

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Everton Luis Polese

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE
BOMBEAMENTO: USO DO VARIADOR DE FREQUÊNCIA**

Porto Alegre
julho 2010

EVERTON LUIS POLESE

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE
BOMBEAMENTO: USO DO VARIADOR DE FREQUÊNCIA**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Marcelo Giulian Marques
Coorientador: Eduardo Pedro Eidt

Porto Alegre
julho 2010

EVERTON LUIS POLESE

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE
BOMBAMENTO: USO DO VARIADOR DE FREQUÊNCIA**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, julho de 2010

Prof. Eng. Marcelo Giulian Marques
PhD pela Université Laval/Québec/CA
Orientador

Eng. Eduardo Pedro Eidt
Mestre em Engenharia pela ULBRA
Coorientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Eng. Marcelo Giulian Marques
PhD pela Université Laval/Québec/CA

Eng. Eduardo Pedro Eidt
Mestre em Engenharia pela ULBRA

Eng. Fernanda de Carli Tonial
Engenheira em Energia pela UERGS

Eng. Rafael André Wiest
Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela UFRGS

Dedico este trabalho aos meus pais, Sandro e Adriana,
pelo apoio ininterrupto não só durante o trabalho,
mas por toda graduação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Professor Marcelo Giulian Marques, pela orientação, apoio e motivação durante a realização deste trabalho, sem o qual não teria obtido êxito.

Agradeço ao Engenheiro Eduardo Pedro Eidt, pela coorientação e igual apoio em todo o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a Professora Carin Maria Schmitt, sempre disposta a ajudar quando as dúvidas se fizeram presente.

Agradeço a Engenheira Fernanda de Carli Tonial pelo auxílio e contribuição ao desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a Bolsista Marina Cavalli pela assistência no desenvolvimento e na coleta de dados do experimento, que constitui parte fundamental deste trabalho.

Agradeço a minha família, em especial meus pais, Sandro e Adriana, e minha irmã, Mariana, por serem meu porto seguro e estarem inquestionavelmente me apoiando em todas as etapas da minha vida.

Agradeço aos meus amigos de longa data, Conrado, Felipe, Tiago, Carolina, Cyane, Débora, Renata e Nicole, pela amizade e companhia, tornando o período acadêmico único e inesquecível.

Agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram com a realização deste trabalho.

Tudo tem uma moral: é só encontrá-la.

Lewis Carroll

RESUMO

POLESE, E. L. **Eficiência energética em sistemas de bombeamento:** uso do variador de frequência. 2010. 69 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

O elevado consumo de energia elétrica pelo setor de saneamento, grande parte por meio das estações elevatórias, é uma situação preocupante. É estimado que dois e meio por cento de toda energia elétrica produzida no Brasil seja usada para manter as empresas de saneamento operando. Todo este consumo representa custos elevados. São despesas que as companhias necessitam repassar aos consumidores e assim conseguir equilibrar as contas. Soluções que aumentem a eficiência e reduzam este consumo são necessárias e bem-vindas, frente ao atual cenário de limitação a curto e médio prazo do aumento da oferta de energia elétrica. Este trabalho tem por objetivo avaliar o aumento da eficiência energética dos sistemas de bombeamento para abastecimento de água, através do uso do variador de frequência no controle das vazões. Como estes sistemas de bombeamento são parte de um sistema maior, o de abastecimento de água, foi buscado descrevê-lo, por intermédio de uma apresentação sucinta das etapas que constituem esse último: captação, adução, tratamento, reservação, bombeamento e distribuição. Ainda, demonstraram-se os métodos utilizados para a distribuição de água e os fatores que geram as perdas de energia e as fugas d'água no abastecimento. Na parte que segue, tomou-se como enfoque o estudo dos componentes que constituem as estações elevatórias, consumidoras de grande parte da energia usada no abastecimento, descrevendo os motores, as bombas e as formas de controlar as vazões no bombeamento: válvula de estrangulação e variador de frequência. Após isto, realizaram-se as análises do aumento da eficiência energética ocasionado pelo uso do variador de frequência no controle de vazões quando comparado a válvula de estrangulação, por meio de ensaios laboratoriais e cálculo teórico. Enfim se obtiveram as conclusões e verificou-se um ganho de 44% a 57% na redução do consumo da energia, quando aplicado o variador de frequência como forma de controle, demonstrando assim um aumento na eficiência do sistema.

Palavras-chave: abastecimento de água; bombas; eficiência energética; estações elevatórias; variador de frequência

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: delineamento do trabalho	16
Figura 2: esquema de um sistema de abastecimento de água	18
Figura 3: traçados de redes de distribuição	19
Figura 4: desenhos esquemáticos de bombas de deslocamento positivo	25
Figura 5: diferentes tipos de rotor: aberto, semifechado e fechado	26
Figura 6: modelos de difusor	26
Figura 7: rotor de turbobomba	27
Figura 8: campo de aplicação em função da vazão e altura manométrica para as bombas de deslocamento positivo e turbobombas	28
Figura 9: conjunto de curvas características para uma bomba real	31
Figura 10: exemplo de gráfico de quadriculas para escolha do modelo de bomba Meganorm	32
Figura 11: representação de uma curva característica de um encanamento genérico	33
Figura 12: representação do ponto de funcionamento de um sistema elevatório	34
Figura 13: associação de bombas	35
Figura 14: curva característica para instalação com bombas em paralelo	36
Figura 15: curva característica para instalação com bombas em série	37
Figura 16: formas de instalação do bombeamento em relação ao nível da água	39
Figura 17: efeito ocasionado na curva do sistema pelo fechamento parcial da válvula de estrangulamento	40
Figura 18: efeito ocasionado na curva de estrangulação da bomba quando operada com diferentes rotações	41
Figura 19: curvas de consumo para os diferentes cenários propostos	44
Figura 20: vista em planta da estrutura existente do LENHS	45
Figura 21: vista em planta do trajeto percorrido pelo escoamento	46
Figura 22: gráfico de desempenho em carga para o motor WEG existente no LEHNS ..	48
Figura 23: relação vazão x tempo para o cenário 1	52
Figura 24: relação potência x tempo para o cenário 1	52
Figura 25: relação vazão x tempo para o cenário 2	55
Figura 26: relação potência x tempo para o cenário 2	56
Figura 27: relação vazão x tempo para o cenário 3	60
Figura 28: relação potência x tempo para o cenário 3	60
Figura 29: relação vazão x tempo para o cenário 4	65
Figura 30: relação potência x tempo para o cenário 4	656

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: valores utilizados para a frequência e para a abertura de válvula na experimentação do cenário 1.....	49
Quadro 2: resultados obtidos experimentalmente para o cenário 1	50
Quadro 3: resultados obtidos teoricamente para o cenário 1	51
Quadro 4: valores utilizados para a frequência e para a abertura de válvula na experimentação do cenário 2	53
Quadro 5: resultados obtidos experimentalmente para o cenário 2	54
Quadro 6: resultados obtidos teoricamente para o cenário 2	55
Quadro 7: valores utilizados para a frequência e para a abertura de válvula na experimentação do cenário 3	57
Quadro 8: resultados obtidos experimentalmente para o cenário 3	58
Quadro 9: resultados obtidos teoricamente para o cenário 3	59
Quadro 10: valores utilizados para a frequência e para a abertura de válvula na experimentação do cenário 4	61
Quadro 11: resultados obtidos experimentalmente para o cenário 4	62
Quadro 12: rendimentos obtidos teoricamente para o cenário 4	63
Quadro 13: resultados obtidos teoricamente para o cenário 4	64

LISTA DE SÍMBOLOS

Q = capacidade ou vazão de bombeamento (L/min ou m³/h)

$H_{g,s}$ = altura geométrica de sucção ou altura estática de sucção (m)

$H_{g,r}$ = altura geométrica de recalque ou altura estática de recalque (m)

H_g = altura geométrica total (m)

h_{ps} = perda de carga na sucção (m)

h_{pr} = perda de carga no recalque (m)

H = altura manométrica total (m)

P = potência fornecida pela bomba (W)

n = número de rotações por minuto da bomba (RPM)

D = diâmetro do rotor da bomba (mm)

ρ = massa específica do fluido (kg/m³)

η_b = rendimento da bomba

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 MÉTODO DE PESQUISA	14
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	14
2.2 OBJETIVO DO TRABALHO	14
2.3 PRESSUPOSTO	14
2.4 DELIMITAÇÕES	14
2.5 LIMITAÇÃO	15
2.6 DELINEAMENTO	15
3 ABASTECIMENTO DE ÁGUA	17
3.1 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	17
3.2 MÉTODOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA	20
3.3 PERDAS NO ABASTECIMENTO	21
4 BOMBAS, MOTORES E VARIADORES DE FREQUÊNCIA	24
4.1 BOMBAS HIDRÁULICAS	24
4.1.1 Grandezas Relacionadas ao Estudo de Bombas	29
4.1.2 Curvas Características das Bombas Centrifugas	30
4.1.3 Curva Característica de um Encanamento	33
4.1.4 Escolha das Bombas e Definição do Ponto de Operação	34
4.1.5 Associação de Bombas Centrifugas	35
4.1.5.1 Bombas em Paralelo	35
4.1.5.2 Bombas em Série	36
4.1.6 Leis de Semelhança	37
4.1.7 Bomba Afogada e Não Afogada	38
4.2 MOTORES	39
4.3 VARIADORES DE FREQUÊNCIA	40
5 ANÁLISE DO USO DE VARIADORES DE FREQUÊNCIA NO CONTROLE DE VAZÕES	43
5.1 MÉTODO APLICADO	43
5.1.1 Método experimental	44
5.1.2 Método por cálculo teórico	47
5.2 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS	49
5.2.1 Cenário 1	49
5.2.1.1 Avaliação Experimental	49

5.2.1.2 Avaliação teórica	50
5.2.1.3 Comparação entre experimental e teórico	51
5.2.2 Cenário 2	52
5.2.2.1 Avaliação Experimental	53
5.2.2.2 Avaliação teórica	54
5.2.2.3 Comparação entre experimental e teórico	55
5.2.3 Cenário 3	56
5.2.3.1 Avaliação Experimental	56
5.2.3.2 Avaliação teórica	58
5.2.3.3 Comparação entre experimental e teórico	59
5.2.4 Cenário 4	60
5.2.4.1 Avaliação Experimental	61
5.2.4.2 Avaliação teórica	63
5.2.4.3 Comparação entre experimental e teórico	65
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
6.1 CONCLUSÕES	66
6.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	67
REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

Buscar a eficiência no dimensionamento de equipamentos e na operação de sistemas de bombeamento tem por consequência o ganho econômico e ambiental, sendo assim, uma forma de melhorar a situação financeira das empresas e evitar o desperdício de recursos, conservando o meio. No setor de saneamento, um dos fatores que deve ser aprimorado é a redução do consumo de energia elétrica, como forma de garantir a sustentabilidade econômica para grande parte das empresas do Brasil e do mundo.

A preocupação com a economia do uso de energia elétrica é elevada no saneamento e justificável. Os gastos com o consumo de eletricidade ocupam o segundo lugar no *ranking* de custos operacionais das empresas de saneamento brasileiras, perdendo apenas para mão de obra. De toda energia elétrica consumida no País, 2,5% se faz no saneamento, o que corresponde a aproximadamente 9,5 bilhões de kWh/ano. Entre as diversas funções na qual esta quantia é aplicada, 90% é destinado ao funcionamento das estações elevatórias (GOMES, 2005, p. 12).

As estações elevatórias são o elo fundamental na sistemática do saneamento. Elas fornecem energia ao fluido, através das bombas hidráulicas, e permitem que ocorra o escoamento de um ponto ao outro sendo possível assim vencer distâncias e desníveis. Todavia, estas estações estão sujeitas ao desperdício de água e de energia, por razões como falhas de projeto, formas de operar inadequadas, manutenção precária, formas contratuais indevidas ou ainda fazendo uso de equipamentos que não otimizam sua operação.

Um dos equipamentos que podem ser usados para aperfeiçoar o funcionamento dos sistemas de bombeamento é o variador de frequência. Os variadores de frequência, como o próprio nome sugere, permitem a variação da frequência da corrente alternada que alimenta o motor acoplado à bomba. Essa variação na frequência da corrente faz com que o motor funcione em uma nova rotação e por consequência a bomba também, gerando novas alturas de elevação e novas vazões.

Tomando isto como base, este trabalho tem por objetivo a avaliação, através de experimento laboratorial e teórico, do uso dos variadores de frequência como forma de reduzir o consumo

de energia elétrica no abastecimento de água, aumentando a eficiência no bombeamento. Para que as metas fossem alcançadas, faz-se a apresentação deste relatório em seis capítulos. O presente capítulo como introdução, seguido do capítulo 2, que apresenta a questão de pesquisa, o objetivo principal, o pressuposto, a delimitação, a limitação e o delineamento do trabalho. No capítulo 3 realizou-se uma rápida descrição sobre a dinâmica de um sistema de abastecimento de água, dos diversos elementos que o compõem, das formas de abastecê-lo e dos tipos de perdas que ocorrem: energia elétrica e água. No capítulo 4 descrevem-se com maiores detalhes os elementos principais da estação elevatória: a bomba e o motor. Ainda, foi registrado o efeito do variador de frequência quando aplicado ao bombeamento. O capítulo 5 ficou destinado à descrição do experimento realizado, ao cálculo por meio teórico e a análise dos resultados. Por fim, no capítulo 6 apresentaram-se as conclusões obtidas com o uso do variador de frequência na redução do consumo de energia dos sistemas de bombeamento nos cenários estudados.

2 MÉTODO DE PESQUISA

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho é: quanto é possível aumentar a eficiência energética e por consequência reduzir o consumo de energia nos sistemas de bombeamento para o abastecimento de água com o uso do variador de frequência no controle das vazões?

2.2 OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo principal deste trabalho é a avaliação teórica e experimental do consumo de energia no bombeamento de água, através da comparação de sistemas que operam com e sem o uso do variador de frequência para o controle de vazões.

2.3 PRESSUPOSTO

É pressuposto que a Norma Técnica Brasileira 12214/1992 – Projeto de Sistemas de Bombeamento de Água para Abastecimento Público – é válida, frente os objetivos do trabalho.

2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho ficou delimitado ao estudo do variador de frequência na redução do consumo da energia elétrica nos sistemas de bombeamento para abastecimento de água, através de experimento laboratorial no Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LENHS/UFRGS).

2.5 LIMITAÇÃO

O trabalho limita-se aos sistemas de bombeamento que operam com bombas centrífugas.

2.6 DELINEAMENTO

As etapas de desenvolvimento deste trabalho foram as seguintes:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) determinação das curvas de demanda a serem analisadas;
- c) avaliação do sistema operando com e sem o variador de frequência, através de,
 - solução experimental;
 - solução teórica;
- d) análise dos resultados obtidos pelos três métodos;
- e) considerações finais.

A figura 1 apresenta um esquema do delineamento do trabalho, que foi iniciado com a pesquisa bibliográfica, onde se obteve o embasamento teórico necessário para o seu desenvolvimento, tendo como foco os elementos que compõem os sistemas de bombeamento para o abastecimento de água. Esta etapa se estendeu por todo o trabalho, possuindo maior intensidade no início. Na fase seguinte, determinaram-se quatro curvas de demanda que deveriam ser supridas pelo bombeamento, onde cada uma correspondeu a um cenário a ser avaliado. A seguir, avaliou-se o sistema de bombeamento atendendo estes cenários de duas maneiras distintas: com e sem o uso do variador de frequência. Essa avaliação foi realizada por meio de experimento, e também, por solução teórica, para fins de comparação. Obtido os resultados, efetuou-se uma análise do uso do variador de frequência como forma de reduzir o consumo de energia elétrica. Por fim, obtiveram-se as considerações finais do trabalho.

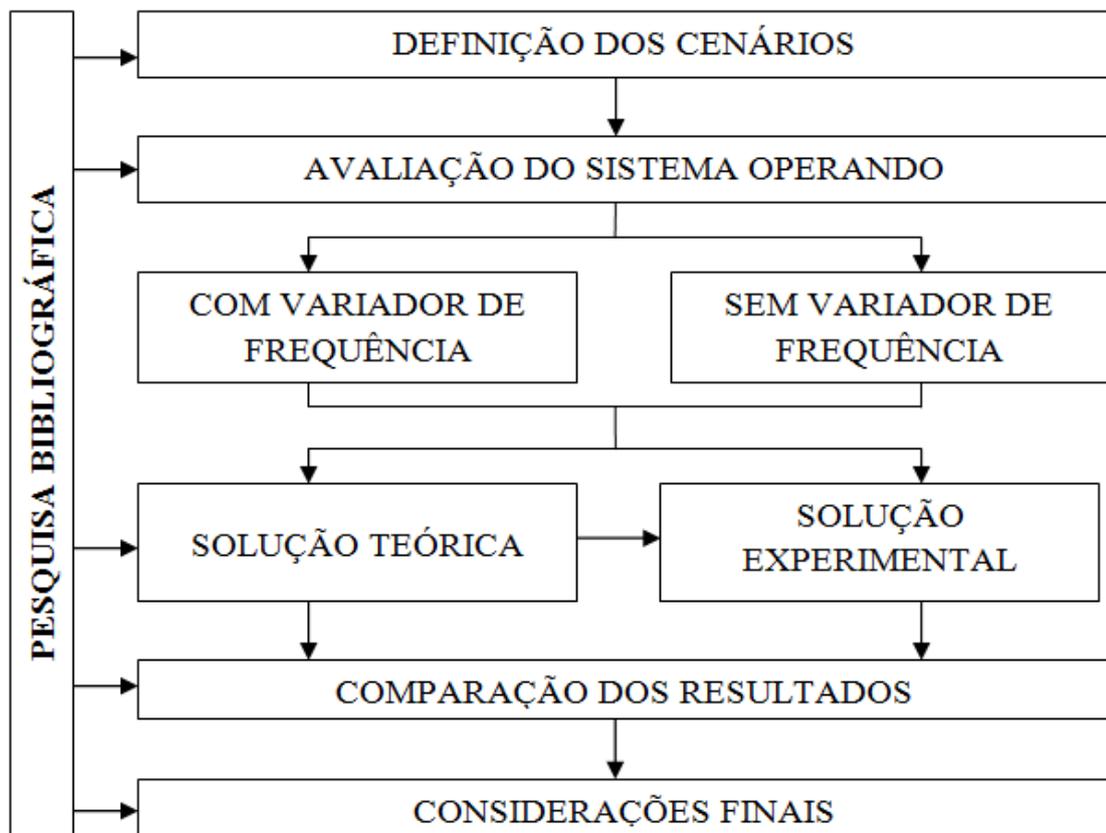


Figura 1: delineamento do trabalho

3 ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Desde o momento que o homem abandonou o modo de vida nômade, o abastecimento de água tornou-se uma preocupação, já que foi imposta a necessidade de ter água, no mínimo, próximo de sua morada, a fim de atender as suas necessidades. Assim, a sociedade ao longo dos séculos evoluiu nos seus métodos de captar, tratar, reservar e distribuir a água até chegar aos sistemas de abastecimento existente na atualidade.

Nos itens seguintes, é apresentado o sistema de abastecimento de água atual, bem como os elementos que o compõem usualmente. Demonstram-se ainda, métodos utilizados para fornecer água a estes sistemas de abastecimento e a problemática das perdas inerentes aos mesmos.

3.1 SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Um sistema de abastecimento de água é um conjunto de instalações e processos que visa o fornecimento de água, com qualidade, quantidade e pressão suficientes ao uso doméstico, público, comercial, entre outros. Para Tsutiya (2006, p. 9), o sistema de abastecimento é um conjunto de componentes que engloba o manancial, a captação, as estações de tratamento de água, os reservatórios, as redes de distribuição, as adutoras e as estações elevatórias. Um exemplo do processo de abastecimento é apresentado esquematicamente na figura 2.

O manancial é o corpo hídrico responsável por abastecer todo o sistema, podendo ser subterrâneo ou superficial. Manancial subterrâneo é aquele, cuja água deriva dos interstícios do subsolo, podendo aflorar à superfície ou ser elevada artificialmente. O superficial corresponde às reservas presentes, conforme o próprio nome indica, na superfície terrestre, tal como lagos e rios (NETTO et al., 1998, p. 476).

A captação é o conjunto de dispositivos junto a estes mananciais para captar a água bruta (água sem tratamento) para o sistema de abastecimento, preservando sua qualidade e fornecendo quantidade suficiente. Tsutiya (2006, p. 67) afirma que o seu funcionamento deve

ser ininterrupto em qualquer época do ano e deve possuir facilidade quanto a sua operação e manutenção.

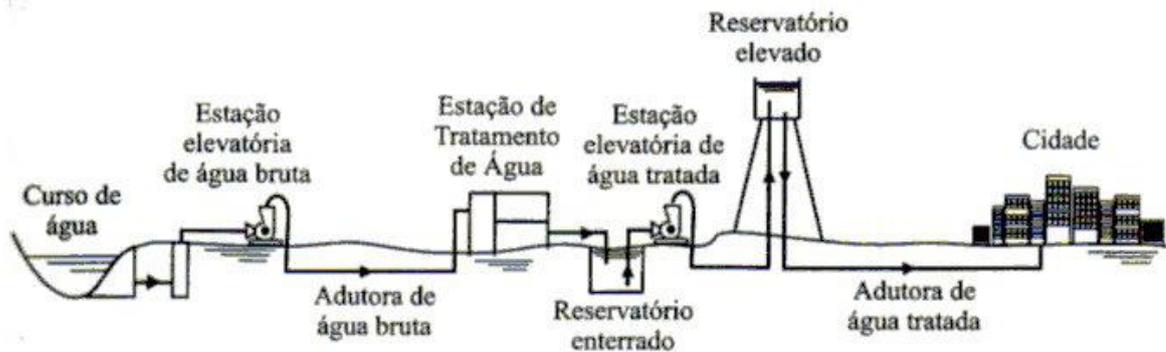


Figura 2: esquema de um sistema de abastecimento de água (TSUTIYA, 2006, p. 16)

Toda a água fornecida no abastecimento deve passar por alguma forma de tratamento. O tratamento é uma série de procedimentos para a adequação das características físicas e químicas da água, buscando atender aos padrões de potabilidade presentes na legislação. Por isso, nas estações de tratamento de água faz-se uso de técnicas diversas, objetivando a remoção das impurezas e microorganismos presentes na água, e assim, obtendo-se uma água de qualidade para o consumo.

Aos reservatórios cabe a tarefa de regularizar as vazões e as pressões, absorver as variações do consumo e garantir a segurança no abastecimento em caso de interrupção do funcionamento da adução. Ainda, servem como reserva de água em caso de incêndio. São elementos de grande importância no sistema de abastecimento (TSUTIYA, 2006, p. 337).

A rede de distribuição é um conjunto de tubulações, conexões e peças especiais, normalmente constituídas por dois tipos de canalização, chamadas de principais e secundárias. As canalizações principais, de maior diâmetro, abastecem as secundárias de menor diâmetro e estas se conectam diretamente aos pontos de consumo (TSUTIYA, 2006, p. 389). Assim, para a rede é destinada a última parte do sistema, ou seja, entregar água aos consumidores, que se conectam ao sistema através das ligações prediais.

Tsutiya (2006, p. 390) descreve, que conforme o traçado das canalizações e o sentido de escoamento nas tubulações secundárias, as redes podem ser classificadas em ramificadas, malhadas e mistas. As redes ramificadas são aquelas em que se pode definir o sentido de

escoamento da água, pois há apenas um caminho até um ponto de abastecimento. Nas redes malhadas, formam-se anéis possibilitando o abastecimento de um mesmo ponto por mais de um caminho. As associações destas duas redes formam as redes mistas. Ilustrações gráficas das redes podem ser visualizadas na figura 3.

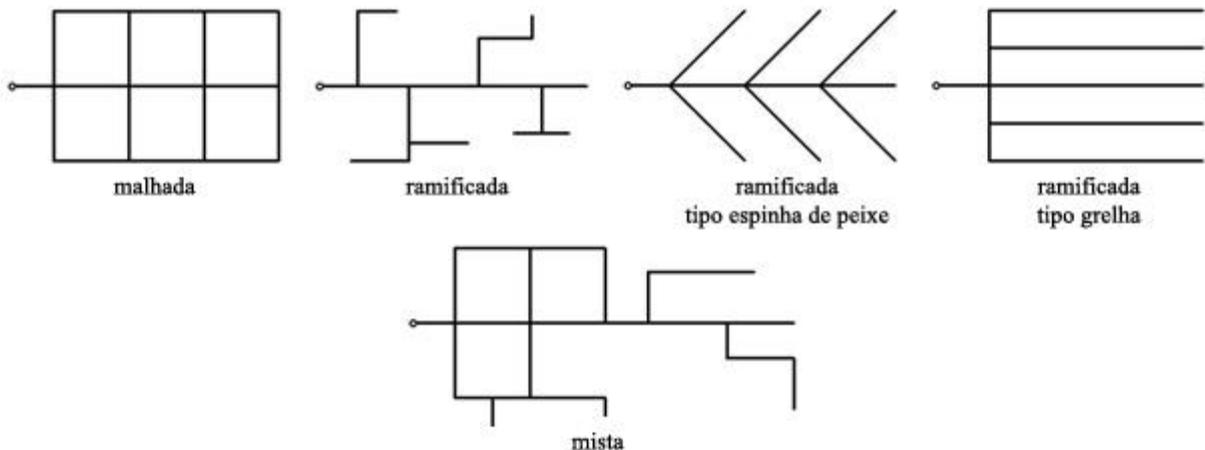


Figura 3: traçados de redes de distribuição (adaptado de GOMES 2004, p. 32)

Para conectar diferentes etapas do sistema e realizar o transporte da água usam-se as adutoras. São tubulações responsáveis por conduzir a água entre as unidades que precedem a distribuição, sem servir aos consumidores. É possível classificar as adutoras de duas formas diferentes: quanto à natureza da água transportada e quanto à energia para a movimentação da água. Em relação à natureza da água, a adutora pode ser de água tratada ou de água bruta. Quanto à energia para a movimentação, as adutoras podem ser de gravidade, de recalque ou mistas (NETTO et al., 1998, p. 481; TSUTIYA, 2006, p. 156).

As adutoras por gravidade possuem a vantagem de não dependerem da energia elétrica para impulsionar a água, conforme ressalta Gomes (2004, p. 11). Elas fazem o uso apenas da diferença de cotas para que ocorra o escoamento do fluido, sendo possível realizar o processo através de condutos forçados ou condutos livres. Nas adutoras por recalque, onde há o uso das estações elevatórias para fornecer energia ao líquido, apenas existe a possibilidade de se usar o sistema de condutos forçados. Chamam-se de adutoras mistas, aquelas que combinam os métodos de adução por gravidade e por recalque em seu percurso.

Por último, podem-se citar as estações elevatórias, que são essenciais e aparecem não apenas na etapa de adução, mas também na captação, no tratamento, na reservação e na distribuição. As estações elevatórias ou estações de recalque conforme Netto et al. (1973, p. 215), são

estruturas que comportam máquinas e outros equipamentos necessários para a elevação da água, bruta ou tratada, de um ponto para outro, a qualquer momento. Conforme Tsutiya (2006, p. 226), os equipamentos e instalações que integram essas estruturas são o poço de sucção, a casa de bombas, os motores, quadro elétrico de acionamento e proteção e as tubulações.

3.2 MÉTODOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Como já citado anteriormente, um sistema de abastecimento tem por objetivo fornecer não só água em quantidade suficiente e com qualidade, mas também com pressão adequada. Para se atender esta última necessidade, faz-se uso de alguns mecanismos que garantam pressões na rede. Santana (1997, p. 10) considera a topografia, a localização da fonte abastecedora e critérios econômicos e sociais para classificar os métodos de abastecimento em três grupos: por gravidade, por bombeamento direto e por bombeamento e armazenamento.

O primeiro, abastecimento por gravidade, enquadra uma situação aonde as condições topográficas são totalmente favoráveis. A fonte abastecedora encontra-se em cota superior a toda região abastecida, sendo capaz de alcançar todos os pontos de consumo com pressão adequada. Deve ser a opção preferencial quando disponível, pois apresenta menor custo e uniformidade ao longo do tempo (SANTANA, 1997, p. 11).

A opção de abastecimento por bombeamento direto é uma segunda alternativa, porém pouco recomendada. Há muitas desvantagens quanto a sua operação, como interrupção no abastecimento quando há falha no funcionamento do conjunto motor-bomba e variação da pressão na rede em função da diferença de consumo, sendo necessário o uso de soluções tecnológicas para contornar o problema (SANTANA, 1997, p. 11).

A última classificação, o abastecimento por bombeamento e armazenamento (situação exemplificada na figura 2), é para Santana (1997, p. 12) a melhor opção quando não se pode usar o abastecimento por gravidade. Nesta situação, ao invés de se bombear diretamente para a rede, faz-se o recalque da água para um reservatório, e este fica com a responsabilidade de fornecer pressão adequada para o sistema e de equilibrar as variações de consumo.

3.3 PERDAS NO ABASTECIMENTO

Em qualquer lugar do mundo, no abastecimento de água, ocorrem perdas significativas tanto de energia elétrica quanto de água, que são inerentes aos processos envolvidos (GOMES, 2005, p. 11). Para Tsutiya (2006, p. 457) essas perdas surgem, na maioria das vezes, por operação e manutenção deficiente, bem como inadequada gestão comercial das companhias de saneamento. Controlar essas perdas significa tornar o sistema mais eficiente e também, garantir a redução dos gastos em um setor de grande importância para a sociedade. Tsutiya (2006, p. 458) defende que o sucesso das ações de redução de perdas leva ao melhor desempenho econômico das companhias, e isto, está diretamente ligado com a possibilidade da universalização do abastecimento e da redução das tarifas de serviços.

Conforme citado anteriormente na introdução, no Brasil, 2,5% de toda energia elétrica gerada é destinada ao saneamento. Deste montante considerável, 90% é empregado na operação das estações elevatórias (GOMES, 2005, p. 12). No quadro de custos operacionais das companhias, todo este consumo faz com que a energia elétrica assuma a segunda posição, estando abaixo apenas dos custos com a mão de obra. Somado a este dispêndio elevado, outra forte razão para que se procurem soluções para uma maior eficiência no setor, conforme ressalta Gomes (2005, p. 13), é que o aumento de disponibilidade de energia é limitado a curtos e médios prazos.

Logo, se faz presente a necessidade da aplicação de ações combativas, com efeito positivo no aumento da eficiência e por consequência na redução do consumo. Isto pode ser obtido através do conhecimento de como se apresenta o desperdício dentro do sistema. Gomes (2005, p. 14) cita, como principais formas de desperdício de energia elétrica, os seguintes fatores:

- a) formas contratuais indevidas;
- b) procedimentos operacionais inadequados;
- c) desperdícios de água;
- d) mau dimensionamento dos sistemas;
- e) idade ultrapassada dos equipamentos;
- f) tecnologias mal utilizadas;
- g) erros na concepção de projetos;

h) falta de manutenção.

Os programas de eficiência energética para redução das perdas sugerem que se realizem medidas em duas etapas: administrativas e operacionais. Em primeiro lugar viriam as ações administrativas, podendo ser citadas a verificação dos contratos com as prestadoras de serviço renegociando a estrutura tarifária, a desativação de instalações sem utilização, a correção nas classes de faturamento, entre outras (GOMES, 2005, p. 14). Nas medidas operacionais, que seriam a etapa seguinte, pode-se citar a automação dos sistemas de bombeamento, a diminuição de potência das instalações, as fontes alternativas de energia para o funcionamento no horário de ponta (horário de maior consumo pelos usuários, geralmente das 18 às 21 horas ou das 17 h 30 min às 20 h 30 min), a redução do volume de água distribuído, entre outros (GOMES, 2005, p. 14).

Cabe a ressalva, que as empresas concessionárias de água possuem uma estrutura tarifária quanto à energia consumida mais complexa. Por se tratar de instalações com nível de tensão superior a 2,3 kV, são classificadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica como pertencentes ao Grupo A, que engloba consumidores de média e alta tensão (o Grupo B é destinado aos usuários com nível de tensão inferior a 2,3 kV, ditos de baixa tensão). Esta classificação faz com que a fatura da energia elétrica seja composta por duas tarifas: demanda e consumo (GOMES, 2005, p. 54-55).

A tarifa de demanda corresponde, segundo Gomes (2005, p. 55), a “[...] um valor cobrado mensalmente pela potência instalada, demandada pela estação de bombeamento.” e é cobrada mesmo que não haja consumo no período estabelecido. Já a tarifa de energia, ainda conforme Gomes (2005, p. 55), é o valor cobrado pela energia efetivamente consumida pela unidade em um dado período de tempo. Estas tarifas podem ser efetivadas segundo duas modalidades: convencional e horo-sazonal.

Horo-sazonal é uma tarifa que possui valor diferenciado ao longo do dia e do ano. Ela possui valor mais elevado para consumo no horário de ponta, sendo de 3 a 10 vezes maior que o valor da tarifa de consumo fora deste horário (GOMES, 2005, p. 56). O valor ainda leva em conta os períodos secos e úmidos do ano, sendo mais elevado para o primeiro caso. A horo-sazonal divide-se em duas categorias: azul e verde.

Horo-sazonal azul possui um valor para demanda no horário de ponta e fora dele, além de quatro valores para o consumo (ponta em período úmido e seco; fora dele em período úmido e seco). É aplicada ao Grupo A, sendo obrigatória a aqueles com demanda superior a 500 kW. Horo-sazonal verde é uma opção aos consumidores do Grupo A com demanda de potência entre 50 e 500 kW e que consiste em uma tarifa de demanda única e novamente quatro opções para tarifa de consumo (ponta em período úmido e seco; fora de ponta em período úmido e seco) (GOMES, 2005, p. 56). Essa forma de estruturação tarifária justifica por que entre algumas das medidas administrativas e operacionais sugeridas consta a verificação dos contratos com as prestadoras de serviço, a desativação de instalações sem utilização, a diminuição de potência das instalações e fontes alternativas de energia para o funcionamento das estações no horário de ponta.

Outro fator que impulsiona o desperdício de energia elétrica no abastecimento são as perdas de água, uma vez que em grande parte dos casos, o montante perdido faz uso das estações elevatórias. No Brasil, se trabalha com um índice médio de perdas que varia em torno de 40% (BRASIL, 2009, p. 45), índice elevado e que não gera receita para as companhias.

Estas perdas, que contribuem para a definição do índice, são classificadas em reais e aparentes. Perdas reais são decorrentes de problemas como vazamentos, envelhecimento de tubulações, operação e manutenção inadequadas. Perdas aparentes, ou também chamadas de comerciais, decorrem de erros de macro e micromedição dos equipamentos, erros nos cadastros do sistema e fraudes nas ligações (GOMES, 2005, p. 16). Este índice ainda considera os consumos autorizados não faturados.

Para se reduzir as perdas físicas, fazem-se necessário um conjunto de ações de controle e detecção de vazamentos, de pressão na rede, além da melhoria de materiais e equipamentos. As aparentes podem ser reduzidas melhorando o cadastro comercial, reduzindo o erro dos equipamentos de medição e eliminando as fraudes (GOMES, 2005, p. 19).

Cabe salientar, que não existe índice de perdas de água nulo (TSUTIYA, 2006, p. 457), uma vez que as perdas são inerentes ao processo de distribuição de água. Conter as perdas em redes com menos de 10% de fugas de água é praticamente inviável, uma vez que as intervenções se tornam excessivamente onerosas (GOMES, 2005, p. 19). O sugerido pelo setor, é que se busque uma redução para valores inferiores a 20% (BRASIL, 2009, p. 45).

4 BOMBAS, MOTORES E VARIADORES DE FREQUÊNCIA

Quando a cidade ou instalação ao qual se deseja atender encontra-se em uma posição totalmente favorável em relação ao manancial de captação, é possível servi-lo usando apenas a gravidade. Todavia, essa condição específica, no geral, só pode ser usada parcialmente ou não se faz presente. Assim, há outra forma de servir a população com água vinda de um manancial distante: fazer uso das estações elevatórias.

Estas estações têm como um de seus elementos fundamentais as bombas hidráulicas, tratadas com maior profundidade neste capítulo no qual são apresentados os tipos de bombas, suas curvas características, como podem ser associadas e instaladas. Ainda, são apresentando nesse capítulo os motores, que representam outro elemento importante das estações elevatórias. Por fim, demonstra-se o que são e quais os efeitos da aplicação dos variadores de frequência em um sistema de bombeamento.

4.1 BOMBAS HIDRÁULICAS

Bombas hidráulicas correspondem à essência das estações elevatórias. São máquinas geratrizes que tem por função realizar o deslocamento de um fluido por escoamento. Máquinas geratrizes são aquelas que recebem trabalho mecânico e transformam em energia hidráulica, fornecendo ao líquido um acréscimo de energia de pressão e cinética (MACINTYRE, 1997, p. 37-38). Assim, cabe às bombas transformar, transmitir e aumentar a energia do fluido e permitir que a água atinja posições mais elevadas dentro do sistema de recalque.

O modo como ocorre a transformação de energia e os meios de fornecê-la ao líquido permitem a classificação das bombas. Conforme Macintyre (1997, p. 38), as bombas podem ser de deslocamento positivo, turbobombas ou bombas especiais.

As bombas de deslocamento positivo são também chamadas de bombas volumétricas. Elas possuem em seu interior um propulsor que comunica a energia de pressão ao líquido e

provoca seu escoamento. White (1999, p. 494) afirma que “[...] a grande vantagem dessas bombas é fornecer qualquer tipo de fluido, independente da sua viscosidade.”.

A velocidade de operação do propulsor possui relação constante com a descarga. São indicadas para quando se deseja pequenas vazões e grandes pressões. Para Macintyre (1997, p. 39), “A característica principal desta classe de bombas é que uma partícula líquida em contato com o órgão que comunica a energia tem aproximadamente a mesma trajetória que a do ponto do órgão com o qual está em contato.”.

As bombas de deslocamento positivo se dividem em bombas alternativas e rotativas. No primeiro subgrupo, ainda, é possível classificar as bombas em alternativas de pistão (ou êmbolo) e de diafragma. O mesmo ocorre com as rotativas, que podem ser com um único ou com múltiplos rotores.

Na primeira divisão, as bombas alternativas fornecem a energia ao líquido através da ação direta de um pistão ou êmbolo, ou ainda através de uma membrana flexível. Nas rotativas, uma ou mais peças dotadas de movimento de rotação, transmitem a energia de pressão ao líquido, proporcionando seu escoamento. A direção das forças que atuam sobre o fluido é praticamente a mesma do escoamento (MACINTYRE, 1997, p. 41). Na figura 4 constam ilustrações com algumas dos diversos modelos de bombas de deslocamento positivo.

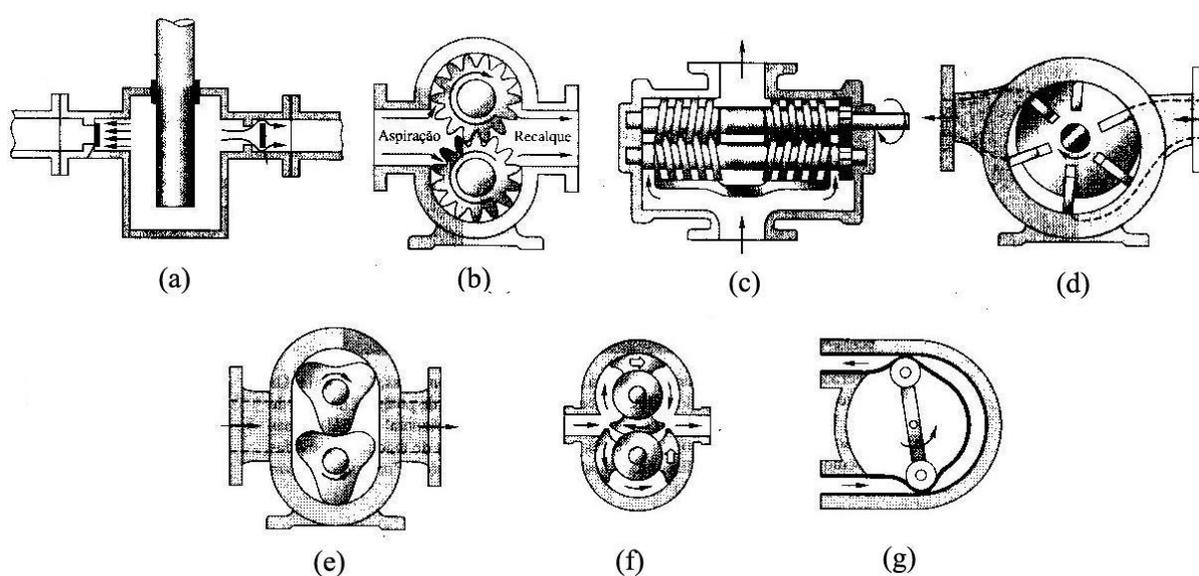


Figura 4: desenhos esquemáticos de bombas de deslocamento positivo: (a) pistão alternativo, (b) engrenagem externa, (c) parafuso duplo, (d) palhetas deslizantes, (e) três lóbulos, (f) pistão periférico duplo e (g) tubo flexível (WHITE, 1999, p. 494)

A segunda família de bombas compreende as turbobombas, também denominadas de bombas dinâmicas ou rotodinâmicas. Este grupo de máquinas hidráulicas se diferencia das bombas de deslocamento positivo rotativas no fato que as forças comunicadas ao líquido não possuem a mesma direção nem o mesmo sentido que o fluído em contato com as pás (MACINTYRE, 1997, p. 43). São constituídas por basicamente dois elementos: rotor e difusor.

O rotor tem por função a comunicação da aceleração à massa líquida, para que esta adquira energia cinética e de pressão (MACINTYRE, 1996, p. 53). Ele pode ser aberto, semifechado ou fechado (figura 5). Os rotores abertos são indicados para líquidos que contenham substâncias tais como lamas, areias, esgotos sanitários e outros. Os rotores fechados, por sua vez, são usados para líquidos sem suspensões.

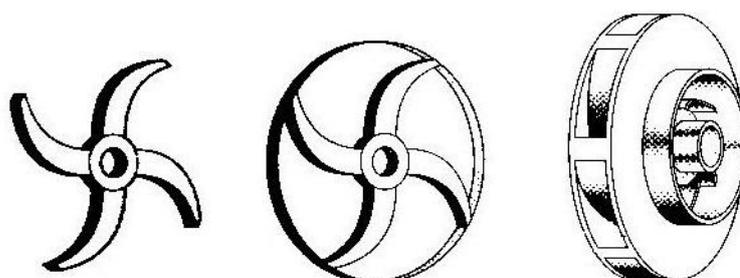


Figura 5: diferentes tipos de rotor: aberto, semifechado e fechado (NETTO et al., 1998, p. 270)

O difusor (figura 6), conforme salienta Macintyre (1997, p. 43) “[...] é onde se dá a transformação da maior parte da elevada energia cinética com que o líquido sai do rotor, em energia de pressão.”. Ele permite que, ao atingir a entrada da canalização de recalque, o líquido tenha maior energia de pressão e menor velocidade.

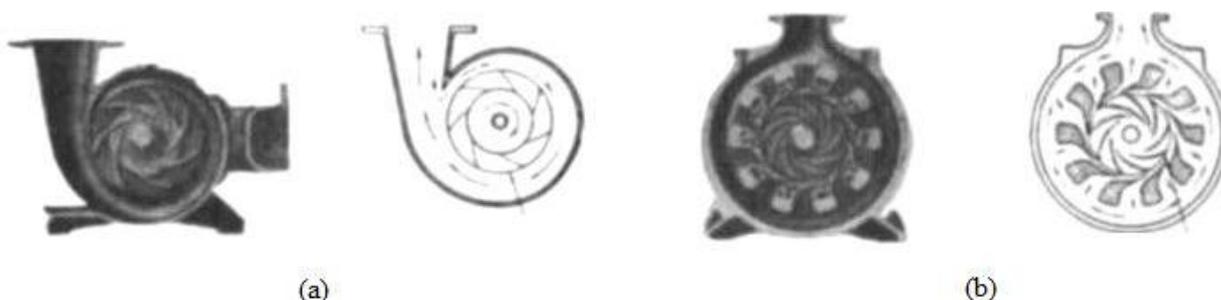


Figura 6: modelos de difusor: (a) voluta ou caracol, (b) tipo turbina ou circular (LENCASTRE, 1972, p. 171)

Classificando as turbobombas em razão da trajetória do líquido no rotor, podem-se identificar três tipos de bomba (LENCASTRE, 1972, p. 170):

- a) centrífuga pura ou radial (figura 7a): o líquido entra pelo centro e sai radialmente pela periferia, o difusor é em forma de caracol ou voluta e a pressão é desenvolvida principalmente pela força centrífuga;
- b) de fluxo misto ou diagonal (figura 7b): o líquido entra axialmente e sai numa direção média, entre axial e radial, sendo a pressão desenvolvida parte pela força centrífuga e parte pela ação de sucção das pás, o difusor, novamente, é na forma caracol ou voluta; se subdividem em,
 - hélico-centrifugas;
 - helicoidal ou semi-axial;
- c) axial ou propulsora (figura 7c): o líquido entra axialmente e sai quase que axialmente, a pressão se desenvolve principalmente por sucção e o difusor é de tubo reto troncônico.

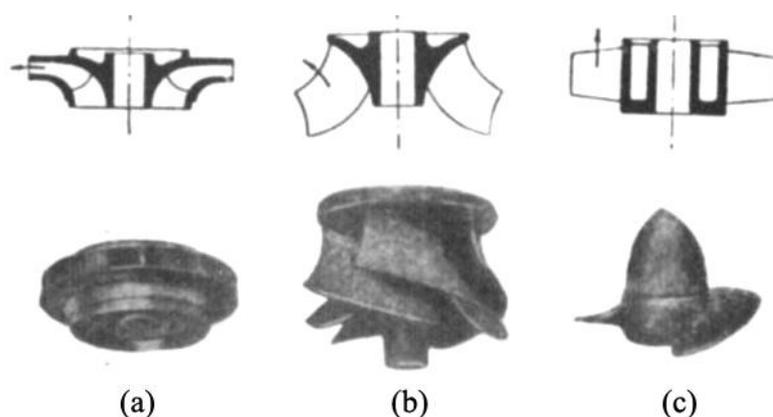


Figura 7: rotor de turbobomba (a) centrífuga pura ou radial, (b) de fluxo misto ou diagonal e (c) axial ou propulsora (LENCASTRE, 1972, p. 170)

Existem ainda outras formas de classificar as turbobombas, podendo-se citar as classificações quanto ao número de rotores: com apenas um rotor são as bombas de simples estágio e com dois ou mais rotores são as bombas de múltiplos estágios; e quanto ao número de entradas para aspiração: uma entrada é bomba de aspiração simples, com duas é bomba de aspiração dupla ou de entrada bilateral.

O uso das bombas de deslocamento positivo (rotativas e alternativas) ou de turbobombas (centrífugas, fluxo misto e axial) depende, entre outros fatores, da vazão e altura manométrica que se deseja obter. Henn (2006, p. 31) sugere o campo de atuação para estas bombas, por meio de um gráfico (figura 8), que relaciona a vazão com altura manométrica. O autor destaca

ainda, que as áreas do gráfico onde ocorrem superposição das diferentes bombas, outros critérios, tais como a viscosidade, presença de sólidos suspensos, facilidade de manutenção, custos, devem ser considerados para a determinação do modelo final a ser empregado.

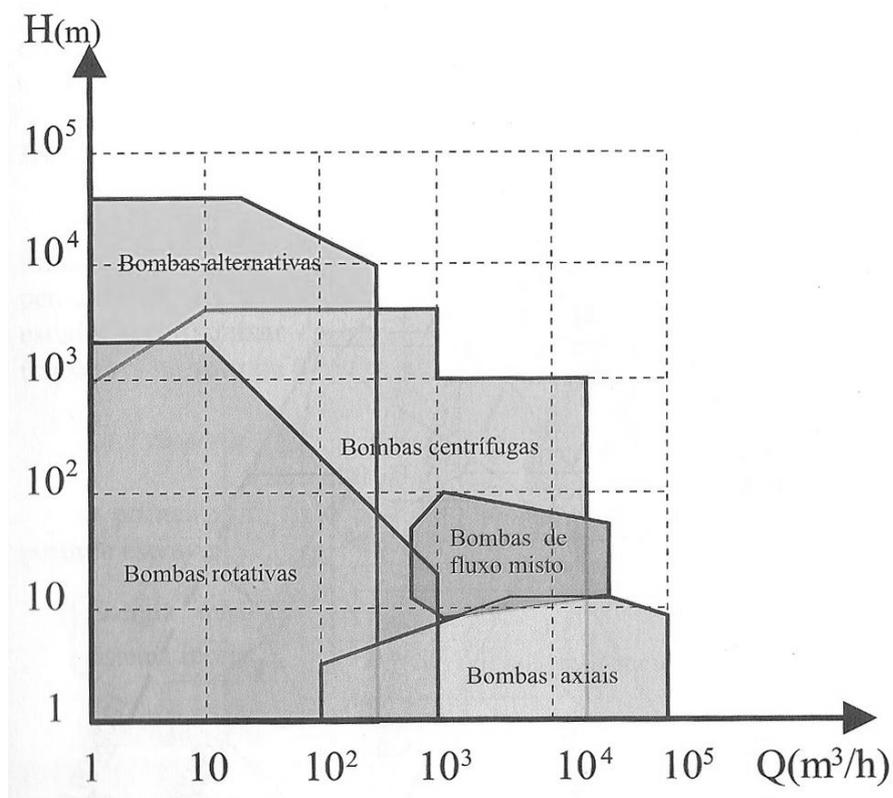


Figura 8: campo de aplicação em função da vazão e altura manométrica para as bombas de deslocamento positivo e turbobombas (HENN, 2006, p. 31)

Por fim, há uma última família de bombas que utilizam formas especiais de ceder energia ao fluído e por isso mesmo, são chamadas de bombas especiais. Neste grupo, os métodos utilizados para bombear são os mais variados possíveis e a sua aplicação muitas vezes é específica, tornando-as normalmente não funcionais ao abastecimento de água. White (1999, p. 494) incorpora a este grupo bombas que fazem o uso de diversas técnicas para impulsionar o fluído, tal como eletromagnetismo (para metais líquidos), transiente hidráulico e uso de gás comprimido.

Em abastecimento de água, cabe a ressalva, que há necessidade de um entendimento maior sobre as turbobombas, principalmente as pertencentes ao grupo das centrífugas. Esta importância provém do fato que este é o modelo normalmente empregado para o funcionamento das estações elevatórias (MACINTYRE, 1996, p. 431).

Desta forma, um aprofundamento maior sobre as bombas centrífugas é apresentado nos próximos itens com a descrição das principais grandezas relacionadas ao estudo das bombas e das suas curvas características. Ainda, a definição da curva característica do sistema, do ponto de operação do mesmo, das leis de semelhança, da associação de bombas e do conceito de bomba afogada e não afogada.

4.1.1 Grandezas relacionadas ao estudo de bombas

Para o entendimento de funcionamento do sistema elevatório, faz-se necessário o conhecimento de certas grandezas (TSUTIYA, 2006, p.239):

- a) capacidade ou vazão de bombeamento (Q): volume de líquido por unidade de tempo, normalmente expresso em metros cúbicos por segundo (m^3/s), metros cúbicos por hora (m^3/h) ou ainda em litros por segundo (l/s);
- b) altura geométrica de sucção ou altura estática de sucção ($H_{g,s}$): é a diferença geométrica entre o nível de água no poço e a linha do centro da bomba, em metros (m);
- c) altura geométrica de recalque ou altura estática de recalque ($H_{g,r}$): é a diferença geométrica entre a linha do centro da bomba e o nível máximo que atinge a água recalçada, em metros (m);
- d) altura geométrica total (H_g): é o desnível geométrico entre o nível da água no poço de sucção e o nível máximo que atinge a água recalçada, em metros (m);
- e) perda de carga no recalque (h_{pr}): somatório das perdas de carga linear e singular nas instalações de recalque, em metros (m);
- f) perda de carga na sucção (h_{ps}): somatório das perdas de carga linear e singular nas instalações de sucção, em metros (m);
- g) carga de velocidade ou carga cinética: é a energia cinética contida no líquido bombeado calculado através da velocidade do fluido ao quadrado e dividida por duas vezes a aceleração da gravidade, em metros (m);
- h) altura manométrica total ou altura de elevação (H): carga que a bomba deve vencer quando o líquido é recalçado, inclui as alturas geométricas na sucção ($H_{g,s}$), a altura geométrica no recalque ($H_{g,r}$), as perdas de carga na sucção (h_{ps}) e no recalque (h_{pr}) e a carga cinética, expresso em metros (m);
- i) potência fornecida pela bomba (P): é a potência para elevar a vazão do líquido de modo a vencer a altura manométrica total, em watts (W);

- j) rendimento da bomba (η_b): é a relação entre potência fornecida e potência consumida, adimensional.

4.1.2 Curvas características das bombas centrífugas

Para uma bomba centrífuga real específica, existe um conjunto de curvas determinadas experimentalmente, que relacionam as grandezas características e fornecem informações sobre o funcionamento do sistema. Estas grandezas ditas características, conforme Macintyre (1997, p. 124), são:

- a) vazão (Q);
- b) altura de elevação (H);
- c) número de rotações (n);
- d) potência (P);
- e) rendimento (η_b).

Tsutiya (2006, p. 241) ressalta a importância de se conhecer estas curvas, pois cada bomba é projetada para elevar uma vazão a uma determinada altura manométrica total em condições de máximo rendimento. As curvas, fornecidas pelos fabricantes, representam o resultado de funcionamento da bomba para um dado número de rotações n. Tem-se as seguintes curvas:

- a) de estrangulação, que relaciona a vazão com a altura total para diferentes diâmetros de rotor (figura 9a);
- b) de rendimento do conjunto motor-bomba, que são apresentadas como curvas de nível sobrepostas às curvas de estrangulação (figura 9a);
- c) de NPSH (*Net Positive Suction Head*) requerido (figura 9b);
- d) de potência consumida, que pode ser apresentada ou usada como substituta da curva de rendimento, e relaciona a vazão com a potência (figura 9c).

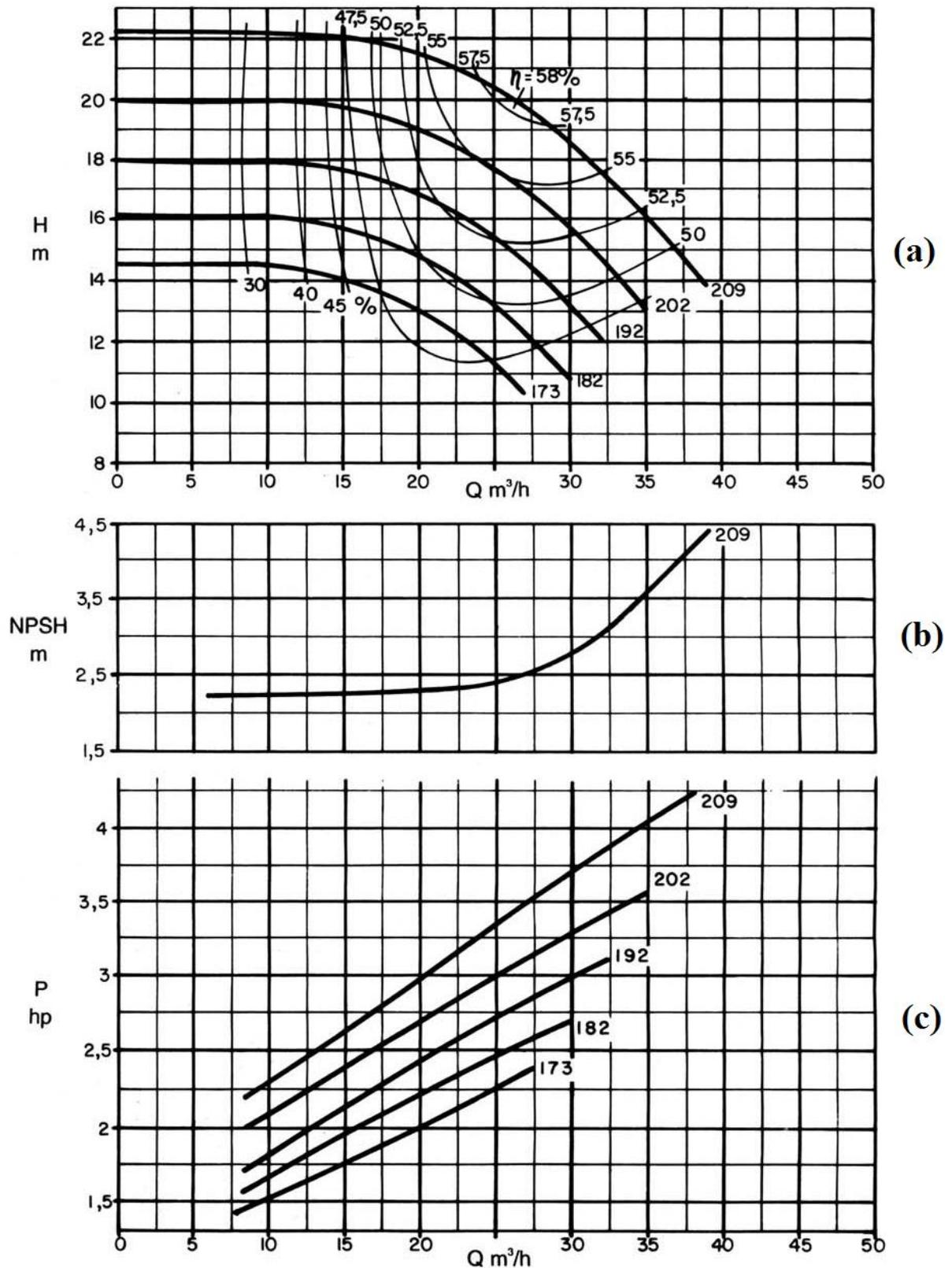


Figura 9: conjunto de curvas características para uma bomba real, modelo Meganorm, tamanho 40-200, de rotação nominal 1750 RPM, fabricada pela KSB (KSB BOMBAS HIDRÁULICAS SA, 2005, p. 42)

O NPSH disponível tem que ser maior que o NPSH requerido pela bomba, para que esta não apresente problemas de cavitação. Conforme Tsutiya (2006, p. 246), o NPSH disponível:

É uma característica da instalação, definida como a energia que o líquido possui em um ponto imediatamente antes da flange de sucção da bomba, acima de sua pressão de vapor. É a disponibilidade de energia que faz com que o líquido consiga alcançar as pás do rotor da bomba.

A definição do modelo adequado ao projeto pode ser feita fazendo uso do gráfico de quadriculas, como o exemplo da figura 10. Neste gráfico, conhecidos os valores de altura manométrica total e vazão e se obtém o modelo de bomba compatível com a instalação, verificando-se quais são as curvas características adequadas que devem ser usadas no projeto.

Campo de Aplicação - 60 Hz

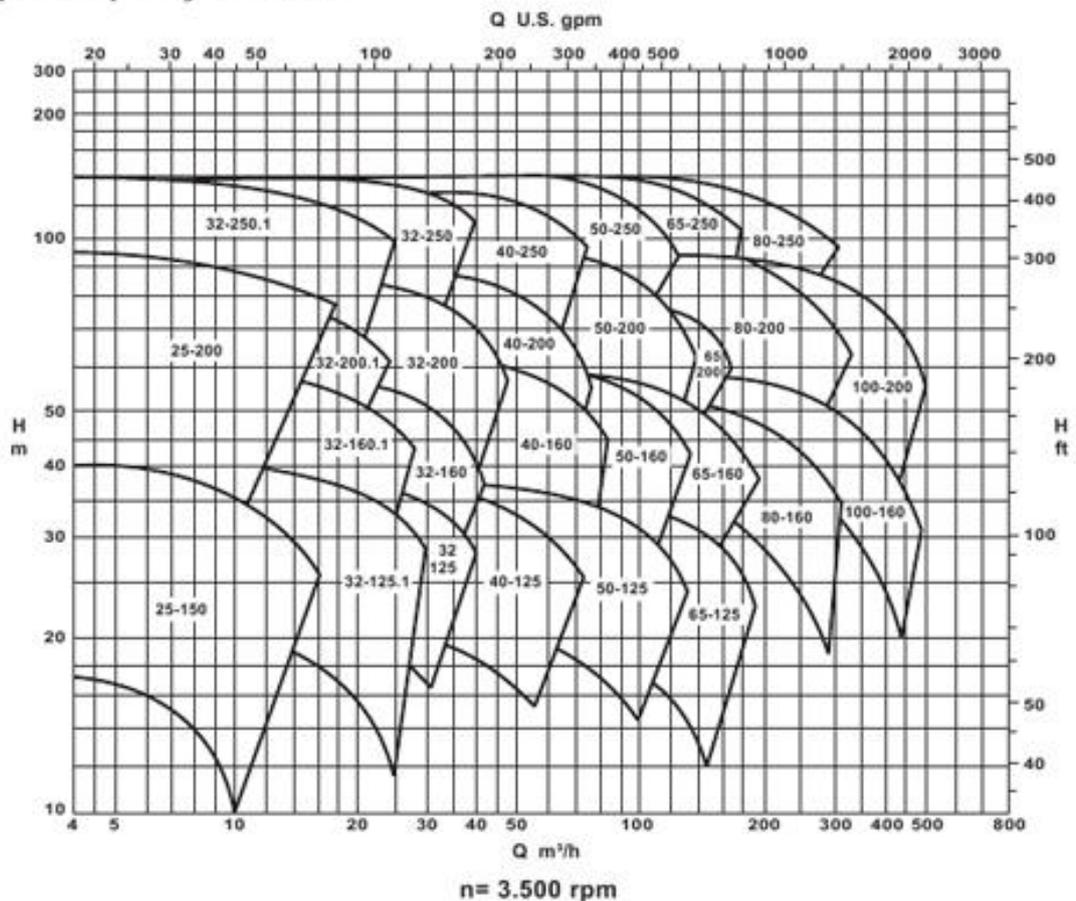


Figura 10: exemplo de gráfico de quadriculas para escolha do modelo de bomba Meganorm (KSB BOMBAS HIDRÁULICA SA, 2007, p. 2)

4.1.3 Curva característica do sistema

A curva característica do sistema, também chamada de curva característica do encanamento, caracteriza as condições do escoamento na instalação. Ela indica, de acordo com Macintyre (1996, p. 167), o valor de energia que é necessário fornecer ao líquido para que este escoe através do encanamento e consiga vencer o desnível geométrico e todas as resistências passivas oferecidas pelo encanamento. Pode ser representada pela equação 1:

$$H = H_g + f(Q) \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

H = altura manométrica total, em metros (m);

H_g = altura geométrica total, em metros (m);

$f(Q)$ = função que depende da vazão e que representa as perdas de carga que ocorrem quando o fluido atravessa uma determinada canalização, em metros (m).

A construção desta curva pode ser efetuada através da determinação das perdas totais de carga, para uma determinada quantidade de valores de vazão e acrescentado a estes, a altura geométrica total. Traçando a curva para os pontos encontrados, chega-se a algo similar ao representado na figura 11, aonde $f(Q)$ corresponde a parcela dinâmica e H_g a parcela estática.

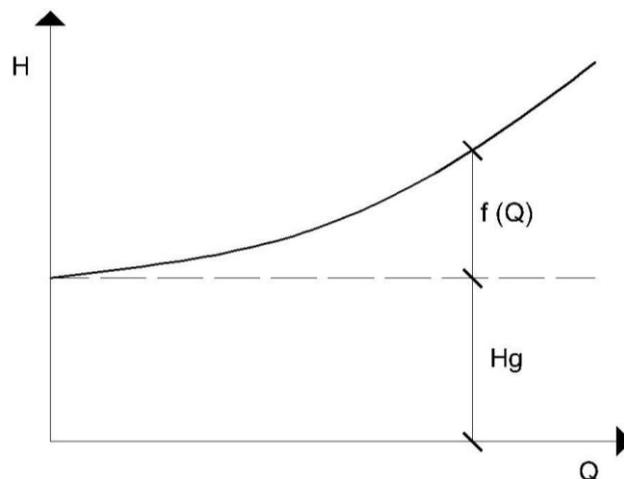


Figura 11: representação de uma curva característica de um encanamento genérico

4.1.4 Escolha das bombas e definição do ponto de operação

A escolha do conjunto motor-bomba se faz analisando as curvas do sistema, das bombas disponíveis no mercado e com o tipo de operação do sistema: única bomba, bombas em paralelo ou bombas em série. Considera-se ainda a padronização dos equipamentos eletromecânicos e o estudo dos transientes hidráulicos (TSUTIYA, 2006, p. 248).

Na operação de uma única bomba, o ponto de operação do sistema é determinado pelo cruzamento da curva de estrangulação da bomba com a curva do sistema, ambas em mesma escala, conforme figura 12. Cabe salientar, que este ponto de operação é variável, pois depende de fatores como variação do nível de água do poço de sucção e perdas de carga agravadas pelo envelhecimento da tubulação que acarretam variação nos termos da equação 1. Por isso, a análise da operação é feita com o uso de uma família de curvas do sistema elevatório. Para a boa operação do sistema, é necessário que a faixa do melhor rendimento da bomba esteja compreendida entre os pontos operacionais determinados com o uso destas famílias de curvas (TSUTIYA, 2006, p. 248-249).

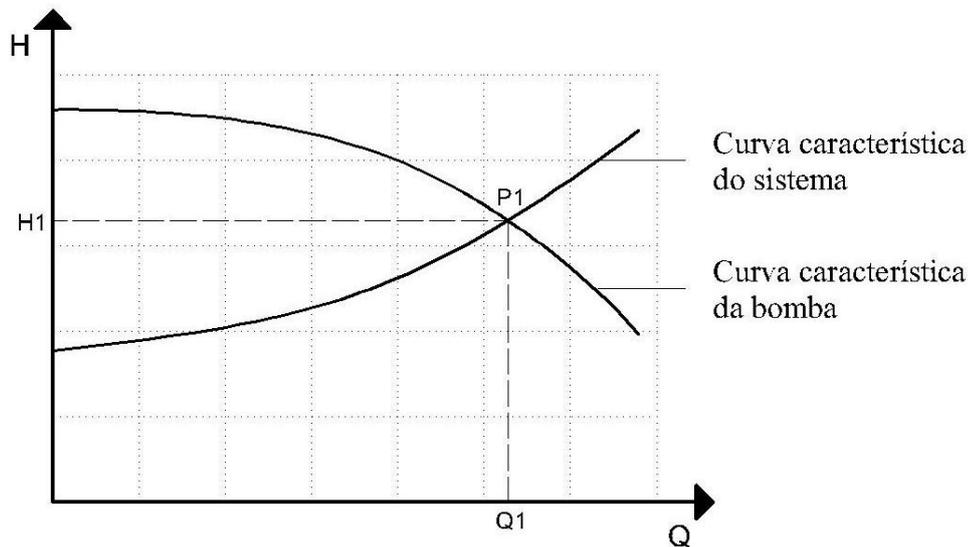


Figura 12: representação do ponto de funcionamento de um sistema elevatório, que ocorre na intersecção da curva característica da bomba com a do encanamento

Em sistemas com bombas em paralelo ou série, que correspondem às situações mais comuns em estações elevatórias, o ponto de funcionamento também é definido pela intersecção das curvas, só que utilizando a família de curvas do sistema, para diferentes situações, e a curva do sistema de bombeamento empregado (paralelo ou série).

4.1.5 Associação de bombas centrífugas

As associações de bombas (figura 13) são necessárias para que seja possível aumentar significativamente as descargas ou alturas manométricas e assim atender as necessidades operacionais (MACINTYRE, 1997, p. 176). Por isso, as elevatórias contam com duas, três ou mais bombas, estas podendo estar associadas em série ou paralelo (MACINTYRE, 1997, p. 431).

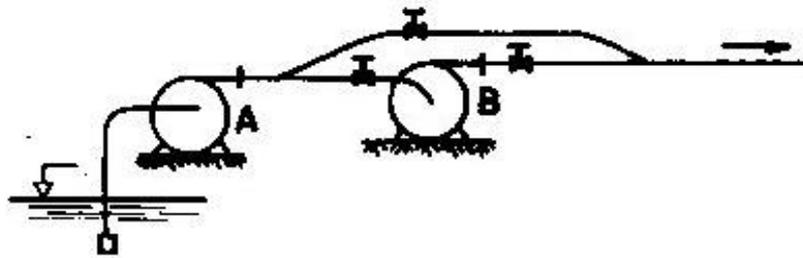


Figura 13: associação de bombas, aonde fazendo uso dos registros é possível operar o sistema com uma ou com duas bombas, em paralelo ou em série (MACINTYRE, 1997, p. 177)

4.1.5.1 Bombas em paralelo

Diz-se que as bombas estão operando em paralelo, quando duas ou mais bombas funcionando simultaneamente, tem suas descargas encaminhadas para uma mesma tubulação (MACINTYRE, 1997, p. 177). É possível definir a curva característica de duas bombas operando em paralelo, fazendo a duplicação dos valores da abscissa da curva característica de uma única bomba. No caso de três bombas, os valores da abscissa devem ser triplicados (MACINTYRE, 1997, p. 178). A figura 14 exemplifica o processo.

Cada uma das bombas em funcionamento paralelo é responsável por uma parcela da vazão total recalçada e que, conforme a figura 14, esta parcela de vazão é inferior quando comparada a descarga da mesma bomba operando isoladamente. Tsutiya (2006, p. 249) salienta que várias bombas nesta forma de associação podem, individualmente, se afastar do seu ponto de melhor eficiência. Macintyre (1997, p. 178) afirma que as bombas que operam

em paralelo, devem ser iguais, pois assim se evita a ocorrência de correntes secundárias, provenientes da bomba de maior potência para a de menor potência.

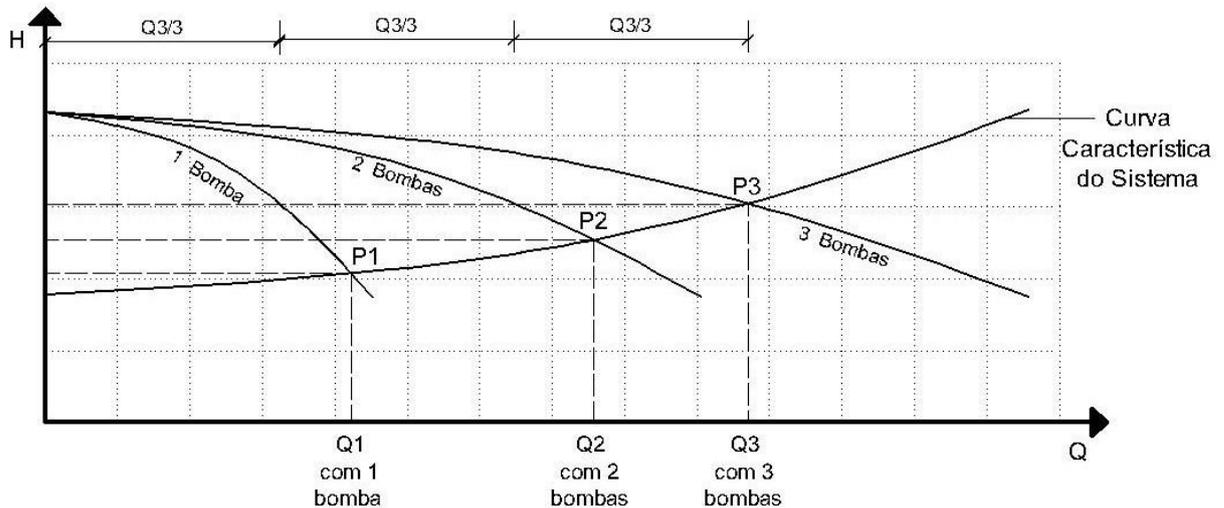


Figura 14: curva característica para instalação com bombas em paralelo (adaptado de MACINTYRE, 1997, p. 178)

4.1.5.2 Bombas em série

Quando duas ou mais bombas, de mesmo modelo ou não, são atravessadas pela mesma vazão, diz-se que o sistema de bombeamento opera em série. Em uma situação como esta cada uma das bombas é responsável por fornecer uma parcela da altura manométrica e a instalação deve ser feita de modo que seja possível operar um número qualquer, em série ou não, de bombas (MACINTYRE, 1997, p. 176).

A curva característica de uma situação como esta é obtida, somando para cada vazão, a altura manométrica de cada bomba, conforme a figura 15. Segundo Macintyre (1997, p. 177), emprega-se o sistema em série quando se deseja atender reservatórios em níveis ou distâncias diferentes.

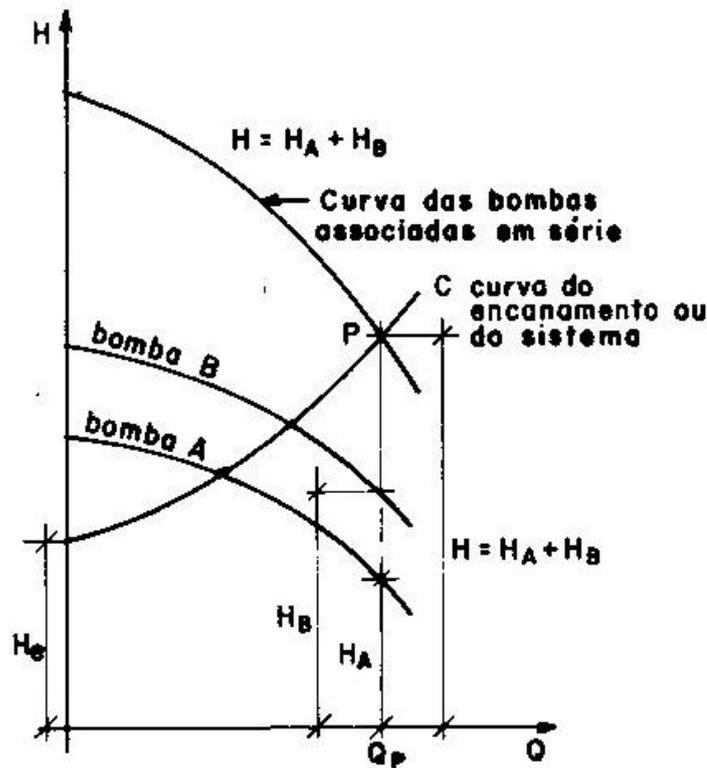


Figura 15: curva característica para instalação com bombas em série
(MACINTYRE, 1997, p. 177)

4.1.6 Leis de Semelhança

Diz-se que duas bombas são semelhantes quando apresentam proporcionalidade entre a geometria e o comportamento cinemático. A proporcionalidade geométrica existe quando a relação entre as dimensões das peças que compõem a bomba, tais como diâmetro do rotor, diâmetro de saída e largura do rotor, possuem o mesmo valor quando comparadas. A semelhança cinemática é verificada quando a relação entre fatores como velocidade de ingresso e velocidade tangente as pás do rotor, entre outras, são iguais.

Estas semelhanças geométricas e dinâmicas permitem a determinação de relações entre diferentes fatores, chamadas de leis de semelhança. São muito importantes, pois possuem grande aplicação, uma vez que permitem comparar bombas de diferentes dimensões ou ainda a mesma bomba funcionando em diferentes condições de rotação, vazão, altura e potência. White (1999, p. 504) apresenta as seguintes equações como sendo as leis de semelhança:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right) * \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^3 \quad (\text{equação 2})$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 * \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 \quad (\text{equação 3})$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^3 * \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 * \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^5 \quad (\text{equação 4})$$

Onde:

Q_1 e Q_2 = vazão das bombas 1 e 2, respectivamente, em metros cúbicos por segundo (m^3/s);

n_1 e n_2 = número de rotações das bombas 1 e 2, respectivamente, em rotações por minuto (RPM);

D_1 e D_2 = diâmetro do rotor das bombas 1 e 2, respectivamente, em metros (m);

H_1 e H_2 = altura manométrica total das bombas 1 e 2, respectivamente, em metros (m);

P_1 e P_2 = potência consumida pelas bombas 1 e 2, respectivamente, em watts (W);

ρ_1 e ρ_2 = massa específica do fluido que atravessa as bombas 1 e 2, respectivamente, em quilogramas por metro cúbico (kg/m^3).

4.1.7 Bomba afogada e não afogada

Há duas formas de instalar uma bomba em relação ao nível da água do poço de sucção em um sistema de recalque. A primeira solução é instalar a bomba abaixo do nível da água (figura 16a), diz-se então que a bomba está afogada e a sucção é positiva. No outro caso, com a bomba em cota superior ao nível da água (figura 16b), dá-se o nome de bomba não afogada e a sucção é negativa (TSUTIYA, 2006, p. 239).

Bombas afogadas são de mais fácil operação, pois a água escoar naturalmente para dentro da bomba, não sendo necessário realizar o escorvamento da bomba, que é o processo de

introduzir água até encher a bomba e o tubo de sucção, para que seja possível iniciar o processo de bombeamento. Em bombas não afogadas e não autoescorvantes sempre deve ser feita a escorva (MACINTYRE, 1997, p. 309).

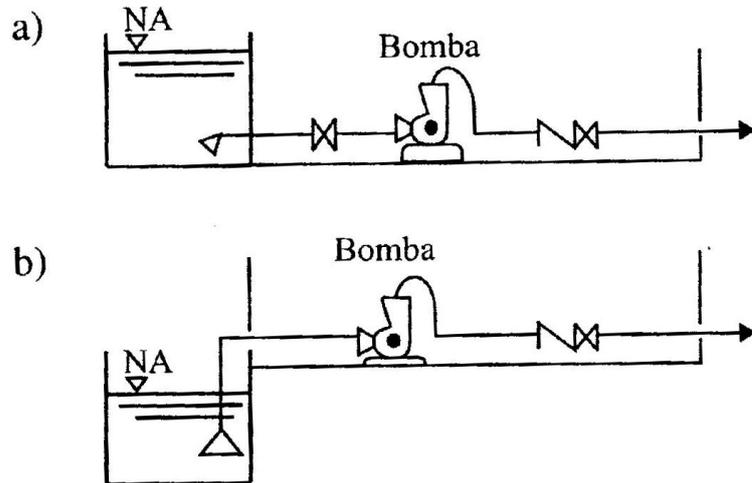


Figura 16: formas de instalação do bombeamento em relação ao nível da água (TSUTIYA, 2006, p. 239)

4.2 MOTORES

Motores são as máquinas que transformam uma forma de energia em energia mecânica. Quando em conjunto com bombas, essa energia mecânica é repassada a bomba que a transforma em energia cinética e de pressão, repassando-a ao fluido.

Um exemplo deste tipo de equipamento é o motor elétrico, que transforma a energia elétrica em mecânica. Conforme Tsutiya (2006, p. 233), o motor elétrico é o mais utilizado no acionamento de bombas devido a sua simplicidade, confiabilidade, flexibilidade e menor custo. Netto et al. (1998, p. 269) também reforçam a utilização dos motores elétricos no acionamento de bombas em estações elevatórias. Entre os diversos motores elétricos, usualmente os mais empregados são os motores de indução e os motores síncronos (NETTO et al., 1998, p. 295).

O primeiro, de indução, é o mais comum devido a sua robustez, baixo custo e mais fácil operação. Funciona com velocidade constante que varia ligeiramente em função da carga

mecânica aplicada ao eixo, sendo adequado para quase todos os tipos de máquinas acionadas. Permite a utilização dos variadores de frequência para controle da velocidade. O segundo, síncrono, é usado em grandes instalações, pois é indicado para grandes potenciais. Exige operação cuidadosa, mas com vantagens quanto ao rendimento. Funciona com velocidade fixa (WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A., 2009, p. 71).

4.3 VARIADORES DE FREQUÊNCIA

Segundo Dutra (2005, p. 12), existe duas formas tradicionais de controlar as vazões em um sistema de abastecimento: fazendo uso de válvulas de estrangulamento ou variando a rotação do bombeamento. Para a primeira situação, é inserida uma válvula após a saída da bomba que tem por objetivo reduzir o diâmetro e, conseqüentemente, aumentar a resistência ao escoamento causando redução na vazão. A curva de estrangulação da bomba permanece constante e as alterações ficam por conta da curva característica do sistema (figura 17). Neste processo, a rotação da bomba fica inalterada e a potência consumida aumenta para suprir o aumento de carga (DUTRA, 2005, p. 13).

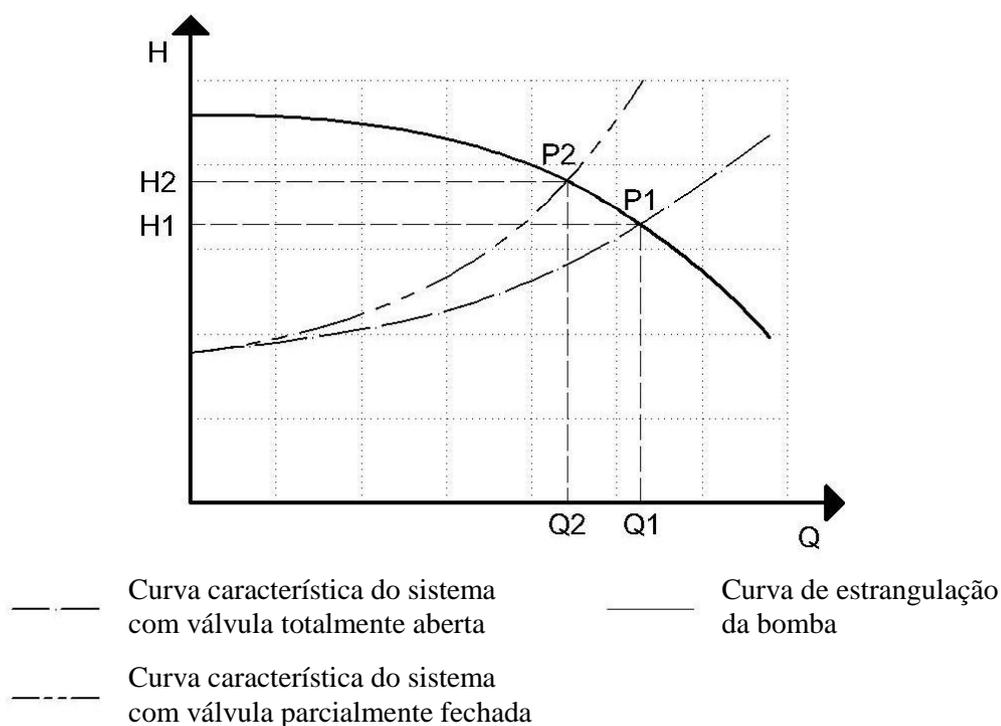


Figura 17: efeito ocasionado na curva do sistema pelo fechamento parcial da válvula de estrangulamento, deslocando o ponto de funcionamento de P1 para P2

A segunda forma de controlar as vazões é variando a rotação do bombeamento. Isto pode ser obtido por duas vias usuais: alterando o diâmetro do rotor ou variando a rotação da bomba (DUTRA, 2005, p. 14). Alterar o diâmetro do rotor envolve a usinagem do mesmo, sendo uma solução adotada em fase de projeto. Para solução de problemas como variações de consumo ao longo do dia, a solução apropriada é variar a rotação da bomba. Uma forma de se obter isto é utilizar o variador de frequência.

Conforme Tsutiya (2006, p. 266) o variador de frequência “[...] é um equipamento elétrico capaz de produzir uma variação nos valores de frequência elétrica que alimenta o motor, promovendo uma variação de sua rotação”. O autor salienta que essa variação de frequência é comandada por um sinal elétrico proveniente de um sensor, que pode ser, por exemplo, de pressão no caso de redes de distribuição e acaba por alterar as rotações do motor, modificando também a descarga e altura total recalçada pela bomba, como pode ser apreciado na figura 18.

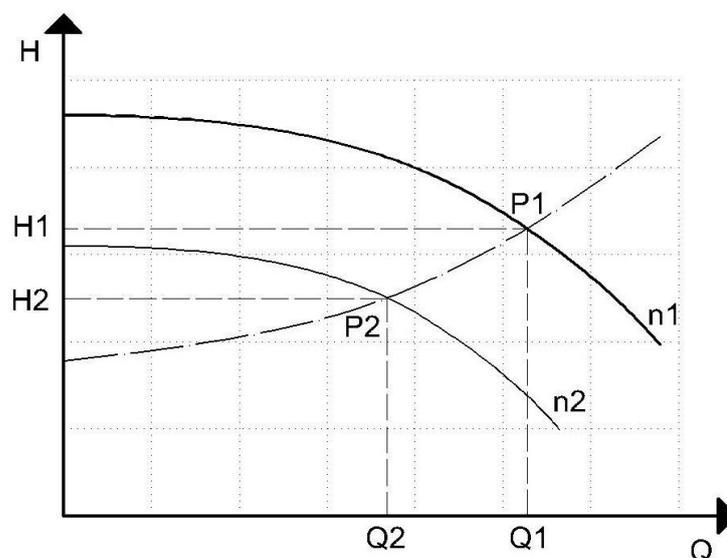


Figura 18: efeito ocasionado na curva de estrangulação da bomba quando operada com diferentes rotações (n_1 e n_2), com consequente alteração no ponto de funcionamento do sistema

Coura (2007, p. 48) afirma que há outras vantagens associadas ao uso do variador de frequência como a manutenção do fator de potência próximo a um, eliminando a necessidade de correção por meio de capacitores e da limitação do valor da corrente de partida do motor. Todavia, o mesmo autor destaca que o uso do variador de frequência requer cuidados, uma vez que:

- a) seu uso pode gerar harmônicas (ruídos ou distorções com picos de tensão e/ou corrente) que se propagam para o sistema elétrico interno da instalação e rede elétrica externa, causando interferência em outros consumidores e tornando os responsáveis passíveis de multa por parte da distribuidora elétrica;
- b) há possibilidade do aumento da temperatura do motor quando operado em frequência mais baixa;
- c) existe chance de recirculação quando, em paralelo, uma bomba funciona com rotação fixa e outra com rotação variável;
- d) deve-se optar, quando se trabalha com bombas funcionando com rotação variável, por aquelas que apresentam curvas de estrangulação bem **acentuadas**, já que bombas com curvas **planas** as variações são mínimas.

5 ANÁLISE DO USO DE VARIADORES DE FREQUÊNCIA NO CONTROLE DE VAZÕES

O presente trabalho pretende analisar o aumento da eficiência energética nos sistemas de bombeamento para o abastecimento de água, com o uso de variador de frequência para o controle das vazões. Para tanto, optou-se realizar esta análise comparativa utilizando duas metodologias: experimentação em laboratório e teórica. Nos itens que seguem, é apresentado a metodologia aplicada, o desenvolvimento e os resultados obtidos.

5.1 MÉTODO APLICADO

Para avaliar os efeitos do variador de frequência no aumento da eficiência energética dos sistemas de bombeamento optou-se pela comparação da energia necessária para atender quatro cenários de consumo, através uma bomba operando em uma primeira avaliação com rotação constante de 1750 RPM e depois variando a rotação por meio do variador de frequência. Cada cenário corresponde a uma curva de consumo diferente, que deveria ser atendida pelo sistema de bombeamento. São eles:

- a) cenário1 – curva de consumo com vazão constante em todo intervalo de tempo (figura 19a);
- b) cenário 2 – curva com vazão constante em um primeiro intervalo para logo depois sofrer um decréscimo brusco e alcançar um novo valor de descarga, onde após se estabilizar permanece constante (figura 19b);
- c) cenário 3 – curva com vazão crescendo linearmente, até atingir um máximo e decrescendo também linearmente (figura 19c);
- d) e por último cenário 4 - curva com vazão crescendo senoidalmente, até atingir um máximo e decrescendo, também com variação senoidal até retornar ao valor inicial (figura 19d).

O atendimento deste cenário, para conseqüente verificação da energia necessária ao funcionamento do motor quando o controle de vazões é realizado através de válvula de

estrangulamento ou variação na rotação da bomba, foi realizado por dois métodos distintos: experimental e por cálculo teórico. A curva do sistema para todos os cenários sempre foi a mesma. A metodologia adotada para o desenvolvimento de cada caso é descrita nos itens 5.1.1 e 5.1.2.

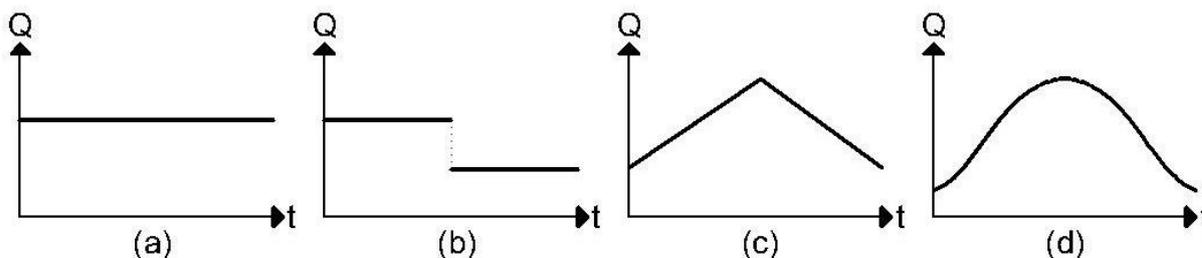


Figura 19: curvas de consumo para os diferentes cenários propostos

5.1.1 Método experimental

Para o desenvolvimento do experimento fez-se uso das instalações do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). O LENHS/UFRGS é o resultado da ação da Eletrobrás em parceria com a Universidade, por meio do Programa Nacional de Eficiência Energética em Saneamento Ambiental (PROCEL SANEAR), que tem por objetivo torná-lo uma referência regional em eficiência energética e hidráulica em saneamento, nas atividades de ensino, pesquisa aplicada e extensão.

A sua estrutura é composta por três bombas, reservatório inferior e superior, malha de consumo e medidores, tanto de informações hidráulicas como elétricas que permitem simulações e análises de um sistema de abastecimento completo. Sua vista em planta é apresentada na figura 20.

Da bancada do laboratório do LENHS é possível operar o Supervisório, que consiste em um programa desenvolvido com o objetivo de tornar possível a operação e o controle de todas as estruturas, de forma automatizada. Ele está conectado a todos os componentes do LENHS e permite, por exemplo, que de maneira rápida se opere equipamentos ou ainda que se controlem válvulas presentes na instalação. Além disso, o Supervisório permite a coleta em

tempo real de inúmeras informações, como vazão e pressão em todos os pontos do sistema, níveis dos reservatórios, rendimento da bomba, frequência de operação, corrente, rendimento e potência do motor, entre muitos outros.

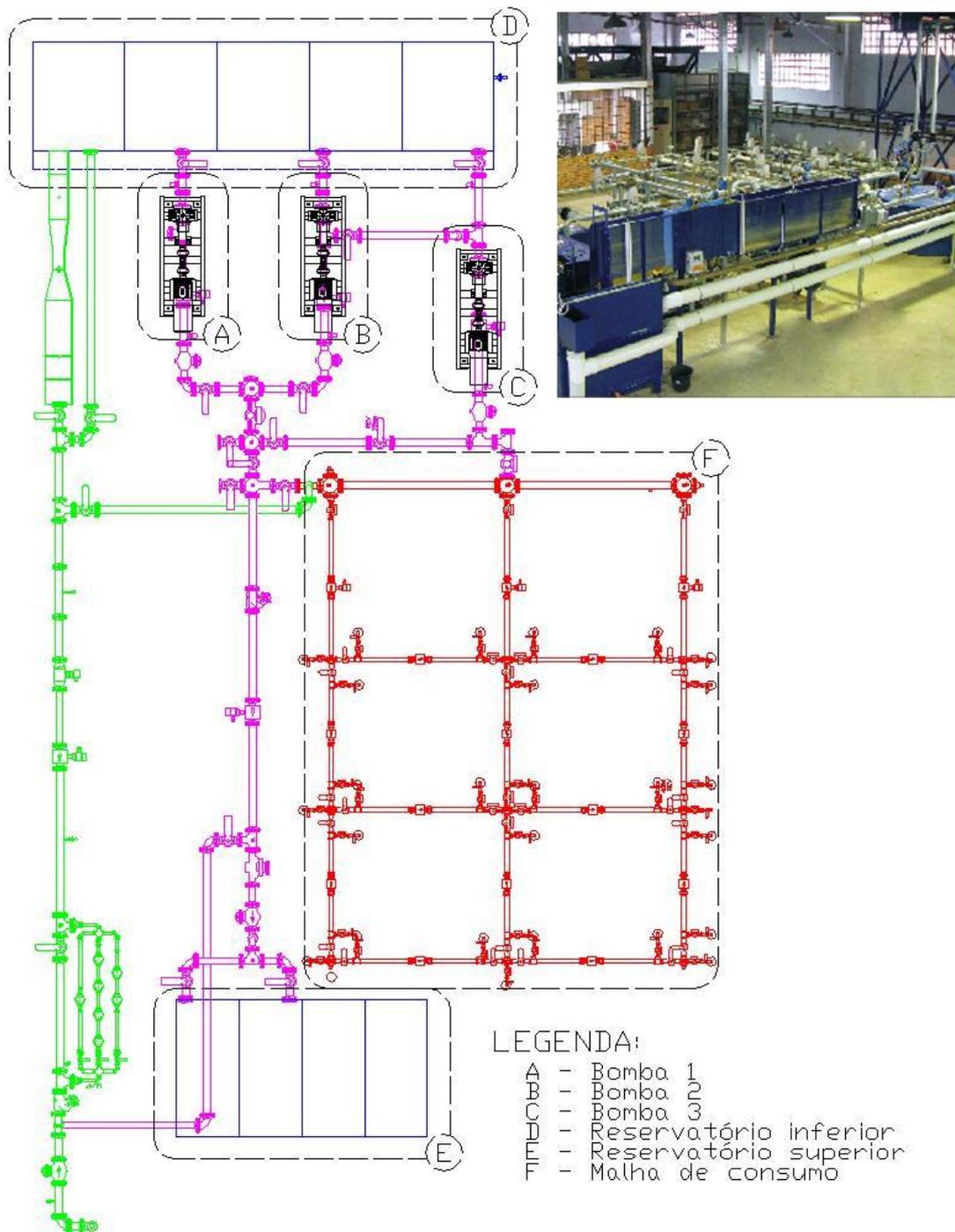


Figura 20: vista em planta da estrutura existente do LENHS e no detalhe é possível visualizar foto do laboratório

No desenvolvimento do experimento deste trabalho, utilizou-se apenas uma parte da estrutura, analisando somente o funcionamento de uma das bombas, com e sem variador. A parte da instalação utilizada pode ser vista na figura 21, onde se optou por bombear a água do reservatório inferior através da bomba 1, fazendo com que o escoamento percorresse o caminho apresentado na ilustração e retornasse ao reservatório inferior, em circuito fechado. Por este percurso, o escoamento atravessa além de medidores de pressão e vazão, uma válvula globo motorizada que pode ser controlada pelo Supervisório e é necessária para avaliação do consumo do motor, quando o controle de vazões é realizado por válvula de estrangulamento.

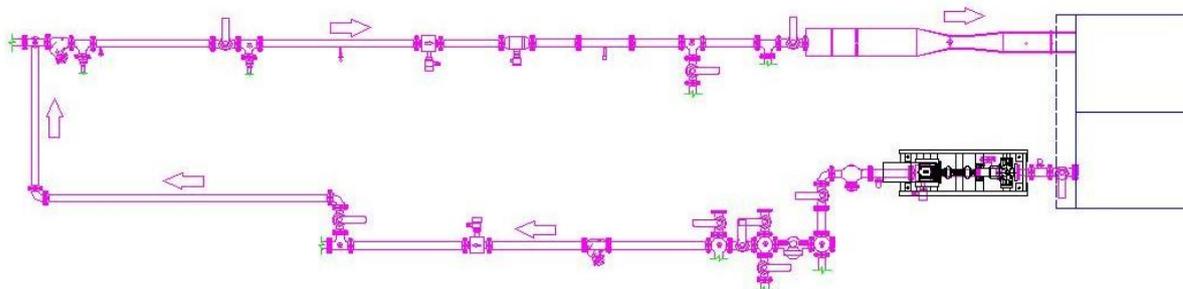


Figura 21: vista em planta do trajeto percorrido pelo escoamento no LENHS para o experimento

A bomba 1, pertencente a instalação do LENHS e utilizada na análise é da família das turbobombas, do tipo centrífuga, fabricada pela empresa KSB, modelo Meganorm, com diâmetro nominal do flange de recalque de 40,0 mm, diâmetro nominal do rotor de 200,0 mm e rotação nominal de 1750 RPM. Segundo informações do fabricante, ela é indicada para o bombeamento de líquidos limpos ou turvos, com diversas aplicações entre as quais o abastecimento de água (KSB BOMBAS HIDRÁULICA SA, 2007, p. 1). As curvas características estão apresentadas na figura 9. O motor acoplado a esta bomba é o WEG Alto Rendimento Plus, com potência de 5cv, 4 pólos (1750rpm), trifásico, 220/380v (WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A., 2010).

Definida a bomba a ser avaliada e o percurso a ser percorrido pelo escoamento, deu-se encaminhamento a próxima etapa: realização do experimento e coleta de dados. O procedimento para obtenção dos dados foi feito mediante os seguintes passos, para cada um dos cenários:

- a) análise da curva de consumo que deveria ser suprida;

- b) determinação da abertura da válvula globo e frequência de operação da bomba, em função do ensaio:
- válvula, onde a rotação é fixa, a frequência de operação é constante e igual a 60 Hz e o controle de vazão é realizado pela abertura e fechamento da válvula globo motorizada;
 - variador, onde se tem a válvula globo constantemente e totalmente aberta e o controle das vazões é realizado pela variação na frequência de operação do motor e por consequência, na alteração da rotação da bomba;
- c) início do ensaio e registro dos valores de vazão e potência a cada dois segundos, pelo Supervisório;
- d) para os cenários 2, 3 e 4, em que a curva de consumo não era constante em todo intervalo de tempo, houve variação manual, por intermédio do Supervisório, da porcentagem de abertura da válvula globo ou da frequência de operação do motor (função do ensaio em desenvolvimento), de modo a se obter a vazão necessária para suprir o intervalo seguinte;
- e) atendida toda curva de consumo, fixada para cada cenário, encerrou-se o ensaio e exportaram-se os dados registrados pelo Supervisório, iniciando o tratamento e análise dos mesmos.

5.1.2 Método para cálculo teórico

Para a determinação da energia consumida por método teórico, utilizaram-se as curvas de consumo com os mesmos valores de vazão adotados no experimental. Deu-se então a determinação da energia consumida, em todos os cenários, para as duas situações de controle de vazão: válvula e variador.

Para o caso onde se utilizou válvula e a bomba operando com rotação constante, entrou-se nas curvas de potência fornecidas pelo fabricante (figura 9c), com as vazões conhecidas e obteve-se a potência necessária ao funcionamento da bomba. Para saber o rendimento do motor, entra-se na curva de rendimento (curva A da figura 22) com o valor da potência fornecida pelo motor (potência necessária ao funcionamento da bomba) dividida pela potência nominal do mesmo (5 cv). Dividindo os valores de potência necessária a bomba pelo rendimento, se obtêm a potência do motor, que por sua vez, quando multiplicado pelo tempo, resulta na energia consumida pelo sistema.

No segundo caso onde a vazão é controlada pelo variador e a bomba opera com rotação variável, foi necessária primeiramente a determinação da velocidade de rotação em função da

nova frequência de operação. Isto é possível aplicando na equação 4, os valores de potência consumida pela bomba experimentalmente e a velocidade de rotação conhecida (1750 RPM), resultando na equação abaixo:

$$\frac{P_{me2} * R_2}{P_{me1} * R_1} = \left(\frac{n_2}{1750}\right)^3 \quad (\text{equação 5})$$

Onde:

P_{me1} = potência consumida pelo motor no ensaio 1 experimental (W);

R_1 = rendimento do motor no ensaio 1 experimental;

P_{me2} = potência consumida pelo motor no ensaio 2 experimental (W);

R_2 = rendimento do motor no ensaio 2 experimental;

n_2 = velocidade de rotação para o ensaio 2 (RPM).

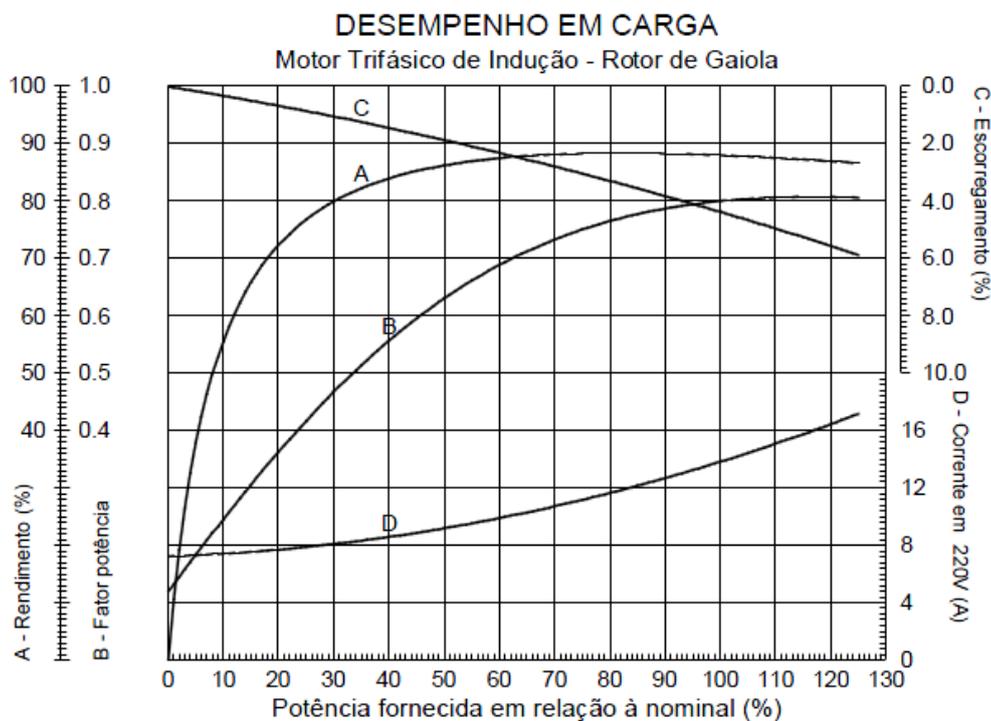


Figura 22: gráfico de desempenho em carga para o motor WEG existente no LEHNS (WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A., 2010)

Com as duas velocidade de rotação conhecidas, aplica-se novamente a equação 4, agora utilizando a potência consumida pela bomba determinada teoricamente para a situação

operada por válvula e determina-se a potência consumida pela bomba quando operada por variador. Esta, dividida pelo rendimento teórico do motor (figura 22, curva A) operado por variador, resulta na potência consumida do mesmo, dado necessário ao cálculo da energia.

5.2 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

Nos próximos itens apresentam-se os desenvolvimentos e resultados experimentais e teóricos, das avaliações experimentais e teóricas, na obtenção da energia consumida ao atender os cenários, previamente descritos.

5.2.1 Cenário 1

O objetivo do cenário 1 é a verificação da energia consumida pelo sistema de bombeamento ao atender um consumo constante no tempo. A vazão que deveria ser suprida era de 375 L/min, em um período de 90 segundos, totalizando um volume de 562,5 litros. Nos itens a seguir, apresentam-se os desenvolvimentos experimental e teórico.

5.2.1.1 Avaliação Experimental

Determinaram-se previamente os valores da frequência de operação do motor e da porcentagem de abertura da válvula globo, para o controle das vazões nos ensaios 1 e 2, de forma a fornecer uma vazão constante de 375 L/min Os valores obtidos são apresentados no quadro 1.

	Válvula	Variador
Frequência de Operação (Hz)	60,00	42,00
Abertura da Válvula (%)	28,00	100,00

Quadro 1: valores utilizados para a frequência e para a abertura de válvula na experimentação do cenário 1

Ajustando o sistema para cada ensaio nas condições propostas no quadro 1, foi possível definir as vazões médias que realmente foram bombeadas e também, a potência média que o sistema utilizou para isto. O volume total recalcado nos 90 segundos, os valores de vazão e potência médias registrados, os desvios padrões das amostras de cada ensaio e as relações calculadas estão descritos no quadro 2.

	Válvula	Variador	Relação Variador/Válvula
Tempo total de duração (s)	90	90	-
Vazão média (L/min)	383,32	378,89	-
Desvio padrão para vazão média	3,80	2,32	-
Volume bombeado (L)	574,98	568,34	0,988
Potência média consumida (W)	2889,75	1381,96	0,478
Desvio padrão para potência média	10,93	5,82	-
Rendimento do motor	0,797	0,695	0,871
Energia consumida (J)	260077,52	124376,74	0,478
Relação Energia/Volume (J/L)	452,32	218,84	0,484

Quadro 2: resultados obtidos experimentalmente para o cenário 1

Os dados apresentados no quadro 2 demonstram que as vazões médias e o volume totais, são bastante similares nos dois ensaios, o que permite afirmar que em ambos realizou-se a mesma tarefa, todavia utilizando energias bastante diferentes. A relação das energias apresentadas no quadro 2 é de 0,478, demonstrando que há um ganho significativo no aumento da eficiência quando a vazão é operada por variador de frequência e não pela válvula de estrangulação. Cabe observação também, o fato de queda no rendimento do motor quando variada a frequência. Partindo dos dados apresentados no quadro 2, é possível traçar os gráficos comparativos para o cenário 1 da vazão no tempo e da potência no tempo, que são apresentados nas figuras 23 e 24, em conjunto com os resultados obtidos na solução teórica.

5.2.1.2 Avaliação teórica

Aplica-se o método anteriormente descrito, no qual para determinar a energia consumida no caso onde o controle é feito por válvula, faz uso da figura 9c, que fornece a potência necessária a bomba para recalcar a mesma vazão descrita no quadro 1. Esta potência depois

de corrigida pelo fator de rendimento, determinado experimentalmente e apresentado no quadro 2, fornece a potência consumida pelo motor e possibilita o cálculo da energia.

O caminho para a determinação da energia no caso onde se fez uso do variador difere do caso anterior. Nesta situação, primeiramente se determinou a velocidade de rotação da bomba quando operada para frequência diferente de 60 Hz através da equação 5. Provido desta velocidade, aplicou-se a equação 4, com os dados conhecidos e obteve-se a potência teórica para a situação operada com variador. No quadro 3 encontram-se os resultados obtidos teoricamente.

	Válvula	Variador	Relação Variador/Válvula
Velocidade de rotação [RPM]	1750	1307	-
Tempo total de duração [s]	90,00	90,00	-
Potência necessária [hp]	2,85	1,19	0,417
Potência necessária [W]	2125,24	885,36	0,417
Rendimento teórico	0,869	0,756	-
Potência consumida [W]	2444,88	1170,89	0,479
Energia consumida [J]	220039	105380	0,479

Quadro 3: resultados obtidos teoricamente para o cenário 1

Os resultados finais do quadro 3 permitem observar, em concordância com o experimental, que há um ganho significativo na redução do consumo de energia quando é empregado o variador de frequência para o controle de vazões. Os gráficos comparativos para o cenário 1 da vazão no tempo e da potência no tempo são apresentados nas figuras 23 e 24.

5.2.1.3 Comparação entre experimental e teórico

Ao comparar o valor teórico com o experimental, percebe-se que há uma diferença de 8% entre ambos, resultando em um valor abaixo do observado na realidade. O gráfico da vazão *versus* tempo, para as duas situações e as duas soluções, pode ser visto na figura 23. O gráfico comparativo para as potências consumidas pelo motor é apresentado na figura 24.

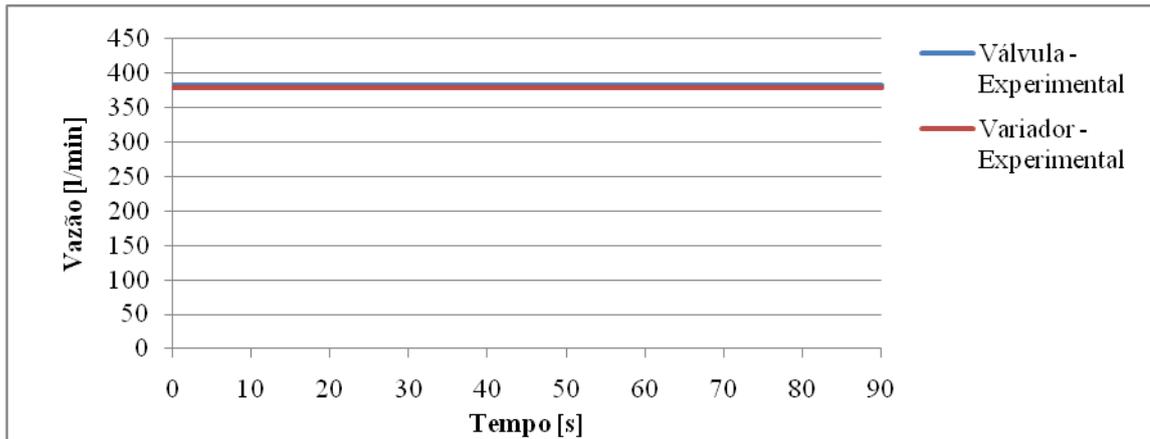


Figura 23: relação vazão x tempo para os ensaios experimentais do cenário 1

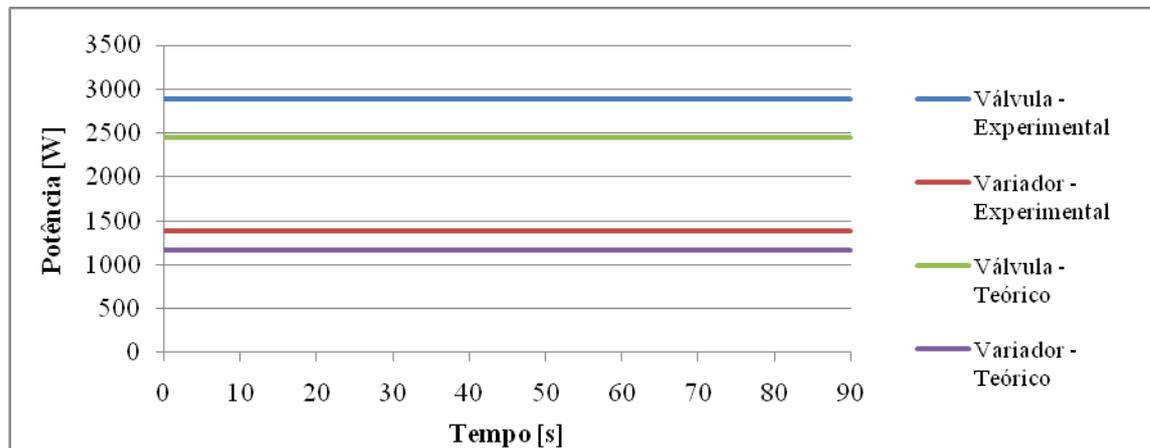


Figura 24: relação potência x tempo para os ensaios experimentais e teóricos do cenário 1

5.2.2 Cenário 2

Objetivou-se no cenário 2 a verificação da energia consumida pelo sistema de bombeamento para atender um consumo constante em um primeiro momento, que após sofrer um decréscimo abrupto, retorna a uma condição também constante, de novo valor de descarga. A vazão que deveria ser suprida era de 375 L/min no primeiro intervalo de tempo e de 330 L/min no segundo intervalo de tempo, após sofrer a alteração. O teste ficou dividido em dois intervalos de 60 segundos cada, totalizando 120 segundos. O volume recalcado final esperado

deveria ser de aproximadamente 705 litros. Segue nos próximos itens o desenvolvimento experimental e teórico.

5.2.2.1 Avaliação experimental

Os dados de porcentagem de abertura da válvula e da frequência de operação que forneceram as vazões de 375 L/min e 330 L/min, necessário ao desenvolvimento do cenário 2 e determinados previamente, são apresentados no quadro 4.

	Intervalo [s]	Válvula	Variador
Frequência de Operação (Hz)	0-60	60	42
	61-120		37
Abertura da Válvula (%)	0-60	70	100
	61-120	35	

Quadro 4: valores utilizados para a frequência e para a abertura de válvula na experimentação do cenário 2

Ajustando o sistema para as condições iniciais em cada ensaio conforme o quadro 4, foi possível definir as vazões e as potências médias que se estabeleceram no primeiro intervalo de tempo. Quando o teste completou 60 segundos, alteraram-se, por meio do Supervisor, as condições do ensaio, prosseguindo com o registro de dados por outros 60 segundos. Os dados de vazão e potência médias registrados para cada intervalo e os desvios padrões destas amostras estão descritos no quadro 5, onde se fazem presentes também o volume total recalado, a energia consumida pelo motor e a relação entre os resultados obtidos.

	Intervalo [s]	Válvula	Variador	Relação Variador/Válvula
Tempo total de duração (s)	-	120	120	-
Vazão média (L/min)	0-60	377,83	375,70	-
	61-120	331,97	329,05	-
Desvio padrão para vazão média	0-60	1,67	1,39	-
	61-120	1,38	1,38	-
Volume bombeado (L)	0-120	709,8	704,8	0,993
Potência média consumida (W)	0-60	2862,74	1389,79	0,485
	61-120	2711,22	1063,27	0,392
Desvio padrão para potência média	0-60	8,91	3,85	-
	61-120	9,32	8,40	-
Rendimento do motor	0-60	0,799	0,698	0,874
	61-120	0,798	0,643	0,806
Energia consumida (J)	0-120	334437	147183	0,440
Relação Energia/Volume (J/L)	0-120	471,17	208,84	0,443

Quadro 5: resultados obtidos experimentalmente para o cenário 2

Analisando o quadro 5 verifica-se uma similaridade bastante acentuada entre os volumes recalcados, tornando válida afirmativa que pelos dois métodos distintos se obteve o mesmo resultado, com exceção a energia consumida, que apresenta variação significativa de um ensaio para outro. A relação entre as energias dos ensaios resulta em 0,44, tornado claro o ganho na eficiência proporcionado pelo variador de frequência. Novamente se faz presente a queda do rendimento do motor em função da redução da frequência de operação. Partindo dos dados apresentados no quadro 2, traçaram-se os gráficos de vazão *versus* tempo (figura 25) e potência *versus* tempo (figura 26).

5.2.2.2 Avaliação teórica

Para avaliar teoricamente a curva de consumo do cenário 2, empregou-se o mesmo método duas vezes, para assim poder determinar as potências e as velocidades de rotação no primeiro e no segundo intervalo de tempo. No quadro 6 são explicitados todos os valores usados para o cálculo teóricos e também a energia consumida em cada ensaio pelo motor.

	Intervalo [s]	Válvula	Variador	Relação Variador/Válvula
Tempo total de duração [s]	-	120	120	-
Velocidade de rotação [RPM]	0-60	1750	1315	-
	61-120	1750	1192	-
Potência necessária [hp]	0-60	2,85	1,21	0,424
	61-120	2,64	0,83	0,316
Potência necessária [W]	0-60	2125,25	901,95	0,424
	61-120	1968,65	622,12	0,316
Rendimento teórico	0-60	0,869	0,756	0,870
	61-120	0,866	0,684	0,791
Potência consumida [W]	0-60	2444,88	1192,82	0,488
	61-120	2273,79	908,87	0,400
Energia consumida [J]	0-120	283121	126102	0,445

Quadro 6: resultados obtidos teoricamente para o cenário 2

5.2.2.3 Comparação entre experimental e teórico

Comparando o valor teórico com o experimental, para o cenário 2, encontra-se uma discrepância nos resultados de 8,7%, valor este levemente superior ao encontrado no cenário 1 e inferior ao observado na realidade. O gráfico da vazão *versus* tempo pode ser visto na figura 25 e o gráfico comparativo para as potências consumidas pelo motor é apresentado na figura 26.

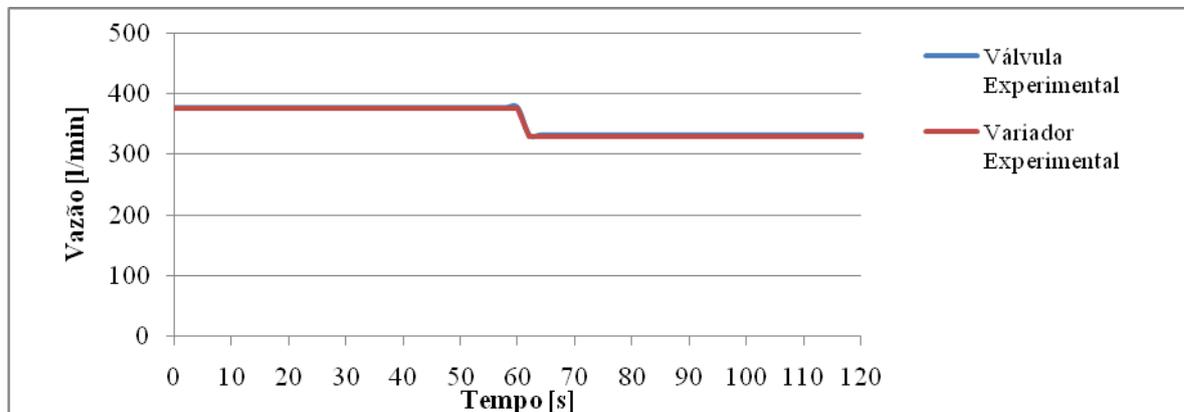


Figura 25: relação vazão x tempo para os ensaios experimentais do cenário 2

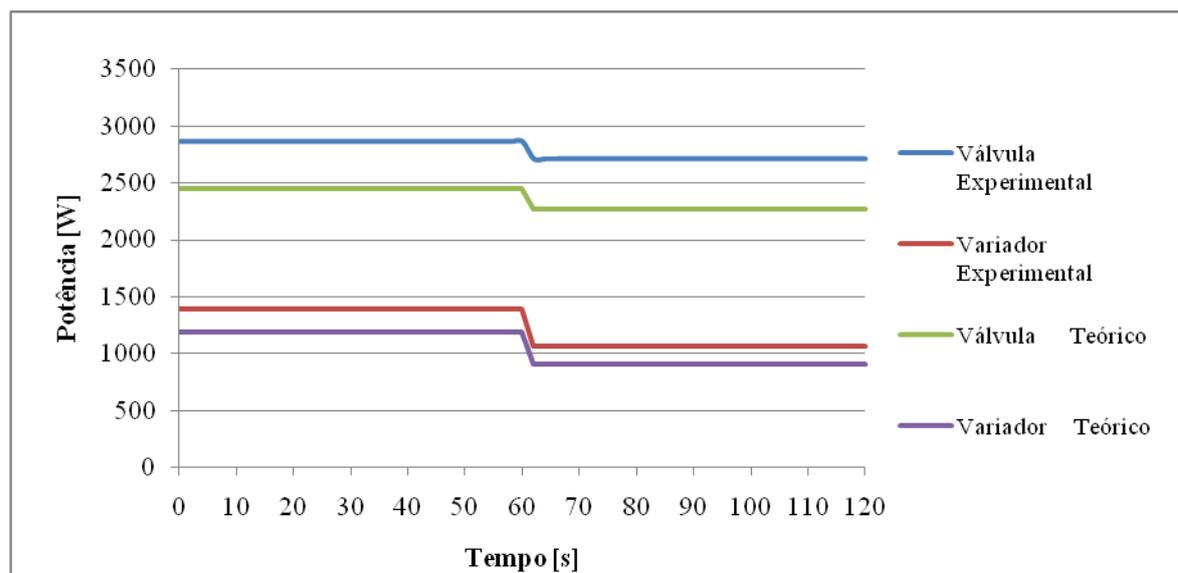


Figura 26: relação potência x tempo para os ensaios experimentais e teóricos do cenário 2

5.2.3 Cenário 3

A proposta do cenário 3 era a verificação da energia consumida pelo sistema de bombeamento para atender um consumo crescente linearmente, até um máximo, para em seguida decrescer também linearmente. Devido à dificuldade de simular duas curvas de consumo idênticas que variassem continuamente no tempo por dois métodos diferentes, optou-se por outra solução. Desenvolveram-se curvas de consumo que crescem e decrescem formando patamares. Assim, realizou-se a simulação de uma curva que inicia com uma vazão de 200 L/min, aumentando 100 L/min a cada 60 segundos, até atingir 500 L/min, quando passa a decrescer novamente até a vazão de 200 L/min. As simulações inteiras duraram 420 segundos e tem suas avaliações e comparações nos itens que seguem.

5.2.3.1 Avaliação experimental

No quadro 7 estão apresentados os valores de porcentagem de abertura de válvula e frequência de operação do motor utilizada em cada estágio para cada ensaio. Estes valores foram determinados antes do início dos ensaios.

	Intervalo [s]	Válvula	Variador
Tempo total de duração (s)	-	420	420
Frequência de Operação (Hz)	0-60	60	24
	61-120		34
	121-180		45
	181-240		56
	241-300		45
	301-360		34
	361-420		24
Abertura da Válvula (%)	0-60	14,0	100,0
	61-120	20,5	
	121-180	31,0	
	181-240	53,0	
	241-300	31,0	
	301-360	20,5	
	361-420	14,0	

Quadro 7: valores utilizados para a frequência e para a abertura de válvula na experimentação do cenário 3

Ajustou-se o sistema para as condições iniciais do quadro 7, para cada ensaio, e variaram-se a cada 60 segundos estes parâmetros por meio do Supervisor. Os resultados finais da simulação são apresentados no quadro 8. Observando este quadro, verifica-se que a relação entre os volumes bombeados é de 0,99, sugerindo que há uma similaridade elevada entre os volumes dos dois ensaios.

A avaliação da energia consumida pelo motor demonstrou mais uma vez que o consumo é bastante reduzido quando operado com variador de frequência ao invés de válvula, sendo a relação entre as energia dos ensaios de 0,48, tornado claro este ganho. O rendimento do motor por sua vez, é afetado em função da alteração da frequência de operação, apresentando-se menor para frequências menores. Com os resultados do quadro 8, foram traçados os gráficos de vazão *versus* tempo (figura 27) e potência *versus* tempo (figura 28).

	Intervalo [s]	Válvula	Desvio Padrão Válvula	Variador	Desvio Padrão Variador	Relação Variador/Válvula
Vazão média (L/min)	0-60	199,3	1,07	197,6	6,54	-
	61-120	299,4	7,40	300,0	19,99	-
	121-180	403,4	1,66	410,4	12,47	-
	181-240	500,4	3,41	511,3	48,75	-
	241-300	398,3	1,89	410,1	80,67	-
	301-360	287,0	2,88	300,3	138,59	-
	361-420	184,6	3,54	197,6	13,82	-
Potência média consumida (W)	0-60	2257	6,54	499	3,66	0,221
	61-120	2614	19,99	895	102,12	0,342
	121-180	2961	12,47	1689	7,72	0,570
	181-240	3215	48,75	2858	206,53	0,889
	241-300	2928	80,67	1691	3,49	0,577
	301-360	2584	138,59	896	247,03	0,347
	361-420	2189	13,82	501	5,42	0,229
Rendimento do motor	0-60	0,787	0,02	0,412	0,02	0,524
	61-120	0,803	0,02	0,605	0,11	0,753
	121-180	0,797	0,02	0,727	0,03	0,912
	181-240	0,802	0,02	0,786	0,08	0,980
	241-300	0,795	0,02	0,724	0,01	0,911
	301-360	0,790	0,05	0,602	0,08	0,762
	361-420	0,785	0,01	0,405	0,05	0,515
Tempo total de duração (s)	-	420	-	420	-	-
Volume bombeado (L)	0-420	2272	-	2271	-	0,999
Energia consumida (J)	0-420	1124848	-	541720	-	0,482
Relação Energia/Volume (J/L)	0-420	495,03	-	238,58	-	0,482

Quadro 8: resultados obtidos experimentalmente para o cenário 3

5.2.3.2 Avaliação teórica

A avaliação teórica da curva de consumo do cenário 3 faz uso do método descrito para a determinação das velocidades de rotação e potências consumidas pelo motor em cada um dos sete intervalos. No quadro 9 apresentam-se os resultados e os dados necessários para a obtenção dos mesmos.

	Intervalo [s]	Válvula	Variador	Relação Variador/Válvula
Velocidade de rotação [RPM]	0-60	1750	853	-
	61-120	1750	1114	-
	121-180	1750	1407	-
	181-240	1750	1671	-
	241-300	1750	1413	-
	301-360	1750	1123	-
	361-420	1750	858	-
Potência necessária [W]	0-60	1655,45	191,44	0,116
	61-120	1916,45	494,13	0,258
	121-180	2095,42	1089,94	0,520
	181-240	2445,90	2129,79	0,871
	241-300	2095,42	1102,14	0,526
	301-360	1916,45	506,32	0,264
	361-420	1655,45	195,28	0,118
Rendimento Teórico	0-60	0,850	0,378	-
	61-120	0,862	0,620	-
	121-180	0,869	0,799	-
	181-240	0,878	0,870	-
	241-300	0,869	0,799	-
	301-360	0,862	0,637	-
	361-420	0,850	0,378	-
Potência consumida [W]	0-60	1947,55	507,11	0,260
	61-120	2222,13	796,71	0,359
	121-180	2410,65	1364,01	0,566
	181-240	2784,76	2447,59	0,879
	241-300	2410,65	1379,28	0,572
	301-360	2222,13	794,39	0,357
	361-420	1947,55	517,29	0,266
Tempo total de duração [s]	-	420	420	-
Energia consumida [J]	0-420	956725	468383	0,490

Quadro 9: resultados obtidos teoricamente para o cenário 3

5.2.3.3 Comparação entre experimental e teórico

A variação nos resultados teóricos com os experimentais da energia consumida neste cenário foi de 8,2%, abaixo do observado na realidade. O gráfico da vazão *versus* tempo pode ser

visto na figura 27 e o gráfico comparativo para as potências consumidas pelo motor é apresentado na figura 28.

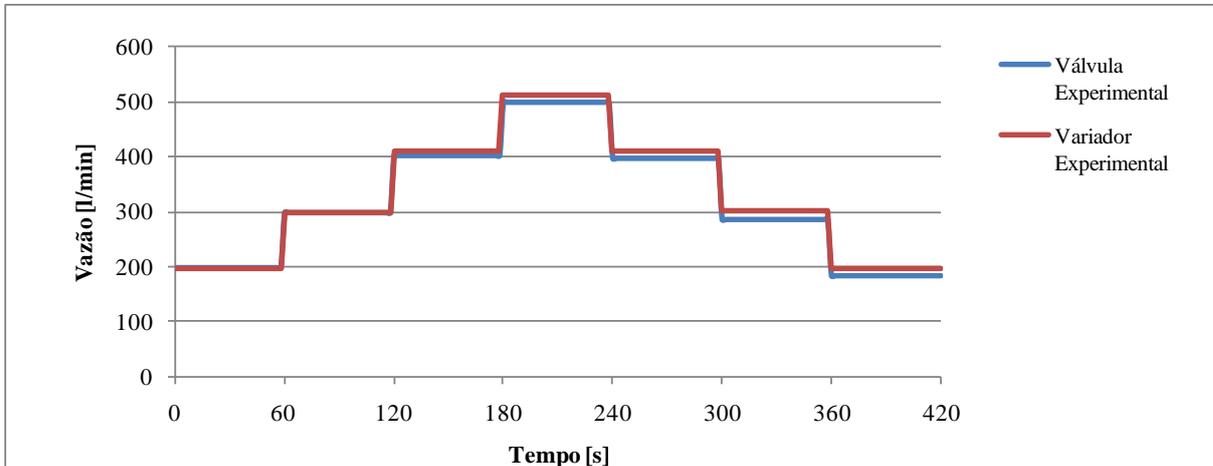


Figura 27: relação vazão x tempo para os ensaios experimentais e teóricos do cenário 3

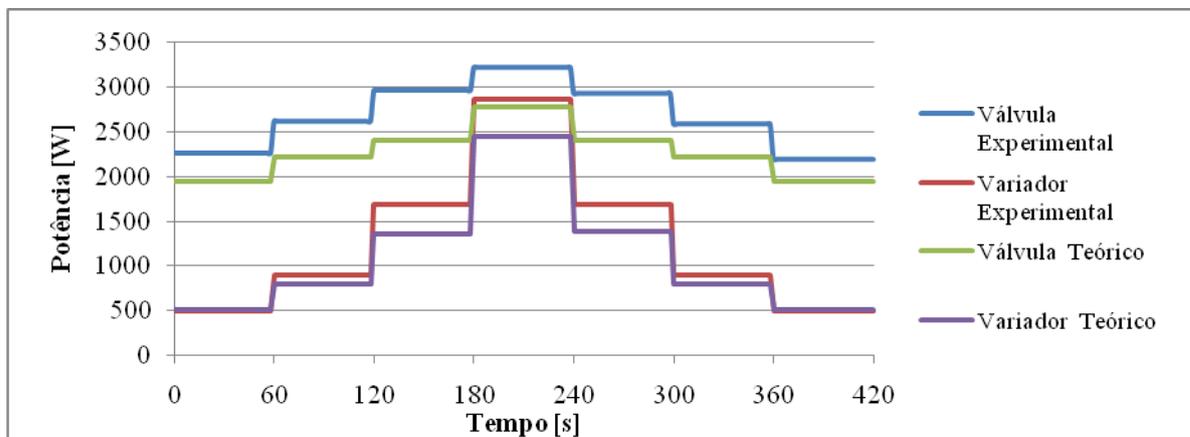


Figura 28: relação potência x tempo para os ensaios experimentais e teóricos do cenário 3

5.2.4 Cenário 4

No cenário 4 foi realizado o atendimento a uma curva de consumo que aumentasse senoidalmente de 150 L/min até 500 L/min e em seguida, da mesma forma, retornasse até os 150 L/min iniciais. O teste foi realizado da mesma forma que o cenário 3, com as variações

crescendo e decrescendo por meio de patamares. Cada um destes dois ensaios durou 1020 segundos. Os resultados estão apresentados nos próximos itens.

5.2.4.1 Avaliação experimental

Os dados de abertura de válvula e variação de frequência, utilizados no LEHNS, para cada um dos ensaios são explicitados no quadro 10. Mais uma vez, determinaram-se estes valores antes do início dos testes.

	Intervalo [s]	Válvula	Variador
Tempo total de duração (s)	-	1020	1020
Frequência de Operação (Hz)	0-60 / 961-1020	60	19
	61-120 / 901-960		27
	121-180 / 841-900		33
	181-240 / 781-840		39
	241-300 / 721-780		45
	301-360 / 661-720		50
	361-420 / 601-660		52
	421-480 / 541-600		54
	481-540		56
Abertura da Válvula (%)	0-60 / 961-1020	12,0	100
	61-120 / 901-960	16,5	
	121-180 / 841-900	21,0	
	181-240 / 781-840	25,5	
	241-300 / 721-780	31,0	
	301-360 / 661-720	37,0	
	361-420 / 601-660	43,5	
	421-480 / 541-600	49,5	
	481-540	53,0	

Quadro 10: valores utilizados para a frequência e para a abertura de válvula na experimentação do cenário 4

Após o desenvolvimento completo dos ensaios, realizado com o auxílio dos valores presentes no quadro 10, obtiveram-se os resultados de descarga, potência consumida pelo motor, rendimento e desvios padrões de todos os intervalos de tempo. Todos estes parâmetros obtidos experimentalmente estão apresentados no quadro 11 em conjunto com o valor da energia total calculada.

	Intervalo [s]	Válvula	Desvio Padrão Válvula	Variador	Desvio Padrão Variador	Relação Variador/Válvula
Vazão média (L/min)	0-60	150,27	1,03	153,07	1,19	-
	61-120	222,88	3,61	230,03	1,25	-
	121-180	291,68	1,71	295,84	8,60	-
	181-240	351,59	5,31	355,03	5,78	-
	241-300	403,06	3,32	411,88	2,78	-
	301-360	444,76	5,39	452,04	3,60	-
	361-420	472,22	3,93	481,88	4,91	-
	421-480	496,92	4,48	503,14	7,15	-
	481-540	506,20	5,06	511,54	4,35	-
	541-600	499,59	5,75	503,03	7,45	-
	601-660	476,85	3,87	478,99	5,56	-
	661-720	448,49	5,19	455,19	4,59	-
	721-780	407,00	3,09	412,30	3,37	-
	781-840	354,20	2,94	354,30	2,66	-
	841-900	295,40	2,53	295,87	1,78	-
901-960	220,69	1,68	229,60	5,40	-	
961-1020	150,14	1,84	152,32	2,64	-	
Potência média consumida (W)	0-60	2040,32	8,07	398,19	7,99	0,195
	61-120	2337,73	10,78	586,11	7,63	0,251
	121-180	2589,26	8,96	868,80	5,70	0,336
	181-240	2779,03	11,87	1226,12	6,33	0,441
	241-300	2938,11	10,60	1700,76	6,94	0,579
	301-360	3052,78	18,31	2119,88	8,15	0,694
	361-420	3131,23	13,34	2435,07	12,42	0,778
	421-480	3192,54	14,50	2741,55	10,56	0,859
	481-540	3215,55	14,82	2881,57	8,30	0,896
	541-600	3194,84	10,95	2738,61	15,38	0,857
	601-660	3146,85	14,78	2437,29	10,70	0,775
	661-720	3073,48	13,40	2121,49	8,74	0,690
	721-780	2947,86	11,82	1702,84	10,59	0,578
	781-840	2785,85	11,97	1230,65	9,97	0,442
	841-900	2593,99	10,31	868,75	7,17	0,335
901-960	2336,68	9,90	590,11	13,21	0,253	
961-1020	2048,03	7,93	403,33	11,40	0,197	
Rendimento do motor	0-60	0,771	0,014	0,298	0,036	0,386
	61-120	0,787	0,021	0,481	0,030	0,612
	121-180	0,796	0,008	0,609	0,055	0,766
	181-240	0,799	0,021	0,670	0,030	0,838
	241-300	0,794	0,012	0,722	0,018	0,908
	301-360	0,803	0,010	0,754	0,025	0,940
	361-420	0,802	0,009	0,768	0,020	0,957
	421-480	0,797	0,010	0,779	0,013	0,978
	481-540	0,802	0,009	0,789	0,009	0,984
	541-600	0,801	0,008	0,779	0,009	0,973
	601-660	0,794	0,010	0,773	0,023	0,973
	661-720	0,800	0,009	0,748	0,028	0,936
	721-780	0,801	0,012	0,719	0,041	0,897
	781-840	0,789	0,011	0,673	0,055	0,853
	841-900	0,791	0,017	0,602	0,021	0,761
901-960	0,785	0,017	0,484	0,034	0,618	
961-1020	0,763	0,023	0,312	0,039	0,409	
Tempo total de duração (s)	-	1020	-	1020	-	-
Volume bombeado (L)	0-1020	6191,93	-	6276,04	-	1,014
Energia consumida (J)	0-1020	2844248	-	1623069	-	0,571
Relação Energia/Volume (J/L)	0-1020	459,35	-	258,61	-	0,563

Quadro 11: resultados obtidos experimentalmente para o cenário 4

A partir do quadro 10 verifica-se que a relação entre os volumes bombeados é de 1,014, valor muito próximo de 1, que confere aos ensaios similaridade e torna válida a comparação das energias consumidas, que novamente é inferior quando o sistema opera com variação de rotação. A relação entre as energia do ensaio 2 e do ensaio 1 resultou em 0,57. Dos resultados do quadro 11 resultam os gráficos das figuras 29 e 30.

5.2.4.2 Avaliação teórica

Aplicando o método anteriormente descrito, determinaram-se as velocidades de rotação, os rendimentos e as potências consumidas para os dois ensaios. Para determinação das potências, consideraram-se os valores de vazão registrados apenas no primeiro intervalo, repetindo-se para o segundo ramo, quando as vazões decrescem. Esta decisão foi tomada pela existência de simetria entre os ramos e ainda, por falta de precisão para obtenção das potências através da figura 9c para pequenas variações de descarga. No quadro 12 estão registrados os valores de rendimento obtidos e no quadro 13, os resultados teóricos de potência e energia consumida.

	Intervalo [s]	Válvula	Variador
Rendimento Teórico	0-60	0,838	0,269
	61-120	0,852	0,463
	121-180	0,861	0,620
	181-240	0,868	0,730
	241-300	0,872	0,803
	301-360	0,875	0,838
	361-420	0,877	0,857
	421-480	0,878	0,867
	481-540	0,878	0,872
	541-600	0,878	0,867
	601-660	0,877	0,857
	661-720	0,875	0,838
	721-780	0,872	0,803
	781-840	0,868	0,730
	841-900	0,861	0,620
	901-960	0,852	0,463
961-1020	0,838	0,269	

Quadro 12: rendimentos obtidos teoricamente para o cenário 4

	Intervalo [s]	Válvula	Variador	Relação Variador/Válvula
Velocidade de rotação [RPM]	0-60	1750	739	-
	61-120	1750	937	-
	121-180	1750	1112	-
	181-240	1750	1256	-
	241-300	1750	1413	-
	301-360	1750	1518	-
	361-420	1750	1586	-
	421-480	1750	1651	-
	481-540	1750	1678	-
	541-600	1750	1651	-
	601-660	1750	1586	-
	661-720	1750	1518	-
	721-780	1750	1413	-
	781-840	1750	1256	-
	841-900	1750	1112	-
901-960	1750	937	-	
961-1020	1750	739	-	
Potência necessária [W]	0-60	1514	114	0,075
	61-120	1708	262	0,153
	121-180	1887	485	0,257
	181-240	2043	756	0,370
	241-300	2185	1149	0,526
	301-360	2282	1489	0,653
	361-420	2371	1765	0,744
	421-480	2416	2029	0,840
	481-540	2446	2156	0,882
	541-600	2416	2029	0,840
	601-660	2371	1765	0,744
	661-720	2282	1489	0,653
	721-780	2185	1149	0,526
	781-840	2043	756	0,370
	841-900	1887	485	0,257
901-960	1708	262	0,153	
961-1020	1514	114	0,075	
Potência consumida [W]	0-60	1805	424	0,235
	61-120	2005	566	0,282
	121-180	2192	781	0,356
	181-240	2354	1035	0,440
	241-300	2507	1431	0,571
	301-360	2609	1778	0,681
	361-420	2705	2060	0,761
	421-480	2752	2340	0,850
	481-540	2785	2473	0,888
	541-600	2752	2340	0,850
	601-660	2705	2060	0,761
	661-720	2609	1778	0,681
	721-780	2507	1431	0,571
	781-840	2354	1035	0,440
	841-900	2192	781	0,356
901-960	2005	566	0,282	
961-1020	1805	424	0,235	
Tempo total de duração [s]	-	1020	1020	-
Energia consumida [J]	0-1020	2438584	1398354	0,573

Quadro 13: resultados obtidos teoricamente para o cenário 4

5.2.4.3 Comparação entre experimental e teórico

Para este cenário, a relação entre o teórico e experimental apresentou uma diferença de aproximadamente 6,6%, sendo o calculado inferior ao medido experimentalmente. Os gráficos de vazão e potência no tempo são apresentados nas figuras 29 e 30, respectivamente.

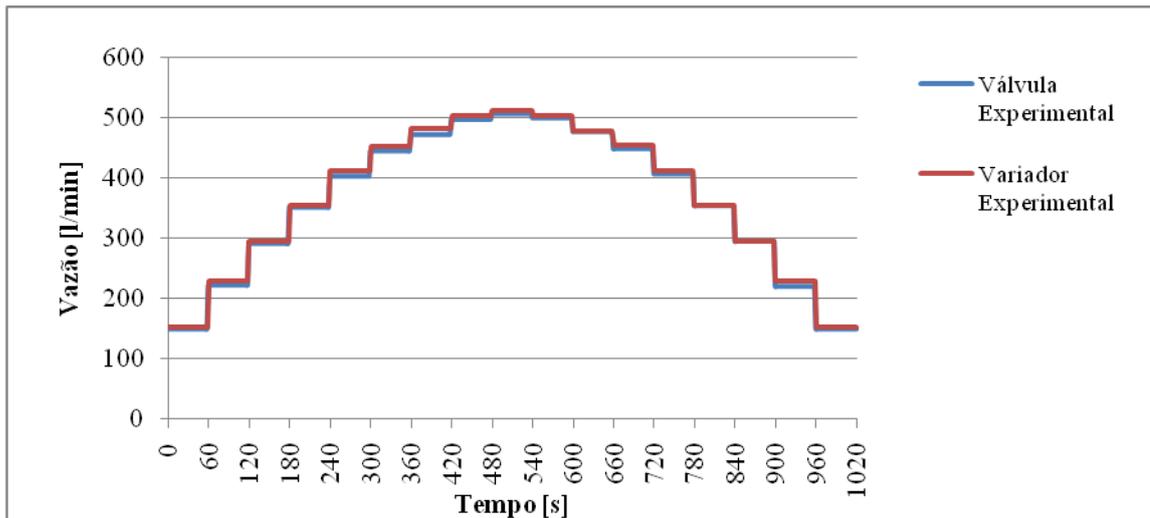


Figura 29: relação vazão x tempo para os ensaios experimentais e teóricos do cenário 4

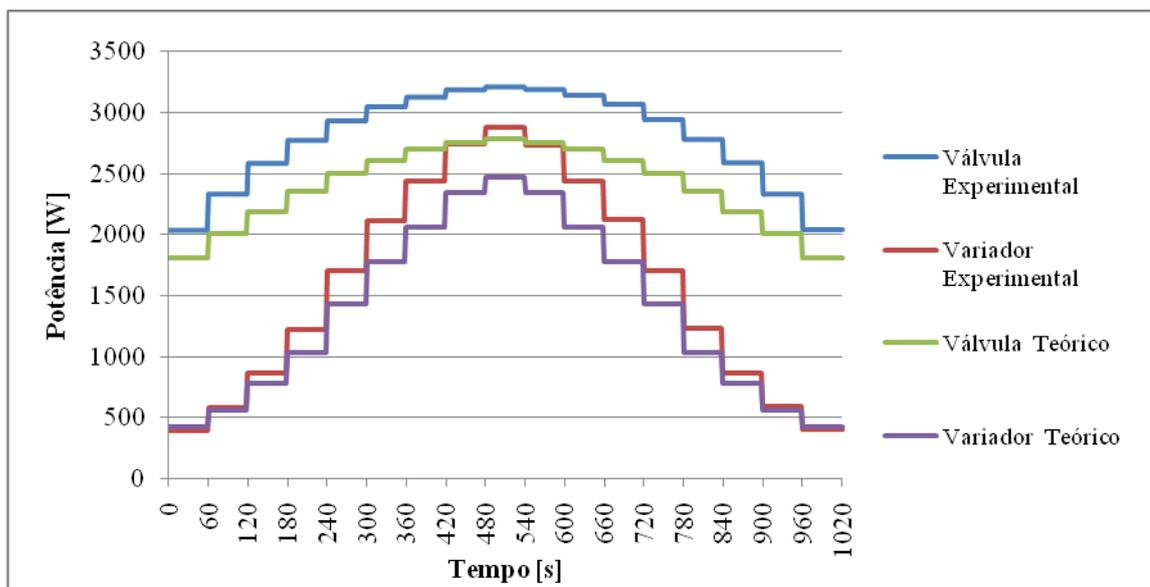


Figura 30: relação potência x tempo para os ensaios experimentais e teóricos do cenário 4

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos itens que seguem, são apresentadas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

6.1 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho era avaliar o aumento da eficiência energética dos sistemas de bombeamento para abastecimento de água, através do uso do variador de frequência no controle das vazões. Como estes sistemas de bombeamento são parte de um conjunto maior, o abastecimento de água, foi buscado descrevê-lo, por intermédio de uma apresentação das etapas que o constituem, dos métodos utilizados para a distribuição de água e da problemática das perdas. Na parte seguinte, tomou-se como enfoque o estudo dos componentes que constituem as estações elevatórias, consumidoras de grande parte da energia usada no abastecimento, descrevendo os motores, as bombas e as formas de controlar as vazões no bombeamento: válvula de estrangulação e variador de frequência. Desenvolvida está primeira etapa, deu-se então a análise do uso do variador como solução para o controle das vazões.

Para avaliar o variador de frequência realizou-se o estudo da energia consumida em quatro cenários diferentes, ora operando com variador, ora sem. Os diferentes cenários serviram para avaliar a sensibilidade do sistema frente às condições de operação diversas, tendo-se observado que o variador se aplica em qualquer condição de operação, sendo mais favorável nos cenários com bombeamento menos variável, onde apresentou menor relação de energia por volume. Em todas estas avaliações foi possível demonstrar o aumento da eficiência energética dos sistemas de bombeamento para abastecimento de água, quando as vazões são controladas pelo variador, sendo este, uma solução mais apropriada que as válvulas de estrangulação.

O uso do variador de frequência apresentou resultados significativos, com valores na redução do consumo de energia entre 44 e 57%, tornando possível através deste o aumento da eficiência energética dos sistemas de bombeamento para os cenários estudados. Este resultado

satisfaz a questão de pesquisa e atende ao objetivo deste trabalho. Observou-se experimentalmente ainda que, o rendimento do motor sofre com a alteração da frequência de operação. Quanto mais ele se afasta da frequência padrão de 60 Hz, maior é a queda em seu rendimento.

Na análise teórica, os resultados apresentaram um consumo de energia inferior aos experimentais. Entretanto, para comparação entre sistemas com e sem inversor ou de leis de operação diferentes o cálculo teórico é um bom indicativo sobre a eficiência. Esta diferença teórica observada pode ser explicada porque se adotam condições médias para as vazões e alturas manométricas, além de rendimentos constantes na elaboração das curvas das bombas e curvas do sistema, enquanto no experimental, os valores adotados correspondem aos reais para o tipo de sistema analisado.

6.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como recomendação para estudos futuros, é sugerido o controle das velocidades (0,6 m/s a 3,5 m/s) e das pressões (dinâmica mínima de 100 kPa e estática máxima de 500 kPa) a fim de atender os limites propostos na Norma Técnica Brasileira 12218/1994 – Projeto de Rede de Distribuição de Água Para Abastecimento Público – verificando a aplicabilidade do variador de frequência como forma de aumentar a eficiência energética do sistema. O controle das pressões também seria útil para verificar a redução de perdas por vazamentos, quando há possibilidade de se manter as pressões em seus valores mínimos.

REFERÊNCIAS

- BRASIL. Ministério das Cidades. Secretária Nacional de Saneamento Ambiental. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2007: Parte 1 – Texto. Visão Geral da Prestação de Serviços**. Brasília, DF, 2009. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/>>¹. Acesso em: 22 nov. 2009.
- COURA, S. P. **Técnicas de operação em sistemas de abastecimento de água**: a conta de energia elétrica no saneamento. Brasília: Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água, 2007.
- DUTRA, J. B. A. **Eficiência energética no controle da vazão em sistemas de bombeamento de água**: uso de válvula e controle de velocidade. Paraíba do Sul: [s.l], 2005.
- GOMES, H. P. **Sistemas de Abastecimento de Água**: dimensionamento econômico e operação de redes elevatórias. 2. ed. rev. amp. João Pessoa: Editora Universitária – UFPB, 2004.
- _____. **Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento**: análise econômica de projetos. Rio de Janeiro: ABES, 2005.
- HENN, E. A. L. **Máquinas de Fluido**. 2. ed. Santa Maria: Editora da UFSM, 2006.
- KSB BOMBAS HIDRÁULICAS SA. **Manual de Curvas Características**. 2005. Disponível em: <<http://www.ksb.com.br/frame.htm>>². Acesso em: 22 nov. 2009.
- _____. **Bomba Centrífuga Normalizada para uso geral**. 2007. Disponível em: <<http://www.ksb.com.br/frame.htm>>³. Acesso em: 22 nov. 2009.
- LENCASTRE, A. **Manual de Hidráulica Geral**. São Paulo: Edgard Blücher, 1972.
- MACINTYRE, A. J. **Instalações Hidráulicas**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.
- _____. **Bombas e Instalações de Bombeamento**. 2. ed. rev. Rio de Janeiro: LTC, 1997.
- NETTO, J. M. A.; MARTINS, J. A.; PUPPI, I. C.; NETTO, F. B.; FRANCO, P. N. C. **Planejamento de Sistemas de Abastecimento de Água**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1973.
- NETTO, J. M. A.; FERNANDEZ, M. F.; ITO, A. E.; ARAUJO, R. (Coord.). **Manual de Hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998.
- ¹ Acesso ao Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto, estando em <<http://www.snis.gov.br/>>, selecionar na categoria <Diagnósticos> a opção <Água e Esgotos>, selecionar o ano de <2007>, escolher a opção <Parte 1 (arquivo completo)>.
- ² Acesso ao Manual de curvas características, estando no site <<http://www.ksb.com.br/frame.htm>>, selecionar <água>, na barra de busca procurar por <Meganorm>, selecionar o arquivo para download <Manual de Curvas> para a bomba modelo Meganorm.
- ³ Acesso ao Folheto Descritivo: Bomba Centrífuga Normalizada Para Uso Geral, estando no site <<http://www.ksb.com.br/frame.htm>>, selecionar <água>, na barra de busca procurar por <Meganorm>, selecionar o arquivo para download <Folheto Descritivo (português)> para a bomba modelo Meganorm.

SANTANA, G. C. **Otimização da Operação de Sistemas de Distribuição de Água Abastecidos por Bombeamento e Reservatórios de Regularização**. 1999. 184 f. Tese (Doutorado em Automação) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. Universidade Estadual de Campinas, Campinas. Disponível em: <<http://libdigi.unicamp.br/document/?code=vtls000189198>>⁴. Acesso em: 18 nov. 2009.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água**. 3. ed. São Paulo: EPUSP, 2006.

WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A. Motores Elétricos de Corrente Alternada. 2009. Disponível em: <<http://www.weg.net/files/products/WEG-motores-eletricos-baixa-tensao-mercado-brasil-050-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 29 nov. 2009.

WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A. Publicação eletrônica [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <everton.polese@gmail.com> em 27 jun. 2010.

WHITE, F. M. **Mecânica dos Fluidos**. 4. ed. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 1999.

⁴ Acesso a tese, estando no site <<http://libdigi.unicamp.br/document/?code=vtls000189198>>, clicar em <Visualizar/Download>. Caso seja solicitado o cadastro para acessar o material, este é gratuito.