os valores do escorregamento, do fator de potência medido e da corrente, torna-se possível estimar a potência mecânica fornecida pelo eixo do motor elétrico através das curvas do fabricante (figura 3), proposto pelo Guia de Especificação de Motores Elétricos (WEG, 2012).



**Figura 3. Curvas do motor.**

Entretanto, a EBAT estudada possui inversor de frequência, que possibilita uma partida suave e também realiza a modulação da frequência da motobomba (fotografia 4). Por este motivo, fica incapacitado o uso das curvas, pois estas referem-se à bomba em pleno funcionamento em 60Hz diretamente ligada na rede elétrica.

Para análise os dados foram coletados em apenas uma motobomba, visto que os três conjuntos apresentam os mesmos dados nominais, têm a mesma data de compra e aproximado tempo de funcionamento.



**Fotografia 4. Inversor de frequência.**

Foram observados os valores registrados pelos manômetros de ponteiro do DMAE (fotografia 5) e registrados pelos medidores de pressão (fotografia 6).



**Fotografia 5. Manômetro na sucção.**



**Fotografia 6. Medidor de pressão no recalque.**

Para validação da vazão bombeada, foram utilizados dados históricos de pitometria realizadas pela equipe



A bomba apresenta uma vazão que corresponde a 71% da vazão nominal para um decréscimo de 6% da rotação nominal. Encontrou-se potência hidráulica de 29,6 kW, considerando-se a massa específica da água 998,2 kg/m<sup>3</sup> e a aceleração da gravidade no local em 9,8 m/s<sup>2</sup>.

Assim fazendo o uso da equação 7, chega-se ao seguinte resultado para eficiência do conjunto motobomba incluindo o inversor:

$$\eta_{mb} = \frac{P_{hid}}{P_{el}} = \frac{29,6}{55,26} = 53,53\%$$

## CONCLUSÃO, RECOMENDAÇÃO E TRABALHOS FUTUROS

O estudo de caso realizado demonstra a aplicação dos métodos e das técnicas propostos por bibliografias. Pelos quais foi possível analisar os componentes principais de uma estação de bombeamento.

Nesta estação elevatória, já é possível enxergar evolução e melhorias, como a utilização de banco de capacitores e de inversor de frequência, melhorando assim o fator de potência, o monitoramento das grandezas hidráulicas em loco por manômetros, as grandezas elétricas por instrumentos nos painéis elétricos e online via telemetria utilizando transdutores, os sensores de nível, entre outros.

Os resultados obtidos para os ensaios dos conjuntos motobombas demonstrou uma divergência entre os dados de fabricação e os dados coletados por medição em loco. Um dos motivos é a adição do inversor de frequência, que é um componente que dissipa energia elétrica para suavizar a partida e modula a potência e a frequência. Outro motivo seria a quantidade de perdas envolvidas na transferência de energia (figura 6). Também deve-se observar a idade do sistema, considerando-se, por exemplo, a fabricação da bomba em 1998.

Isso mostra que os conjuntos já estão desgastados, seja pelo seu tempo de operação ou pela manutenção inadequada. Questiona-se, assim, a viabilidade de sua troca, já que atualmente é possível encontrar no mercado bombas e motores de alto rendimento.

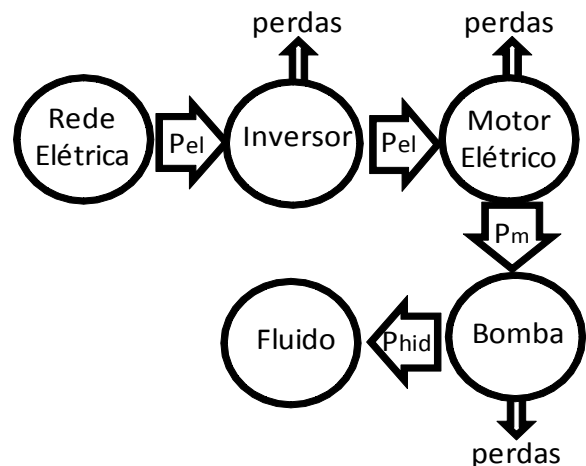


Figura 6. Transferência de energia.

Outra ação de eficiência energética que pode aprimorar este sistema é o estudo da perda de carga e a redução da altura manométrica de bombeamento, pois o desnível geométrico é de 38m e a bomba trabalha em torno dos 53mca. A altura manométrica de bombeamento é uma grandeza que impacta de forma diretamente proporcional na potência demandada pelo sistema (assim como a vazão), acarretando em bombas e motores menores, resultando em menor demanda de energia.

Porém a eficiência de uma estação elevatória não depende apenas do rendimento dos seus componentes, e sim de uma operação otimizada em conjunto com a manutenção adequada de todo o sistema.

Recomenda-se para EBAT um aperfeiçoamento da automação que já é presente, com instalação de medidores de vazão eletromagnéticos na saída da estação e do reservatório superior, possibilitando averiguação do ponto de operação da bomba, totalização do volume bombeado e curva de demanda na distribuição. Com estes dados, será possível melhor uso do inversor de frequência, modulando este de acordo com a demanda. Também com a totalização da água bombeada, se quantificaria, com maior precisão, as perdas envolvidas no sistema.

Para trabalhos futuros será feita uma maior instrumentalização das grandezas, acrescentando medidores registradores de vazão ultrassônicos, registradores de pressão na chegada ao reservatório superior e registradores de nível. Desta maneira, possibilitará o estudo do sistema como um todo com aquisições de dados mensais, permitindo cálculo de indicadores e índices, cálculo de quantificação de perdas e de viabilidade econômica para futuras intervenções.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Departamento Municipal de Água e Esgoto de Porto Alegre (DMAE) em especial ao Engenheiro Mecânico, M.Sc. Natal Antonini e ao Engenheiro Civil Giordano da Silva Jobim pela atenção prestada, permissão da realização dos testes, e disponibilização de acompanhamento técnico para esta pesquisa.

Também aos integrantes do Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Em especial, ao Professor Dr. Eder Daniel Teixeira, ao Professor Dr. Luiz Augusto Magalhães Endres, ao doutorando João Gerdau de Borja pelo auxílio na análise dos dados e nos cálculos hídricos, ao bolsista de iniciação científica Thales Correa pela criação do modelo 3D da casa de bombas, ao técnico Leandro Soares, ao bolsista de iniciação científica Estevão Leão Marques e aos demais colaboradores.

Ao Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS), parte integrante do LOH, e aos seus colaboradores. Em especial ao Professor M.Sc. Eduardo Pedro Eidt, à Doutoranda Joice Kuritza, ao Mestrando Sergio Leonardo Neves e aos demais integrantes.

Ao Governo do Brasil, pelo apoio financeiro concedido através das Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (ELETROBRÁS), da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq).

## BIBLIOGRAFIA

Associação Brasileira de Normas Técnica. NBR 7094. (2003). Máquinas Elétricas Girantes – Motores de Indução - Especificação. Rio de Janeiro, RJ: ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnica, NBR 12215 (NB 591). (1991). Projeto de Adutora de Água para Abastecimento Público. Rio de Janeiro, RJ: ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnica, NBR 12211. (1992). Estudos de Concepção de sistemas Públicos de Abastecimento de Água. Rio de Janeiro, RJ: ABNT.

Departamento Municipal de Água e Esgoto. (2010). Plano Diretor de Água Porto Alegre – RS. DMAE.

Gomes, Heber P., e Carvalho, Paulo S O. (2012). Manual de Sistemas de Bombeamento. João Pessoa, Editora Universitária – UFPB.

Gomes, Heber P. (2009). Sistemas de Bombeamento – Eficiência Energética. João Pessoa. Editora Universitária - UFPB.

Grupo WEG - Unidade Motores. (2012). Guia de Especificação de Motores Elétricos. Jaraguá do Sul, SC: WEG.

ISO 9906, (1999). Rotodynamic Pumps - Hydraulic Performance Acceptance Tests. Grades 1 and 2.

KSB Bombas Hidráulicas AS. (2009). Manual de Curvas Características. Várzea Paulista, SP: KSB.

GOOGLE MAPS. (2013). Google Maps. <http://maps.google.com.br>.