UNIVERSIDADE SANTA CECILIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

PAULO CESAR WANDERLEY

POTÊNCIA DE BOMBA CENTRÍFUGA EM UNIDADE PILOTO: VARIAÇÃO DA VAZÃO POR VÁLVULA E ROTAÇÃO.

SANTOS – SP
2018

PAULO CESAR WANDERLEY

POTÊNCIA DE BOMBA CENTRÍFUGA EM UNIDADE PILOTO: VARIAÇÃO DA VAZÃO POR VÁLVULA E ROTAÇÃO.

Dissertação apresentada à Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de mestre no Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, sob orientação do Prof. Dr. Carlos Alberto Amaral Moino.

SANTOS – SP
2018

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

621.67 WANDERLEY, Paulo Cesar.
W214e Potência de bomba centrífuga em unidade piloto: variação da vazão por válvula e rotação.
/ Paulo Cesar Wanderley. -- 2018
61 p.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Amaral Moino.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Santa Cecília, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos, SP, 2018.

1. Bomba centrífuga. 2. Rotação. 3. Semelhança completa. 4. Inversor de frequência.

I. Moino, Carlos Alberto Amaral. Potência de bomba centrífuga em unidade piloto: variação da vazão por válvula e rotação.

Elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas – Unisanta.

“Dedico este trabalho primeiramente a minha esposa Helena M. Giangiulio Wanderley e aos meus filhos Amanda e Felipe, pela paciência e apoio nos meus estudos e, sobretudo a Deus”.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Alberto Amaral Moino pelo apoio durante o trabalho.

Ao Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior e Prof. Dr. Vitor da Silva Rosa pelas contribuições com o aperfeiçoamento do texto.

A Universidade Santa Cecilia pela oportunidade de utilizar as instalações do laboratório de mecânica dos fluídos.

RESUMO

O consumo de energia elétrica em 2017 foi de 463.948 GWh, segundo dados preliminares do COPAM/EPE (comissão permanente de análise e acompanhamento do mercado de energia elétrica) de dezembro de 2017, sendo que o setor industrial consumiu 35,82 % desse total. O Brasil tem uma das tarifas energéticas industriais mais caras do mundo (Procel, 2015) e diante deste quadro, o investimento em EE (eficiência energética), para reduzir o consumo de energia elétrica, implica em aumento da competitividade da indústria. Os motores elétricos são os principais consumidores (43,7 %) do total de energia elétrica consumida na indústria no Brasil, segundo dados do Ministério de Minas e Energia (MME) de 2017. Nas instalações de bombas centrífugas, para variar a vazão é comum à utilização de válvulas de controle de fluxo tipo agulha, borboleta, globo e diafragma que reduzem a vazão restringindo a área de passagem do fluido, e que normalmente provocam perda de carga, mesmo que estejam totalmente abertas. Neste tipo de operação, a bomba continua trabalhando em rotação nominal e consequentemente consumindo potência nominal. A energia excedente será dissipada e perdida na válvula. Este trabalho teve como objetivo principal estudar a variação de vazão de água pela alteração de rotação em uma bomba centrífuga radial com o uso de um inversor de frequência, comparando com a redução de vazão de água por meio de um controle através de uma válvula reguladora do tipo globo. O objetivo secundário do presente estudo foi montar e adequar um modulo para ensaio em uma bomba centrífuga radial com medições de vazão e altura manométrica na bomba. Também comparar as curvas teóricas determinadas pela teoria de semelhança com as curvas determinadas experimentalmente. A unidade experimental consistiu basicamente de um motor elétrico de 4,0 cv em balanço acoplado a um dinamômetro, um inversor de frequência, uma bomba centrífuga radial de rotor fechado com diâmetro de 140 mm, uma placa de orifício, uma válvula de globo, um tanque de 3.600 litros, duto de recalque de diâmetro de 2” e duto de sucção de diâmetro de 4”. Foi realizada a aferição da placa de orifício e depois executado trinta ensaios em três rotações diferentes. Obteve-se uma redução de aproximadamente 40% na energia necessária, para as condições estudadas, controlando-se a vazão de água pela rotação do rotor da bomba, em relação ao controle de uma válvula de globo, além de um controle mais preciso da vazão volumétrica. O investimento na eficiência energética através do inversor de frequência é menor se comparado ao custo da energia elétrica consumida durante a vida útil da máquina.

Palavras-chave: Bomba centrífuga. Rotação. Semelhança completa. Inversor de frequência.

ABSTRACT

Electricity consumption in 2017 was 463,948 GWh, according to preliminary data from COPAM / EPE (permanent commission for the analysis and monitoring of the electricity market) in December 2017, and the industrial sector consumed 35.82% of this total. Brazil has one of the most expensive industrial energy tariffs in the world (Procel, 2015), and in light of this, investment in EE (energy efficiency) to reduce electricity consumption implies an increase in the competitiveness of the industry. Electric motors are the main consumers (43.7%) of the total electricity consumed in industry in Brazil, according to data from the Ministry of Mines and Energy (MME) of 2017. In centrifugal pump installations, to vary the flow is common to the use of needle, butterfly, globe, and diaphragm flow control valves that reduce flow by restricting the fluid passage area, and which normally cause loss of charge, even if fully opened. In this type of operation, the pump continues to operate at nominal speed and consequently consumes nominal power. The excess energy will be dissipated and lost in the valve. This work had as main objective to study the variation of water flow by the rotation change in a radial centrifugal pump with the use of a frequency inverter, comparing with the reduction of water flow through a control through a regulating valve of the balloon type. The secondary objective of the present study was to assemble and adapt a test module in a radial centrifugal pump with flow and head measurements in the pump. Also compare the theoretical curves determined by the theory of similarity with the experimentally determined curves. The experimental unit consisted primarily of a 4.0-horsepower electric motor coupled to a dynamometer, a frequency inverter, a 140 mm diameter closed-loop radial centrifugal pump, an orifice plate, a globe valve, a 3,600 liter tank, 2 "diameter settling duct and 4" diameter suction duct. The orifice plate was measured and then run thirty runs at three different rotations. A reduction of approximately 40% in the energy required for the studied conditions was obtained by controlling the flow of water by the rotation of the pump rotor in relation to the control of a globe valve, in addition to a more precise flow control volumetric. The investment in energy efficiency through the frequency inverter is lower compared to the cost of electricity consumed over the life of the machine.

Keywords: Centrifugal pump. Rotation. Complete similarity. Frequency inverter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Bomba centrífuga acoplada ao motor elétrico.....4
Figura 2 - Equação da energia de uma máquina de fluxo.....5
Figura 3 – Curva característica de instalação (CCI).....7
Figura 4 - Classificação de motores elétricos CA.....8
Figura 5 - Classificação de motores elétricos CC.....8
Figura 6 - Custo da energia elétrica 9
Figura 7 - Produtores de energia hidrelétrica 10
Figura 8 - Placa de orifício na tubulação em corte. 13
Figura 9 - Tipos de orifícios. 14
Figura 10 - CCI com controle da vazão por válvula.....17
Figura 11 - CCI operando com inversor de frequência.....18
Figura 12 - Módulo de ensaios. 20
Figura 13 – Bomba – Motor – Inversor (I.F.) – Tanque – Coluna “U”. 21
Figura 14 – Placa de orifício.....21
Figura 15 – Manômetro coluna de tubo em U. 22
Figura 16 – Bomba centrífuga do laboratório da Unisanta. 22
Figura 17 – Válvula tipo globo reta sem guia. 23
Figura 18 – Painel com inversor de frequência (I.F.).....23
Figura 19 – Tacômetro digital.....24
Figura 20 - Manômetro coluna de tubo em “U”.....24
Figura 21 - Tanque para medição da vazão real.....25
Figura 22 – Curva de calibração e o polinômio da placa de orifício. 27
Figura 23 - Pontos para tomada de pressão da bomba. 27
Figura 24 - Curvas das bombas nas rotações de 1300, 1500 e 1700 rpm.....32
Figura 25 - Cruzamento da CCI com as bombas B1, B2 e B3. 34
Figura 26 - Comparação entre os métodos de redução de vazão.....35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das bombas em função da rotação específica. 4
Tabela 2 - Constante k, para potência de saída e conjugado. 10
Tabela 3 – Distâncias da montante e jusante da placa. 15
Tabela 4 - Dados da calibração da placa de orifício 26
Tabela 5 - Ensaios e rotações. 28
Tabela 6 - Bomba de referência - B1. 30
Tabela 7 - Dados experimentais e teóricos 31
Tabela 8 - Dados obtidos experimentalmente para a bomba B_1 31
Tabela 9 - Bombas obtidas por ensaio e por semelhança. 32
Tabela 10 - Pontos da CCI. 33
Tabela 11 - Potências que as bombas entregam ao fluido. 34
Tabela 12 - Redução de potência para o caso particular estudado. 35

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

CA	corrente alternada
CC	corrente contínua
CCB	curva característica da bomba
CCI	curva característica da instalação
D	diâmetro (m)
g	aceleração da gravidade (m/s^2)
G	peso (N)
H_B	altura manométrica total (m)
N_B	potência da bomba (W)
Q	vazão da bomba (m^3/h)
Re	número de Reynolds (adimensional)
T	temperatura (ºC)
t	tempo (s)
Tamb	temperatura ambiente (ºC)
v	velocidade do fluido (m/s)
V	volume (m^3)
α e β	constantes (adimensionais)
ηb	rendimento da bomba (adimensional)
μ	viscosidade dinâmica ($N.s/m^2$)
ρ	massa específica (kg/m^3)
ABESCO	Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia
ABNT-ISO-5167-1	Medição de vazão de fluidos por dispositivos de pressão diferencial
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FIRJAN	Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro
NBR 7094	Máquinas elétricas girantes
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
NR-10	norma regulamentadora 10 - segurança em instalações e serviços em eletricidade.
Procel	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
SI	Sistema Internacional de Medidas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1
1.1 Generalidades 1
1.2 Objetivo 2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 3
2.1 Classificação das máquinas hidráulicas 3
2.2 Rotação específica 3
2.3 Bomba centrífuga radial 4
2.4 Curvas Características da Bomba – CCB 5
2.5 Curva Característica da Instalação 6
2.6 Motor elétrico 7
2.7 Inversor de frequência (I.F.) 11
2.8 Placa de orifício 13
2.9 Semelhança aplicada ao fenômeno físico bomba centrífuga. 15
2.10 Relação entre as curvas características da instalação e da bomba. 17
3 MATERIAIS E MÉTODOS 20
3.1 Módulo de ensaio. 20
3.2 Levantamento da curva de calibração da placa de orifício 25
3.3 Cálculo da altura manométrica da bomba. 27
3.4 Ensaios para obtenção da variação da altura manométrica da bomba em função da vazão. 28
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 30
4.1 Dados dos ensaios com 1500 rpm – bomba de referencia (B1). 30
4.2 Dados dos ensaios com 1300 rpm. 30
4.3 Dados dos ensaios com 1700 rpm. 31
4.4 Curvas da bomba dos ensaios. 31
5 CONCLUSÃO 37
5.1 Trabalhos futuros 37
REFERÊNCIAS 38
APÊNDICE A - Tabelas dos 30 ensaios das rotações 1.300 – 1.500 – 1.700. 40
APÊNDICE B – Curvas da bomba Imbil para 1.750 rpm – INI 65-160. 50

1 INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

O armazenamento e o transporte de fluidos apresentam-se como uma das mais importantes operações e está presente em quase todos os processos da engenharia. Para o transporte de fluidos há, na maioria dos casos, a necessidade de utilização de uma máquina de fluxo para o fornecimento de energia visando atender necessidades de projeto.

Presente nas mais diversas áreas de aplicação, as máquinas de fluxo hidráulicas (máquinas geratrizes ou bombas) são importantes na distribuição de água em redes de cidades e na movimentação de fluidos em indústrias químicas, petroquímicas, siderúrgicas, em edifícios residenciais e comerciais para o abastecimento de água para consumo ou combate a incêndios, dentre outras aplicações (MACINTYRE, 1997).

As bombas transformam a energia mecânica que é fornecida através de uma máquina, como por exemplo, um motor elétrico, em energia hidráulica (energia cinética, energia potencial e energia de pressão), e essa energia hidráulica é entregue ao fluído.

O estudo do uso racional de energia elétrica é fundamental para o desenvolvimento das indústrias e apresenta-se como um gargalo para o desenvolvimento de algumas áreas, sendo fator limitante para o crescimento de alguns ramos da indústria, onde há grande dependência de energia elétrica. Segundo a ABESCO (associação brasileira das empresas de serviços de conservação de energia) quase 40% da energia produzida no Brasil é consumida no setor industrial. A otimização para minimizar o uso da energia elétrica é um fator importante para o menor custo operacional das instalações industriais.

Há muitos processos em que há a necessidade de controlar a demanda de água e por consequência variar a vazão, que pode ser feita com o uso de uma válvula reguladora ou com a variação da rotação no eixo da bomba. No primeiro caso, o fechamento de uma válvula produz um aumento na perda de carga e alteração na curva característica da instalação. No segundo caso, a variação de rotação modifica a curva característica da bomba, consumindo uma quantidade

menor de energia hidráulica que é dependente da quantidade de fluido que passa pelo rotor por unidade de tempo.

Em instalações de recalque, os inversores de frequência são utilizados para o controle da vazão através da mudança da rotação no rotor, além de auxiliar na partida por minimizar e em muitos casos eliminar os transientes de pressão conhecidos como golpes de aríete (FRANCHI, 2009). Esta redução na rotação do rotor produz uma redução da vazão fornecida pela bomba. Analogamente, o aumento da frequência produz um incremento na rotação e consequente um acréscimo na vazão.

Através de relações produzidas pela teoria matemática de semelhança aplicada às bombas centrífugas é possível prever tais variações de vazão, altura manométrica e consequentemente de potência entregue ao fluido (FOX, 2004).

1.2 Objetivo

Este trabalho teve como objetivo principal estudar a variação de vazão pela alteração de rotação em uma bomba centrífuga radial com o uso de um inversor de frequência, comparando com a redução de vazão por meio de um controle através de uma válvula reguladora do tipo globo.

O objetivo secundário do presente estudo foi montar e adequar um modulo para ensaio em uma bomba centrífuga radial com medições de vazão e altura manométrica na bomba. Também comparar as curvas teóricas determinadas pela teoria de semelhança com as curvas determinadas experimentalmente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Classificação das máquinas hidráulicas

As máquinas de fluxo hidráulicas podem ser motrizes, mistas ou geratrizes. As máquinas motrizes retiram energia do fluido e transformam em energia mecânica. As máquinas geratrizes recebem energia mecânica e transformam em energia hidráulica enquanto que as máquinas mistas alteram o estado da energia presente no fluido. (MATTOS e FALCO, 1998).

Segundo Macintyre (1997), as máquinas motrizes são denominadas turbinas e podem ser de ação (tipo Pelton) que trabalham por impacto direto ou de reação (tipo Francis, Propeller, Kaplan e Dériaz), que dependem de um efeito hidrodinâmico pela passagem do fluido por um perfil hidrodinâmico do rotor.

As máquinas mistas podem transformar um tipo de energia hidráulica em outras formas, com destaque para os ejetores que são utilizados para impulsionar o fluido em sucção de bombas, o carneiro hidráulico que é utilizado para o bombeamento a partir de um transiente de pressão, dentre outros (MACINTYRE, 1997).

As máquinas hidráulicas geratrizes são denominadas bombas e podem ser de deslocamento positivo ou não positivo. As bombas de deslocamento positivo ou volumétricas são utilizadas quando há a necessidade de se obter alta pressão. As bombas de deslocamento não positivo, ou turbobombas, são mais adequadas a fluídos poucos viscosos e baixa pressão de descarga (SOUZA, 2011).

2.2 Rotação específica

A rotação específica (n_q) define o tipo de bomba que será dimensionada em função do valor determinado pela rotação específica na Equação 1:

$$n_q = n\frac{Q^{0,5}}{H_B^{0,75}} \quad (1)$$

Em que:

n_q é a rotação específica;

n é a rotação no eixo da bomba;

Q é a vazão;

H_B é a altura manométrica na bomba.

As turbobombas são encontradas em vários tipos e a diferença entre elas é determinada essencialmente pela forma com que o rotor cede energia ao fluido, e também pela orientação deste ao sair rotor. São classificadas em: bombas centrífugas (puras ou radiais e tipo Francis), bombas de fluxo misto e bombas periféricas ou regenerativas, bombas de fluxo axial (SOUZA, 2011).

Tem-se na Tabela 1 as faixas para classificação do tipo de bomba em função da rotação específica.

Tabela 1 - Classificação das bombas em função da rotação específica.

N_q (rpm)	Tipo de bomba
< 10	Engrenagem, palheta, pistão
10 a 40	Centrífuga radial
35 a 85	Centrífuga helicoidal
80 a 150	Centrífuga diagonal
125 a 500	Axial

Fonte: SANTOS, 2007.

2.3 Bomba centrífuga radial

A bomba centrífuga radial é uma turbo máquina que transporta um fluido de um ponto para outro pela força centrífuga do giro de um rotor e a energia é cedida ao fluido como energia cinética e de pressão. Estes tipos de bombas são utilizadas em edifícios, na indústria, na lavoura, no saneamento e em outros processos.

A energia do motor é transferida ao eixo por um ou mais rotores ou impulsores, que giram dentro de uma voluta. Apresenta-se na Figura 1 uma bomba centrífuga acoplada a um motor elétrico.

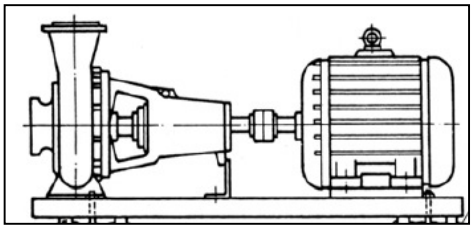


Figura 1 - Bomba centrífuga acoplada ao motor elétrico.
Fonte: Catálogo KSB.

No exemplo apresentado, a energia cedida ao fluido ocorre sob a forma de diferença de pressão entre a entrada e a saída da máquina. Esta energia será responsável por vencer todas as cargas definidas no projeto, e sua denominação é altura manométrica total (H_B) e se refere como energia por unidade de massa (SOUZA, 2011).

Outros parâmetros importantes são a vazão definida na fase inicial do projeto, o rendimento da bomba e o NPSH requerido, definidos pelo fabricante através de ensaios em laboratório.

2.4 Curvas Características da Bomba – CCB

Em termos tecnológicos as curvas características da bomba são determinadas pelo fabricante da bomba, após realização de ensaios.

A Equação 2 (SOUZA, 2011), apresenta a aplicação da equação de Bernoulli entre a entrada e a saída da bomba, conforme Figura 2, considerando fluido incompressível e regime permanente, fornecendo a altura manométrica.

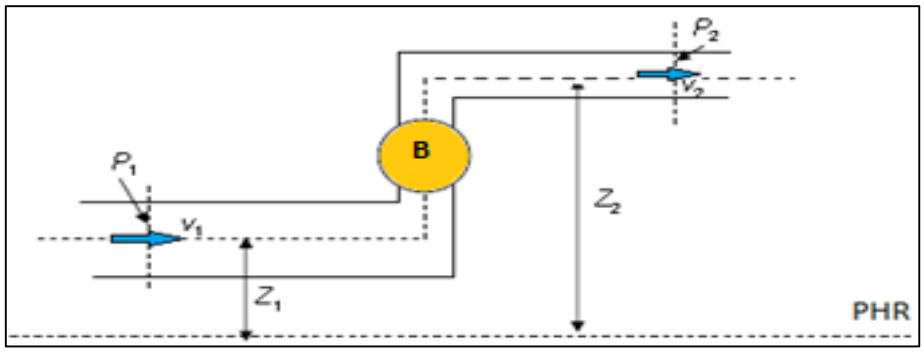


Figura 2 - Equação da energia de uma máquina de fluxo.

Fluido ideal (μ=0)

$$H_e + H_B = H_s + HP_{1,2} \Rightarrow \frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + H_B = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 \quad (2)$$

Em que:

H_B é a altura manométrica na bomba;

Q é a vazão;

D_{rec} é o diâmetro de recalque;

D_{suc} é o diâmetro de sucção;

P_s é a pressão de saída;

P_e é a pressão de entrada;

Z_s é a cota de saída;

Z_e é a cota de entrada.

Para o cálculo da potência utiliza-se a Equação 3:

$$N = \gamma . Q . H_B \quad (3)$$

Sendo,

N a potência entregue ao fluido;

γ o peso específico do fluido;

Q a vazão;

H_B a altura manométrica.

O rendimento da bomba (η_B) é determinado pelo quociente entre a potência entregue ao fluido e a potência que o motor elétrico transmite ao eixo da bomba, apresentado na Equação 4 (BRUNETTI, 2008 e FOX, 2004).

$$n_B = \frac{N}{N_B} \quad (4)$$

Em que:

n_B é o rendimento da bomba;

N é a potência entregue ao fluido;

N_B é a potência no eixo da bomba.

2.5 Curva Característica da Instalação

A curva característica da instalação (CCI), ou curva do sistema, determina a necessidade que a instalação geométrica tem de receber energia por unidade de peso, para o fluido escoar em regime permanente a certa vazão volumétrica.

Para a determinação da CCI, deve-se:

a) Utilizar o menor número de conexões possíveis para não aumentar a perda de carga;
b) Se possível evitar bolsas de ar na tubulação;
c) Utilizar válvulas de acordo com a norma ANSI. B 31, posicionadas de maneira a controlar o fluxo, evitar golpes de aríete e facilitar a manutenção.

Aplicando-se a equação do Balanço de Energia Mecânica (BEM), Equações 5 e 6 na instalação:

$$\mathrm{H_o}+\mathrm{H_B}=\mathrm{H_1}+\mathrm{H_{Psuc}}+\mathrm{H_{Prec}}\Rightarrow \tag{5}$$

$$\Rightarrow \frac{{V_0}^2}{2g}+\frac{P_0}{\gamma}+z_0+H_B=\frac{{V_1}^2}{2g}+\frac{P_1}{\gamma}+z_1+\mathrm{H_{Psuc}}+\mathrm{H_{Prec}} \tag{6}$$

O cálculo da perda de carga pode ser feito por meio de equações específicas, com destaque para a equação de Darcy-Weisbach (BRUNETTI, 2008) ou pela equação de Hazen-Williams (MACINTYRE, 1997). Em qualquer equação estará presente à parcela da energia cinética, pois a perda de carga aumenta com a velocidade.

A curva característica da instalação será definida pelo desenvolvimento do cálculo da Equação 7 do Balanço de Energia Mecânica (BEM):

$$\mathrm{H_B}=\mathrm{H_{estático}}+\mathrm{K}\times Q^2 \tag{7}$$

A parcela estática será determinada pelas parcelas de pressão estática específica e de energia potencial. Esta equação produzirá uma curva conforme verificado na Figura 3.

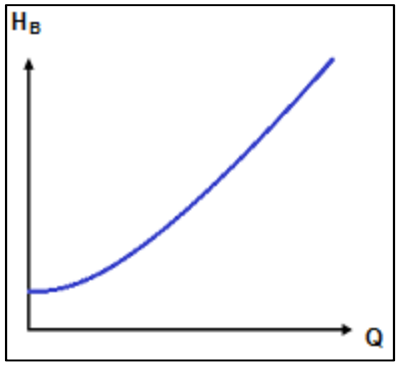


Figura 3 – Curva característica de instalação (CCI)

2.6 Motor elétrico

Motor elétrico é uma máquina que converte energia elétrica em energia mecânica e é amplamente aplicado em quase todas as máquinas ou equipamentos.

As forças magnéticas entre os polos magnéticos do rotor e estator, produzem o movimento circular ou giro do motor. As forças de repulsão e atração entre estes polos geram torques que fazem com que o rotor gire com velocidade angular em função da frequência da rede elétrica.

Tem-se na Figura 4 a classificação dos tipos de motores elétricos de corrente alternada (C.A.).

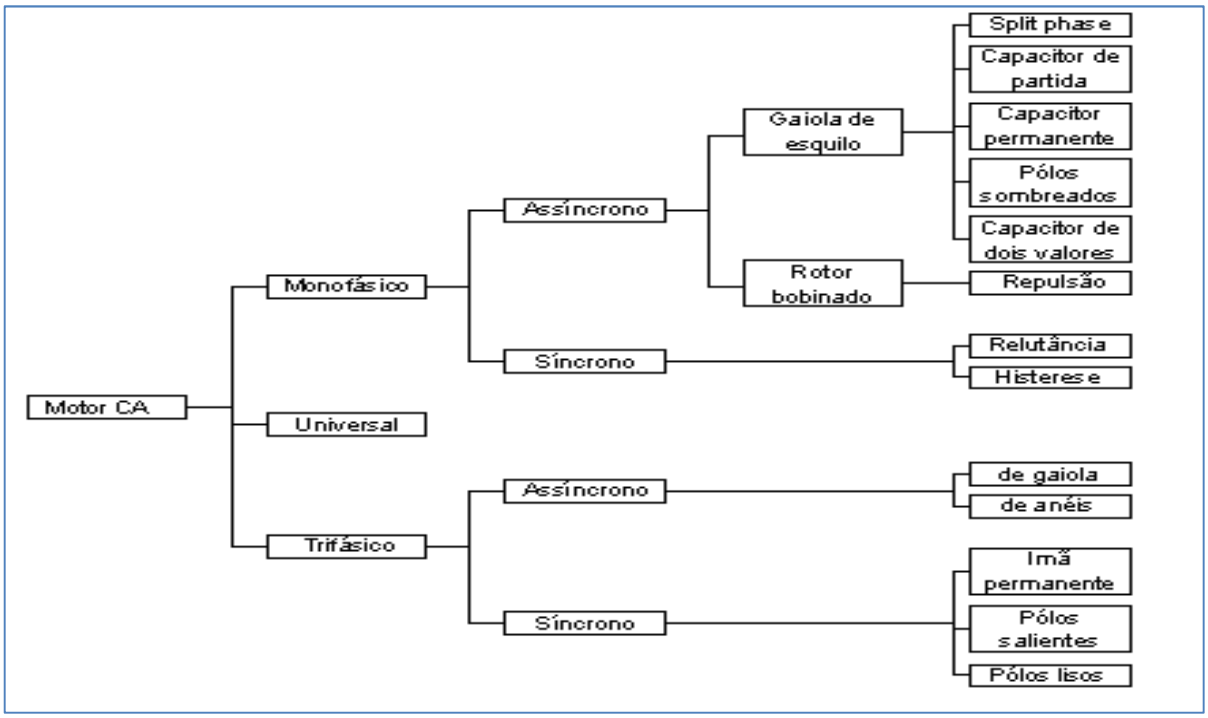


Figura 4 - Classificação de motores elétricos CA.
Fonte: Catálogo WEG.

Na Figura 5 indica a classificação dos motores elétricos de corrente contínua (C.C.).

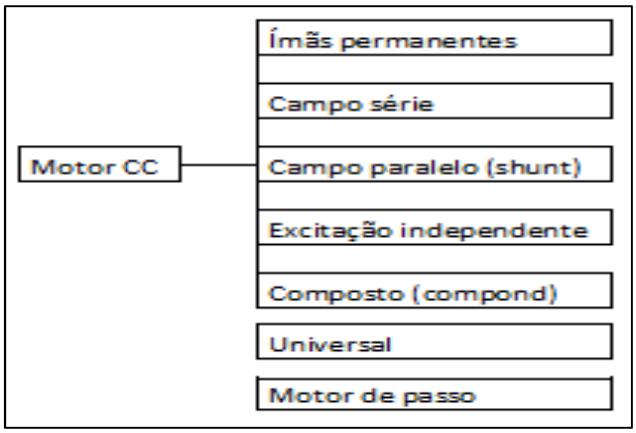


Figura 5 - Classificação de motores elétricos CC.
Fonte: Catálogo WEG.

A fim de uma redução do custo na manutenção e melhora na eficiência, há a tendência de substituir os motores de corrente contínua por trifásico de corrente alternada com acionamento por inversor de frequência, onde ocorre o controle da rotação.

Dentre os tipos de motores, o assíncrono possui melhor eficiência energética motriz, dentre todos outros tipos de motores.

No Brasil, a procura por melhor eficiência energética (relação entre a parcela de energia utilizada em uma atividade e aquela cedida para sua realização) e fontes de energias alternativas (energia solar, eólica, biomassa, etanol, biodisel, maremotriz, geotérmica, e outras), é ainda mais impulsionada devido ao alto custo da energia elétrica, que cresceu a taxas muito superiores às do PIB e da inflação. Segundo o estudo do Procel (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica) de 2015, o Brasil tem o maior custo dos países industrializados, enquanto a média internacional é de R$ 257,50/MWh, no Brasil o custo fica em R$ 534,28/MWh (Figura 6), apesar de sermos o segundo maior produtor de energia hidrelétrica, demostrado na Figura 7.

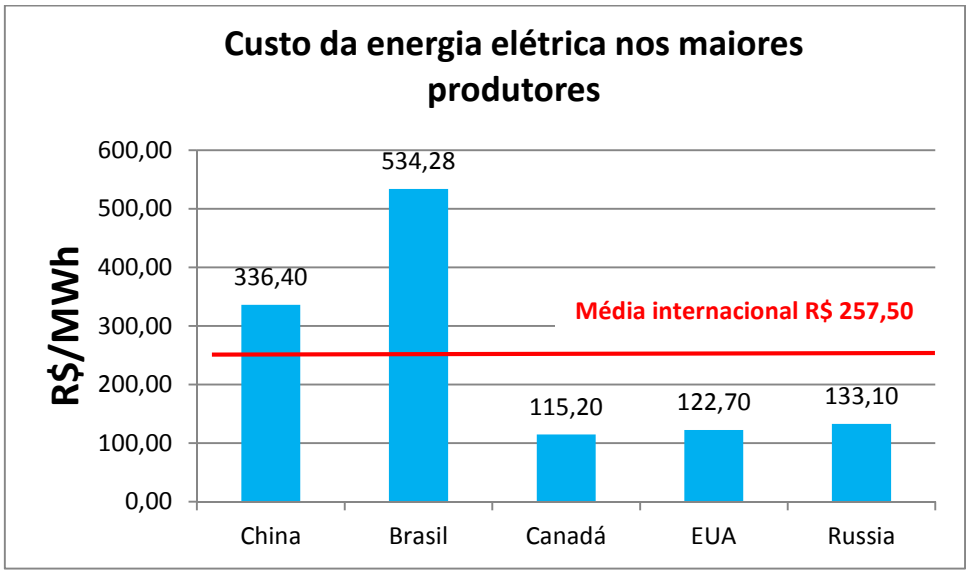


Figura 6 - Custo da energia elétrica
Fonte: Procel 2015

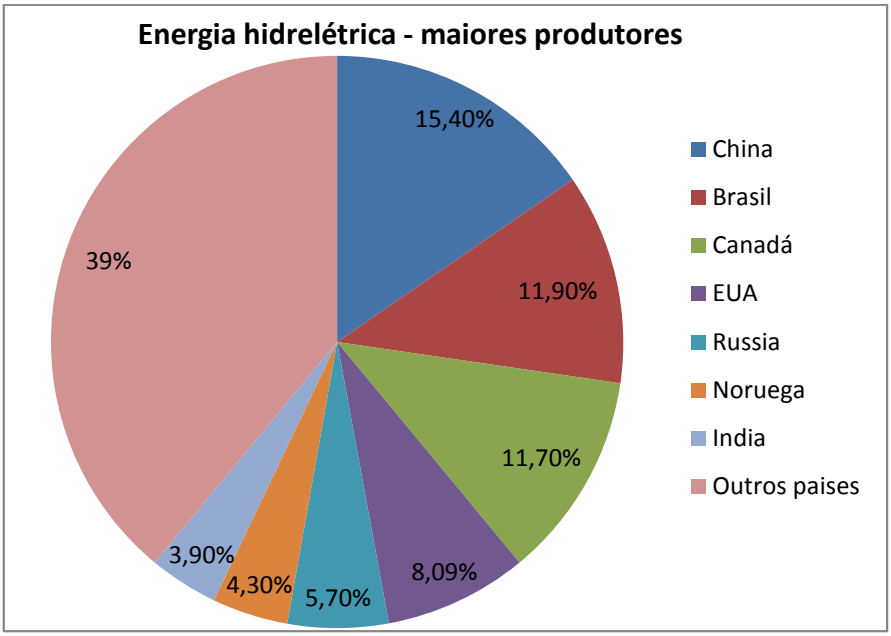


Figura 7 - Produtores de energia hidrelétrica
Fonte: Procel 2015

Há dois grupos de motores CA, o assíncrono e o síncrono que são determinados pelo sincronismo ou não da frequência da tensão. Potência nominal ou potência mecânica é aquela que é disponibilizada na ponta do eixo quando este tem uma carga acoplada.

A norma NBR 7094 - Máquinas elétricas girantes – motores de indução – especificação, informa que a potência nominal é expressa em Watts (W). A Equação 8 da potência nominal é o produto do conjugado (C) ou torque, pela rotação (n), relacionada com uma constante (k) na Tabela 2:

$$P_s = \frac{C.n}{K} \qquad (8)$$

Em que:

Ps é a potência mecânica de saída;
C é o conjugado ou torque;
n é a rotação do eixo do motor.
k é a constante de equivalência.

Tabela 2 - Constante k, para potência de saída e conjugado.

Potência	Torque	Valor da Constante (k)
cv	N.m	7023
kW	N.m	9542

Fonte: Procel, 1990.

A Lei da Eficiência Energética n° 10295 de 17 de outubro de 2001, aprimora os instrumentos para melhora da eficiência energética. Segundo estimativas, o motor elétrico trifásico pode utilizar cerca de 32 % da energia elétrica no Brasil e por esse motivo foi o primeiro equipamento regulamentado por esta lei (GARCIA, 2003).

2.7 Inversor de frequência (I.F.)

O inversor de frequência é um equipamento eletrônico capaz de controlar a rotação dos motores elétricos e podem ser utilizados em vários equipamentos, como por exemplo, correias transportadoras, elevadores de caçamba, bombas centrífugas, compressores, ventiladores, agitadores, extrusoras, elevadores dentre outros.

O inversor de frequência, como o nome já indica, varia a frequência e transforma a energia elétrica CA fixa (tensão e frequência) em energia elétrica CA variável, controlando a potência consumida pela carga.

Dentre as vantagens em utilizar o inversor de frequência, pode-se citar: eliminação dos componentes de partida e dos variadores mecânicos, automatização e comunicação do processo, aumento de vida útil das máquinas e economia de energia elétrica, rampa de aceleração e desaceleração suave.

Há dois tipos de inversores de frequência, o escalar e o vetorial. O que os diferencia basicamente é a curva do torque em função da rotação. O inversor vetorial é indicado para torque regulável, controle preciso de velocidade e torque elevado com baixa rotação. Já o inversor escalar é mais indicado para partidas suaves, operação com reversões e operação acima da velocidade nominal do motor, porém não é indicado para altos torques em baixas rotações, (MASCHERONI, LICHTBLAU e GERARDI, 2006).

Em bombas centrífugas os inversores de frequência auxiliam na partida sem que ocorram os transientes de pressão, denominados golpes de aríete por aumentarem a rotação gradualmente e por consequência a vazão e assim evitando os picos de energia cinética na partida que podem produzir altos valores de energia de pressão. A vazão depende da rotação no rotor da bomba. Ao se reduzir a vazão pela rotação, haverá uma queda significativa do valor da pressão de saída da bomba e consequente redução da potência a ser entregue ao fluido.

Instalação hidráulica pode conter válvulas e sua escolha e quantidade deve ser alvo de estudos, para resultarem em menor perda de carga possível. A válvula

de controle de vazão que pode ser do tipo globo, diafragma ou agulha provoca grande perda de carga e deve ser instalada com muito critério.

Instalações hidráulicas de bombeamento são utilizadas geralmente em transporte de líquidos. Os equipamentos antigos foram superdimensionados e na grande maioria não operam na sua totalidade. O controle de vazão com operação por válvula é prejudicial à instalação e desperdiça energia elétrica. O custo da energia elétrica é oneroso e impacta no meio ambiente (Rodrigues, 2007).

Os equipamentos são classificados segundo a NR-10 de acordo com o nível de tensão trabalhada, sendo:

Baixa Tensão - BT: carga instalada igual ou inferior a 75 kW;

Média Tensão - MT: carga instalada de 75 kW a 2500 kW;

Alta Tensão - AT: contratado superior a 2500 kW.

Algumas vantagens e desvantagens com o uso do inversor de frequência (FRANCHI, 2009):

Vantagens:

a) Diminui o gasto de energia elétrica com a utilização do inversor de frequência para regular a rotação do motor elétrico, em relação às outras maneiras de realizar a mesma função, por exemplo, como polias e variadores mecânicos.
b) Com a configuração de uma rampa de aceleração gradual e suave no inversor consegue-se evitar a partida repentina e trepidações, que podem avariar peças da máquina, como por exemplo, engrenagens e correias.
c) Com menos trepidações na máquina ou no processo, consequentemente aumenta-se a vida útil do equipamento.
d) Instalação e operação relativamente simples

Desvantagens:

a) É necessária a aplicação de um conversor de potência além de técnicos especializados que torna o custo inicial alto.
b) O processo de conversão de potência e emissão de interferências eletromagnéticas introduz distorções harmônicas da tensão.
c) O eixo do motor elétrico está acoplado à ventoinha (que é responsável pela ventilação do motor) e com a diminuição da rotação, ocorre aumento da temperatura, podendo provocar a queda na vida útil do motor.

d) O inversor de frequência ao contrário do motor, requerer sua instalação em ambientes menos agressivos, devido aos componentes eletrônicos.

2.8 Placa de orifício

A placa de orifício é um instrumento resistente, rudimentar e de baixo custo para medição de vazão.

Os instrumentos do tipo orifício para medição de vazão através de pressão diferencial representam cerca de 80% dos instrumentos de medição de vazão nas indústrias. Podem-se citar alguns inconvenientes como a perda de carga e a baixa rangeabilidade (3:1) 3 para 1, por exemplo, para uma vazão máxima de 30 m³/h a vazão mínima será de 10 m³/h (DELMEE, 1999).

O projeto de fabricação, dimensionamento e informações da engenharia de aplicação de uma placa de orifício, são fundamentados na norma ABNT ISO 5167-1.

Placa de orifício da Figura 8 e outros medidores de vazão mássica ou volumétrica atuam através da pressão diferencial que é relacionada com a vazão através da Equação 9:

$$Q = K.\sqrt{\Delta P} \tag{9}$$

Em que:

Q é a vazão em volume;

K é o parâmetro próprio do elemento deprimogênio;

ΔP é a diferença de pressão causada pela placa.

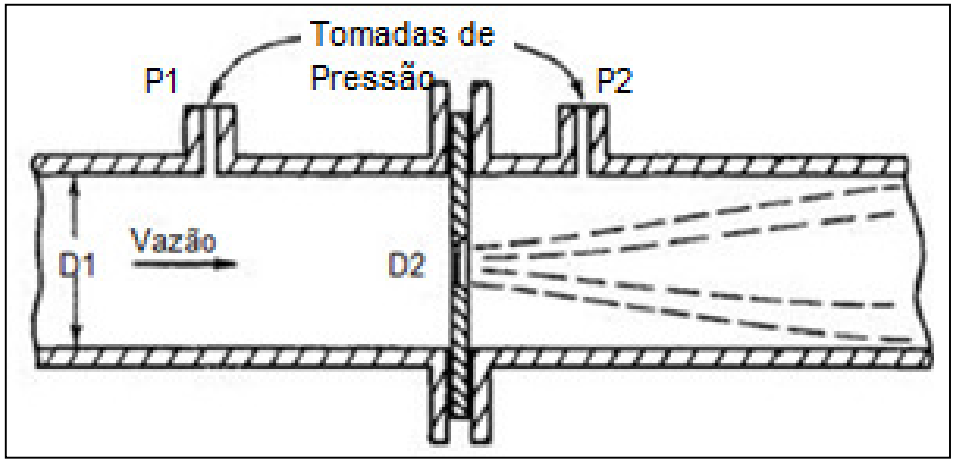


Figura 8 - Placa de orifício na tubulação em corte.
Fonte: DELMÉE, 1999.

Usualmente o diâmetro da placa de orifício equivale a 25% ou ¼ do diâmetro do tubo e esta relação (Equação 10) mostra que o fluído terá dificuldade ao passar pela placa e consequentemente produção de perda de carga.

$$\beta = \frac{d_{orifício}}{D_{tubo}} = \frac{1}{4} \quad (10)$$

Em que:

β é a razão entre o diâmetro do orifício e o diâmetro do tubo;

$d_{orifício}$ é o diâmetro do orifício;

D_{tubo} é o diâmetro do tubo.

A restrição na tubulação obriga o fluxo a aumentar a velocidade, ocasionando um diferencial de pressão. A maioria das placas tem um furo concêntrico, porém em alguns processos que contenham impurezas que podem acumular a montante da placa, são utilizados orifícios excêntricos ou segmentais demonstrado na Figura 9.

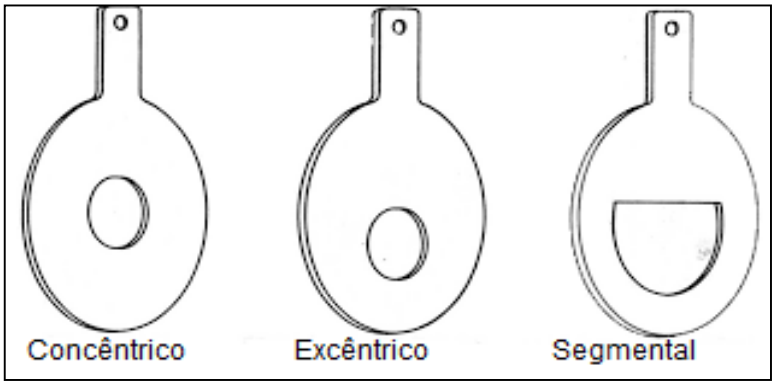


Figura 9 - Tipos de orifícios.
Fonte: DELMÉE, 1999.

Segundo Delmée (1999):

a) Placa de orifício concêntrico: para líquidos, gases e vapores que não contenham sólidos em suspensão;
b) Placa de orifício excêntrico: para fluidos com sólidos em suspensão;
c) Placa de orifício segmental: para fluidos laminados e com alta porcentagem de sólidos em suspensão.

Alguns cuidados devem ser tomados para a instalação da placa de orifício, visto que peças inseridas na tubulação acarretam turbulências no fluxo e atuam no perfil de velocidades, essas peças devem ser instaladas afastadas da placa de

acordo com as seguintes distâncias a montante e a jusante da placa dados pela Tabela 3:

Tabela 3 – Distâncias da montante e jusante da placa.

Peça	Montante	Jusante
Única mudança de direção (curva, T, Y)	17 D	4,5D
Duas mudanças de direção (duas curvas)	22 D	
Redução ou ampliação	13,5 D	
Válvula (exceto gaveta 100% aberta)	44 D	

Fonte: DELMÉE, 1999.

No projeto da placa de orifício se define o range de medição, cuja precisão está torno de 0,5% a 4,0%.

Benedict (1984) apresenta que o estreitamento nas linhas de corrente de um fluido após uma redução súbita da largura do canal de escoamento, que foi descrito por Torricelli em 1673, é denominado de "vena contracta". Essa contração da seção provoca um aumento da carga cinética, resultando numa diminuição da carga de pressão. Consequentemente $v_2 > v_1$, produzindo $P_1 > P_2$, atestando o aumento da carga cinética e resultando numa redução da carga de pressão.

A instalação correta das tomadas para medição da pressão diferencial tem grande influência na precisão da medição de vazão. A norma ABNT NBR 5167 de dezembro de 1994, especifica a geometria e o método de utilização (instalação e condições de operação) de placas de orifício, bocais e tubos de Venturi.

Outro parâmetro importante é apresentado da Equação 11 e determina o coeficiente de descarga que relaciona a razão entre os resultados teóricos e reais:

$$\mathrm{Cd} = \frac{\mathrm{Q_{real}}}{\mathrm{Q_{ideal}}} \tag{11}$$

Em que:

C_d é o coeficiente de descarga;

Q_{real} é a vazão real;

Q_{ideal} é a vazão ideal.

2.9 Semelhança aplicada ao fenômeno físico bomba centrífuga.

A teoria matemática denominada semelhança permite a produção de equações que relacionam as variáveis envolvidas no fenômeno físico estudado.

Com estas equações torna-se possível o estudo de modificações no projeto e suas consequências sobre as variáveis envolvidas (SANTOS, 2007).

Para o equipamento bomba centrífuga, tem-se como base a densidade, diâmetro do rotor e a rotação que são as variáveis que poderão ser alteradas. As demais são: viscosidade dinâmica, vazão, altura manométrica e potência.

Ainda em Santos, 2007, para o escoamento no interior do fenômeno físico bomba centrífuga a variável viscosidade, definida pelo adimensional de Reynolds, não tem importância por ocorrer uma grande supremacia das forças de massa sobre as forças viscosas.

Aplicando o teorema Pi de Buckingham, são encontradas as Equações 12 a 15 (BRUNETTI, 2008):

Número de Reynolds:

$$R_e = \frac{\rho . v . D}{\mu} \quad (12)$$

Em que:
R_e é o número de Reynolds;
ρ é a massa específica do fluido;
v é a velocidade média do fluido;
D é o diâmetro do rotor da bomba;
μ é a viscosidade dinâmica.

Coeficiente de vazão

$$\emptyset = \frac{Q}{n . D^3} \quad (13)$$

Em que:
Ø é o coeficiente de vazão;
Q é a vazão em volume;
n é a rotação da bomba;
D é o diâmetro do rotor da bomba.

Coeficiente manométrico

$$\Psi = \frac{g \, x \, H_b}{n^2 x D_r^2} \quad (14)$$

Em que:
Ψ é o coeficiente manométrico;
g é a aceleração da gravidade;
Hb é a altura manométrica;

n é a rotação da bomba;
D_r é o diâmetro do rotor da bomba.

Coeficiente de potência

$$x = \frac{N_B}{\rho \times n^3 \times D^5} \quad (15)$$

Em que:
x é o coeficiente de potência;
N_B é a potência da bomba;
ρ é a massa específica;
n é a rotação;
D é o diâmetro do rotor da bomba.

Para o presente trabalho serão importantes as equações que definem o coeficiente de vazão e manométrico.

2.10 Relação entre as curvas características da instalação e da bomba.

A operação de redução da vazão através do uso de válvula reguladora acarreta o deslocamento progressivo do ponto de operação, que é a intersecção da curva característica da bomba (CCB), com a curva característica de instalação (CCI), provocado pelo aumento da perda de carga. Com esta operação, encontramos o ponto desejado para uma determinada vazão (Figura 10), com a bomba operando com rotação constante (SANTOS, 2007).

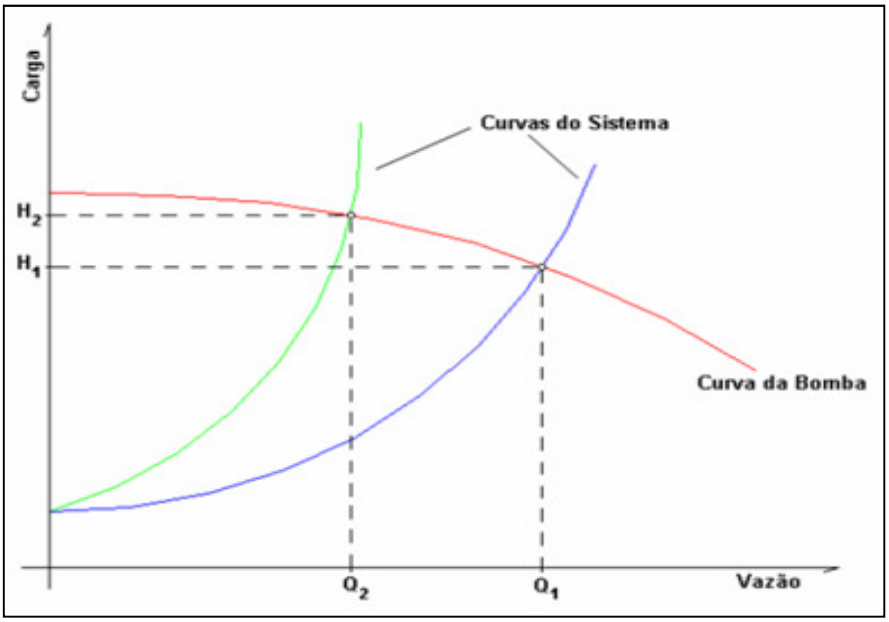


Figura 10 - CCI com controle da vazão por válvula.
Fonte: SANTOS, 2007.

Neste modelo de controle operacional da vazão com válvula de controle, além da perda de carga ocasionada pela válvula, também ocorre um acréscimo da carga a montante da válvula. O consumo de energia elétrica ou potência utilizada na bomba é diretamente proporcional à carga e a vazão.

Oposto ao controle por válvula, utilizando-se o inversor de frequência para controlar a rotação do conjunto moto bomba e consequentemente a vazão volumétrica, somente a curva da bomba é alterada e consegue se a curva da instalação constante demonstrado na Figura 11. Lembrando que desta forma a energia consumida é proporcional à rotação do motor.

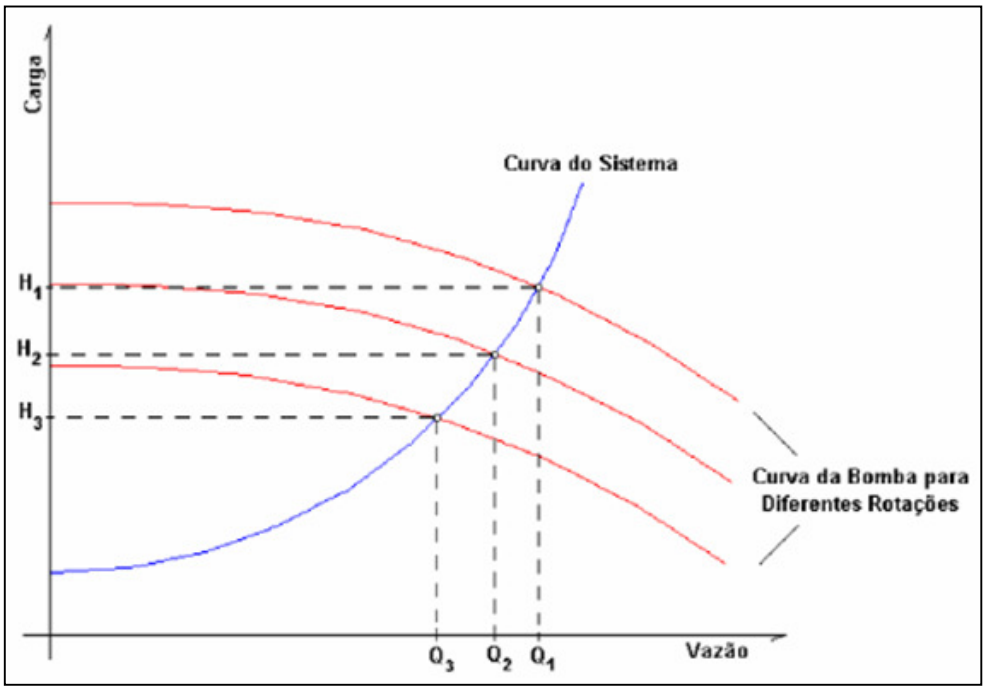


Figura 11 - CCI operando com inversor de frequência.
Fonte: GAMBICA, 2.007.

Dentre as vantagens de sistemas dotados de inversores pode-se apontar a economia de energia elétrica, onde as leis de semelhança mostram a vazão diretamente proporcional à rotação e a altura manométrica diretamente proporcional ao quadrado da rotação. Sendo que para um menor valor de vazão recalcada tem-se uma potência consumida menor.

O controle de rotação implicará no conjunto uma carga muito menor, conforme evidenciado na Figura 11, para cada valor de vazão corresponderá um valor de carga que será menor em função da redução de rotação, se comparado com o sistema convencional de controle de vazão da Figura 10.

Importante sempre verificar os torques envolvidos, pois o inversor deve preservá-lo constante mesmo quando a rotação é reduzida, conservando uma relação entre tensão e frequência constante. O torque no motor é proporcional a esta relação. Sendo que ao se reduzir a frequência, o inversor reduz a tensão no motor, conservando assim esta relação constante.

Deve-se citar também, outra informação relevante sobre o inversor que é empregado normalmente para reduzir a rotação em relação à nominal e raramente para eleva-la.

Trabalhos a partir de média tensão podem inviabilizar economicamente a implantação de inversores de frequência.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a parte experimental deste trabalho foi necessária à adequação do módulo de ensaios do Laboratório de Mecânica dos Fluidos da Universidade Santa Cecília para a obtenção de parâmetros de projeto e dados para cálculo e determinação das curvas características da bomba em três rotações diferentes.

3.1 Módulo de ensaio.

Apresenta-se na Figura 12 um esboço do módulo de ensaio utilizado.

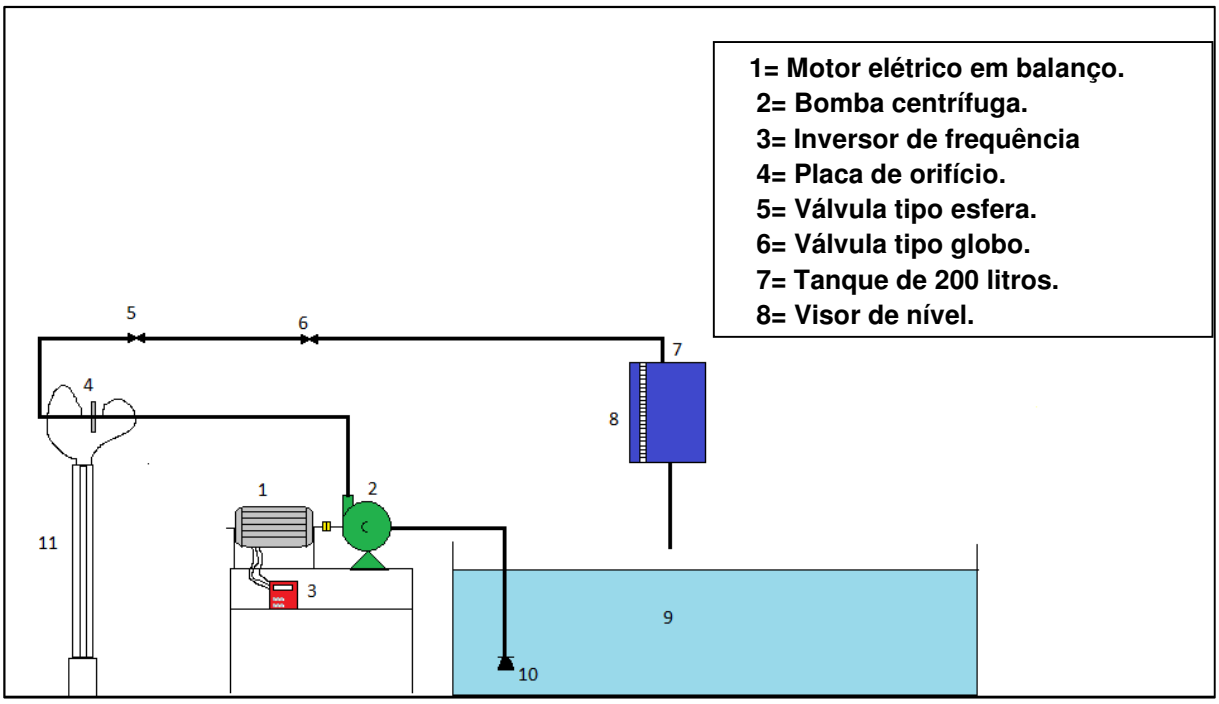


Figura 12 - Módulo de ensaios.

O equipamento operou com água a temperatura ambiente e em circuito fechado, sendo que o laboratório é climatizado e apresentou temperatura ambiente em torno de 20º C durante os ensaios. A pressão barométrica manteve-se na faixa de 752 mm Hg.

O conjunto da bomba centrífuga com o motor elétrico em balanço e com o inversor de frequência no acionamento pode ser observado na Figura 13.

Figura 13 – Bomba – Motor – Inversor (I.F.) – Tanque – Coluna “U”.

A medição de vazão foi feita por meio de uma placa de orifício marca F.Master, modelo FE02, para conduto de 2” com redução de seção de 52,5 mm para 38,95 mm. A placa foi confeccionada em aço inox com classe de pressão de 300 lb.

Apresenta-se na Figura 14 a placa de orifício montada no equipamento.

Figura 14 – Placa de orifício.

A diferença de pressão produzida pela passagem do fluido pela placa foi medida através do manômetro coluna de tubo em U (Figura 15), com mercúrio metálico como fluido manométrico.

Figura 15 – Manômetro coluna de tubo em U.

Na medição de vazão volumétrica foi elaborada uma curva experimental para a relação entre a altura na coluna de mercúrio no tubo em U e a vazão.

Empregou-se uma bomba da marca Imbil, modelo INI 65-160 (rotor fechado com 140 mm, Figura 16) e um motor elétrico em balanço marca WEG - potência 4,0 cv – 1.730 rpm.

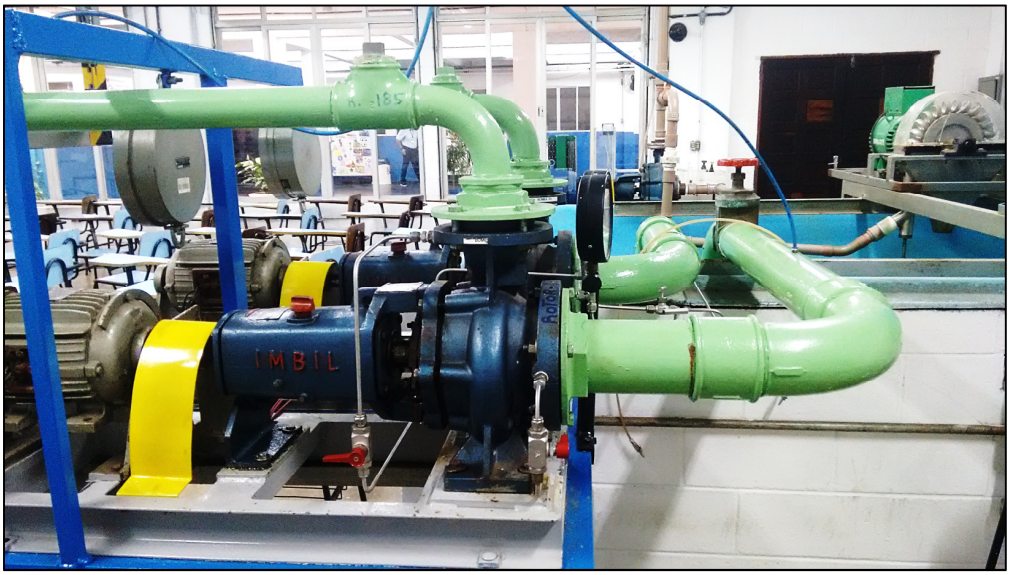


Figura 16 – Bomba centrífuga do laboratório da Unisanta.

O dispositivo utilizado para a variação da vazão e consequente obtenção dos diversos pontos da curva da bomba foi uma válvula reguladora do tipo globo, modelo reta sem guia, apresentada na Figura 17.

Figura 17 – Válvula tipo globo reta sem guia.

O equipamento mostrado na Figura 18 que foi utilizado para a mudança de rotação e elaboração dos ensaios, é um inversor de frequência marca Weg modelo CFW 09 Vectrue Inverter. O equipamento foi montado em um painel com botoeiras para acionamento.

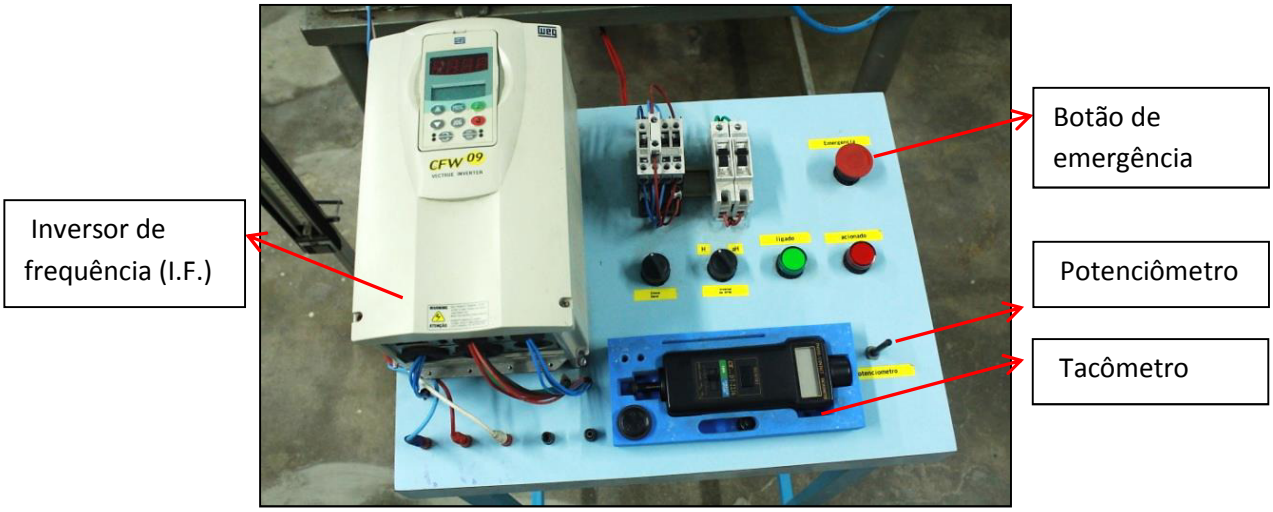


Figura 18 – Painel com inversor de frequência (I.F.).

Em função da importância da rotação no resultado das curvas, optou-se por realizar uma segunda medição de rotação que foi efetuada por meio de um tacômetro Lutron Dt2236 / icel Tc-5500 Digital (Figura 19).

Figura 19 – Tacômetro digital.

A medição da diferença de pressão entre a entrada e a saída da bomba, foi realizada utilizando o manômetro coluna de tubo em “U” da Figura 20 com mercúrio metálico como fluido manométrico.

Figura 20 - Manômetro coluna de tubo em “U”.

3.2 Levantamento da curva de calibração da placa de orifício.

Na medição da vazão por meio de uma placa de orifício foi necessário o levantamento da curva de calibração através de ensaios. Foram realizadas medições de vazão associadas a uma variação de coluna de mercúrio em um tubo em U.

A fim de determinar a vazão volumétrica real (Equação16), foi fixado o volume no tanque de 200 litros (Figura 21) e utilizando um cronometro, foi medido o tempo que a bomba levou para obter este volume.

$$Q = \frac{A_{tanque} \times \Delta h}{\Delta t} \qquad (16)$$

Sendo:
A_{tanque} a área do tanque;
Δh a altura do nível do fluido;
Δt o tempo de funcionamento da bomba.

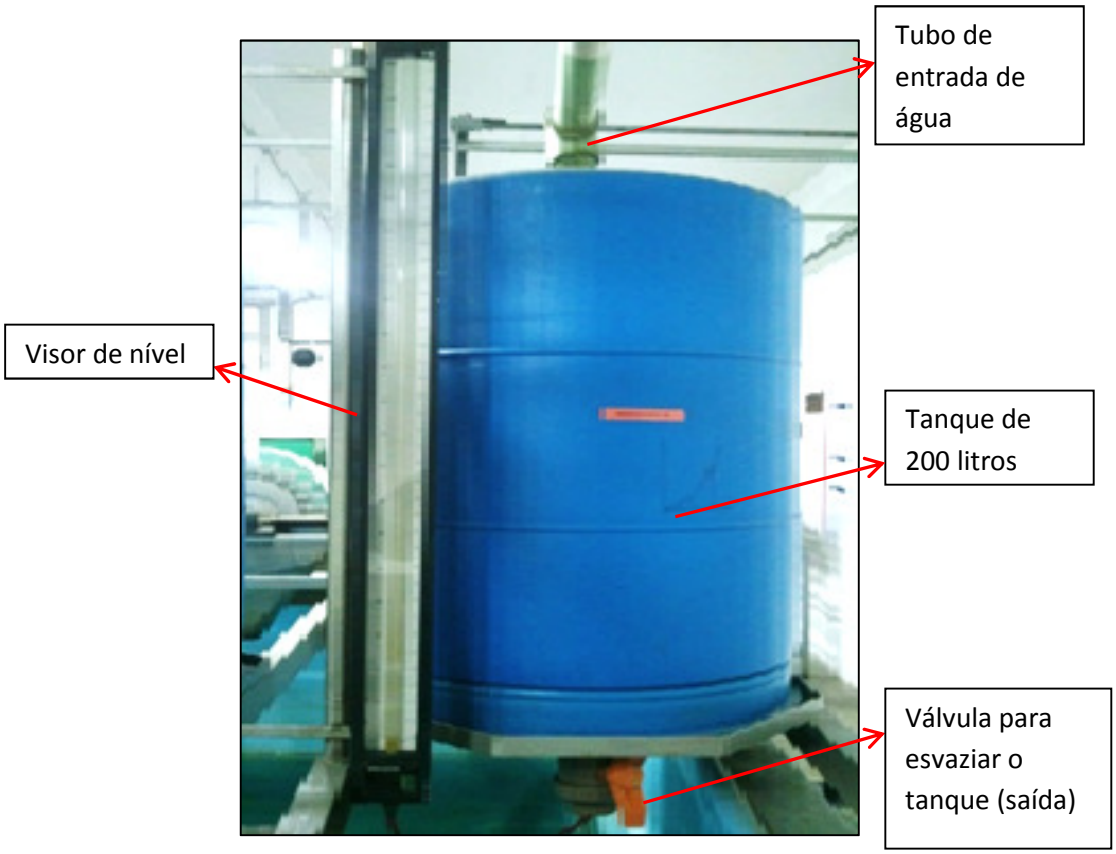


Figura 21 - Tanque para medição da vazão real.

Tem-se na Tabela 04 os dados para determinar a vazão real, sendo medidos os tempos para encher um tanque com capacidade máxima de 200 litros com o acompanhamento da variação do nível um tubo transparente externo (visor de nível - Figura 21).

Tabela 4 - Dados da calibração da placa de orifício

Δh(mm) Tubo U – Placa	Q(m^3/s) x 10^{-3} Medida no tanque
0	0
20	1,232
40	2,42
54	2,974
70	3,476
80	3,828
82	3,96
94	4,268
98	4,356
100	4,373
104	4,426
110	4,549
112	4,628

Com os dados obteve-se a curva de calibração e o polinômio que representa a variação da vazão real em função da variação da coluna de mercúrio no tubo em U instalado na placa de orifício. Na Figura 22 pode-se observar a curva de calibração e o polinômio da placa de orifício.

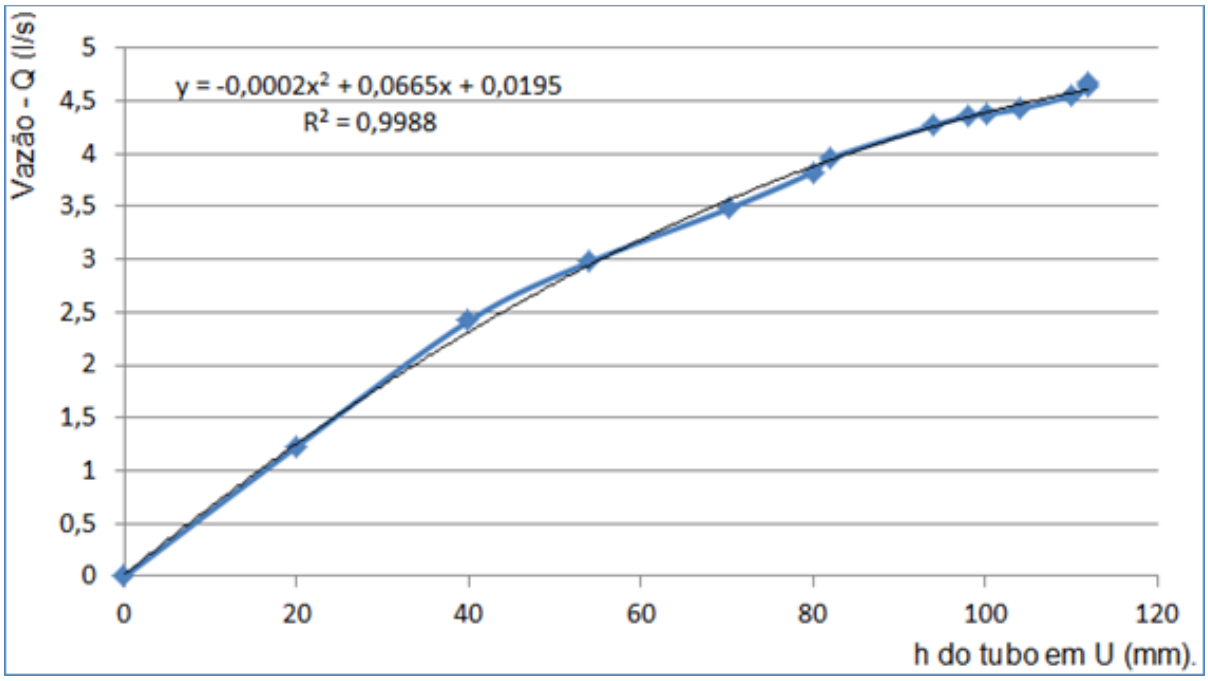


Figura 22 – Curva de calibração e o polinômio da placa de orifício.

3.3 Cálculo da altura manométrica da bomba.

A altura manométrica da bomba foi determinada aplicando-se a equação do balanço de energia mecânica para fluido incompressível em regime permanente entre a entrada e a saída da bomba. A perda de carga produzida pelos efeitos viscosos foi considerada no rendimento da bomba, visto que a leitura da pressão na saída da bomba é determinada durante as medições e representam toda a energia útil que a bomba fornece a fluido. Os pontos para tomada de pressão estão na Figura 23.

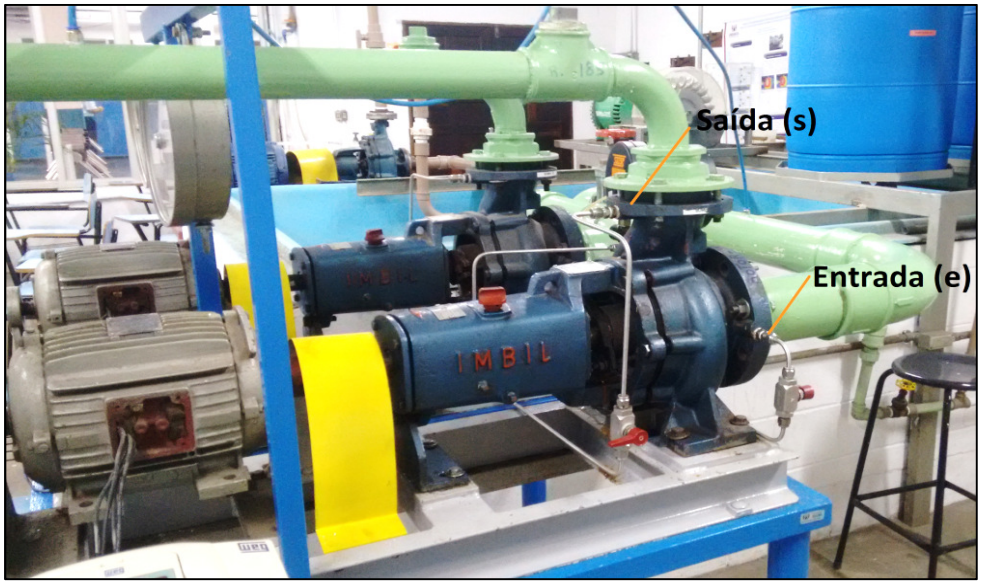


Figura 23 - Pontos para tomada de pressão da bomba.

Obs.: foram feitas outras tomadas mais distantes de acordo com a norma ANSI B31, porém não surtiram efeitos nas medições de pressão de entrada e saída da bomba.

Tem-se na Equação 17 os parâmetros de Bernoulli.

$$H_e + H_B = H_s + HP_{1,2} => \frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + H_B = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 \quad (17)$$

A variação de energia cinética e de energia potencial de posição são energias necessárias em função da geometria e só ocorrem em função da variação de diâmetro e de cota. A energia útil entregue ao fluido (Equação 18) foi dada pela diferença de pressão.

$$HB = \left[\frac{Ps - Pe}{\gamma_{água}}\right] \quad (18)$$

3.4 Ensaios para obtenção da variação da altura manométrica da bomba em função da vazão.

Foram realizados 10 ensaios em cada rotação (1300, 1500 e 1700 rpm) e em cada rotação, variou-se a vazão através da válvula globo, conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Ensaios e rotações.

Número de ensaios	Bomba	Levantamento da curva característica da bomba em três rotações diferentes
10	B_1	n = 1500 rpm (bomba de referência)
10	B_2	n = 1300 rpm (redução de vazão)
10	B_3	n = 1700 rpm (aumento de vazão)

A relação de semelhança define uma base dada por:

a) Densidade (não altera a vazão nem a altura manométrica da bomba, interferindo apenas na potência) em sistema isotérmico.
b) Mudança de diâmetro de rotor (não efetuada no presente trabalho).
c) Mudança na rotação (alvo deste trabalho).

Inicialmente foi ensaiada uma bomba de referência B_1 a 1500 rpm e depois foram feitas as seguintes verificações:

a) Redução de rotação:

Foram obtidos os valores experimentais a 1300 rpm e comparado com os valores teóricos obtidos a partir da relação de semelhança para uma variação na rotação e com as outras bases (densidade e diâmetro de rotor) mantidas constantes (Equações 19 e 20):

Com o coeficiente de vazão obteve-se a relação:

$$\emptyset_1 = \emptyset_2 \Rightarrow \frac{Q_1}{n_1 \times Dr_1^3} = \frac{Q_2}{n_2 \times Dr_2^3} \Rightarrow Q_2 = Q_1 \frac{1300rpm}{1500rpm} \Rightarrow Q_2 = 0{,}867 \times Q_1 \quad (19)$$

Foi criada para o coeficiente manométrico a relação:

$$\varphi_1 = \varphi_2 \Rightarrow \frac{g \times H_{B1}}{n_1^2 \times Dr_1^2} = \frac{g \times H_{B2}}{n_2^2 \times Dr_2^2} \Rightarrow H_{B2} = H_{B1} \left(\frac{1300rpm}{1500rpm}\right)^2 \Rightarrow H_{B2} = 0{,}751 \times H_{B1} \quad (20)$$

b) Aumento de rotação:

Foram obtidos os valores experimentais a 1700 rpm e comparado com os valores teóricos determinados a partir da relação de semelhança para uma variação na rotação e com as outras bases (densidade e diâmetro de rotor) mantidas constantes (Equações 21 e 22):

$$\emptyset_1 = \emptyset_2 \Rightarrow \frac{Q_1}{n_1 \times Dr_1^3} = \frac{Q_2}{n_2 \times Dr_2^3} \Rightarrow Q_2 = Q_1 \frac{1700rpm}{1500rpm} \Rightarrow Q_2 = 1{,}133 \times Q_1 \quad (21)$$

$$\varphi_1 = \varphi_2 \Rightarrow \frac{g \times H_{B1}}{n_1^2 \times Dr_1^2} = \frac{g \times H_{B2}}{n_2^2 \times Dr_2^2} \Rightarrow H_{B2} = H_{B1} \left(\frac{1700rpm}{1500rpm}\right)^2 \Rightarrow H_{B2} = 1{,}284 \times H_{B1} \quad (22)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios realizados na unidade piloto geraram os seguintes resultados.

4.1 Dados dos ensaios com 1500 rpm – bomba de referencia (B1).

Na Tabela 6 têm-se os dados obtidos experimentalmente para a bomba B1 que foi utilizada como referência – rotação de 1500 rpm.

Tabela 6 – Dados obtidos experimentalmente para a bomba B1

h (tubo U)	Q_{placa}	$h_{tubo\ Bomba}$	HB
[mm]	[l/s]	(mm)	(m)
0	0,0195	600	7,56
10	0,7045	600	7,56
20	1,4295	600	7,56
30	2,1945	600	7,56
40	2,9995	600	7,56
50	3,8445	600	7,56
60	4,7295	600	7,56
70	5,6545	600	7,56
80	6,6195	600	7,56
90	7,6245	600	7,56
100	8,6695	600	7,56
110	9,7545	600	7,56

4.2 Dados dos ensaios com 1300 rpm.

Apresenta-se na Tabela 7 os dados obtidos experimentalmente para a bomba B_1 que foi empregada para a avaliação da redução da rotação de 1300 rpm.

Tabela 7 - Dados obtidos experimentalmente para a bomba B2

h (tubo U)	Q_{bomba}	h_{tubo} Bomba	HB
[mm]	[l/s]	(mm)	(m)
0	0,0195	490	6,17
10	0,7045	490	6,17
20	1,4295	490	6,17
30	2,1945	490	6,17
40	2,9995	492	6,19
50	3,8445	490	6,17
60	4,7295	490	6,17
70	5,6545	490	6,17
80	6,6195	490	6,17
90	7,6245	490	6,17
100	8,6695	490	6,17
110	9,7545	490	6,17

4.3 Dados dos ensaios com 1700 rpm.

Os dados obtidos experimentalmente para a bomba B1 que foi utilizada para a avaliação do aumento da rotação de 1700 rpm podem ser vistos na Tabela 8.

Tabela 8 - Dados obtidos experimentalmente para a bomba B3

h (tubo U)	Q_{placa}	h_{tubo} Bomba	HB
[mm]	[l/s]	(mm)	(m)
0	0,0195	800	10,08
10	0,7045	800	10,08
20	1,4295	800	10,08
30	2,1945	800	10,08
40	2,9995	800	10,08
50	3,8445	800	10,08
60	4,7295	800	10,08
70	5,6545	800	10,08
80	6,6195	800	10,08
90	7,6245	800	10,08
100	8,6695	800	10,08
110	9,7545	800	10,08

4.4 Curvas da bomba dos ensaios.

Com a utilização da bomba centrífuga do módulo de ensaios, foram determinadas experimentalmente três curvas. A primeira curva apresenta a altura manométrica da bomba em função da vazão para uma rotação de 1500 rpm. Esta

bomba passa a ser a referência para obtenção de bombas experimentais e teóricas com rotações de 1300 rpm e 1700 rpm.

Os dados empíricos e teóricos determinados por meio de ensaio e por relações teóricas de semelhança, estão disponibilizados na Tabela 9.

Tabela 9 - Bombas obtidas por ensaio e por semelhança.

Bombas obtidas experimentalmente						Bombas por semelhança			
1300 rpm (B2exp)		1500 rpm (B1exp)		1700 rpm (B3exp)		1300 rpm (B2teo)		1700 rpm (B3teo)	
Q l/s	H (m)	Q l/s	H (m)	Q l/s	H (m)	Q l/s	H (m)	Q l/s	H (m)
0,0195	6,174	0,0195	7,56	0,0195	10,08	0,017	5,679	0,022	9,70
0,7045	6,174	0,7045	7,56	0,7045	10,08	0,611	5,679	0,798	9,70
1,4295	6,174	1,4295	7,56	1,4295	10,08	1,239	5,679	1,620	9,70
2,1945	6,174	2,1945	7,56	2,1945	10,08	1,902	5,679	2,486	9,70
2,9995	6,19	2,9995	7,56	2,9995	10,08	2,600	5,679	3,398	9,70
3,8445	6,174	3,8445	7,56	3,8445	10,08	3,332	5,679	4,356	9,70
4,7295	6,174	4,7295	7,56	4,7295	10,08	4,099	5,679	5,359	9,70
5,6545	6,174	5,6545	7,56	5,6545	10,08	4,901	5,679	6,407	9,70
6,6195	6,174	6,6195	7,56	6,6195	10,08	5,737	5,679	7,500	9,70
7,6245	6,174	7,6245	7,56	7,6245	10,08	6,608	5,679	8,639	9,70
8,6695	6,174	8,6695	7,56	8,6695	10,08	7,514	5,679	9,823	9,70
9,7545	6,174	9,7545	7,56	9,7545	10,08	8,454	5,679	11,052	9,70

Graficamente, têm-se as três bombas (B1, B2 e B3) na Figura 24:

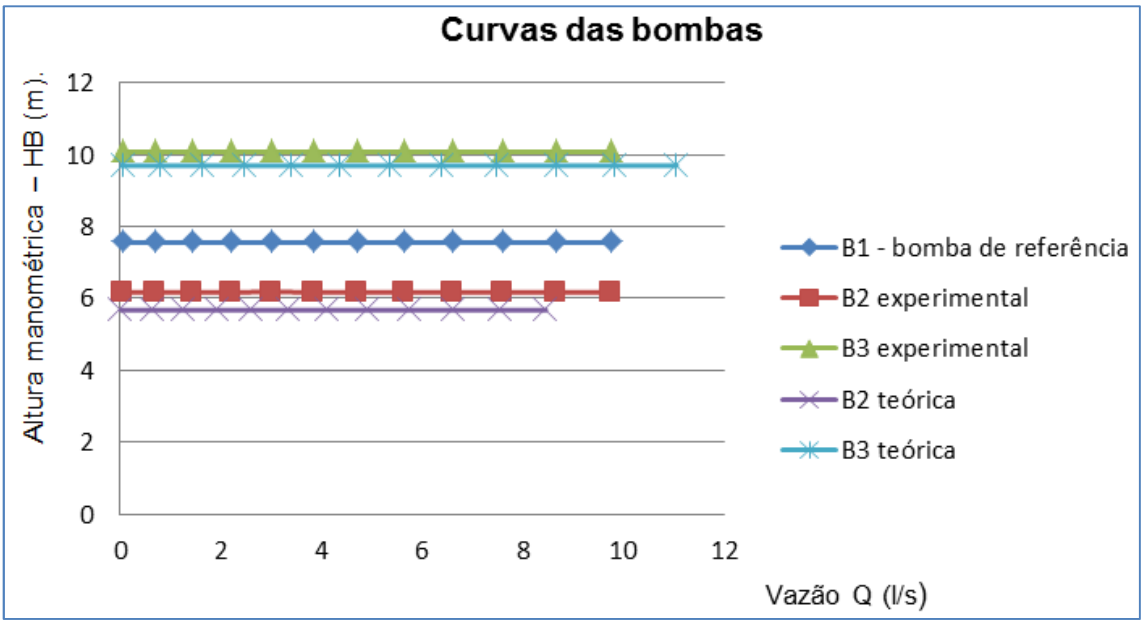


Figura 24 - Curvas das bombas nas rotações de 1300, 1500 e 1700 rpm.

Conforme Moraes (2017), as curvas apresentadas na Figura 24 mostram uma diferença entre as curvas experimentais e as curvas teóricas obtidas a partir de B1 (bomba de referência – 1.500 rpm) e determinadas pelas relações de afinidades obtidas pelas relações teóricas do Teorema Pi de Buckingham.

A curva característica da instalação (CCI) é particular de cada projeto e não é objeto de estudo no presente trabalho.

Uma curva com características semelhantes do tipo $H_B=H_{est}+KQ^2$, foi colocada sobre as bombas para possibilitar as comparações de resultados da variação de potência.

Para o estudo da viabilidade do uso de inversores de frequência adotou-se uma curva característica da instalação (CCI) dada pelos pontos apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Pontos da CCI.

Q_CCI [m^3/h]	HB_CCI (m)
0,0195	1,000
0,7045	1,055
1,4295	1,225
2,1945	1,530
2,9995	1,990
3,8445	2,626
4,7295	3,460
5,6545	4,517
6,6195	5,820
6,861	6,178
7,6245	7,395
7,717	7,551
8,668	9,265
9,085	10,079
9,755	11,468

Ponto de funcionamento CCI x CCB2

Ponto de funcionamento CCI x CCB1

Ponto de funcionamento CCI x CCB3

Os pontos de funcionamento das bombas B1(bomba referencia 1.500 rpm), B2(1.300 rpm) e B3(1.700 rpm) com a CCI estão apresentados na Figura 25.

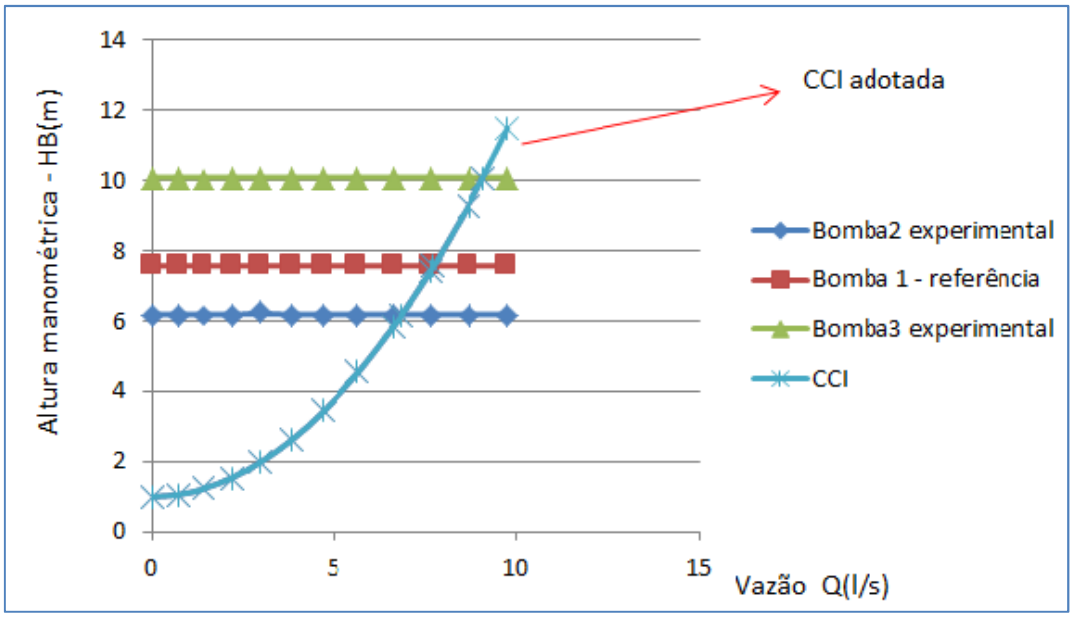


Figura 25 - Cruzamento da CCI com as bombas B1, B2 e B3.

Estes pontos de funcionamento com suas respectivas potências que a bomba entrega ao fluido estão apresentados na Tabela 11, considerando peso específico da água igual a 9.810 N/m^3 (1.000 kgf/m^3).

Tabela 11 - Potências que as bombas entregam ao fluido.

Pontos de funcionamento	CCI x CCB1	CCI x CCB2	CCI x CCB3
Vazão (l/s)	7,717	6,861	9,085
Altura manométrica (m)	7,551	6,178	10,079
Potência entregue ao fluido (cv)	0,78	0,56	1,22

Na comparação da redução da vazão pela redução da rotação no eixo da bomba com a mesma redução feita por uma válvula reguladora de vazão do tipo globo, é verificada na Figura 26.

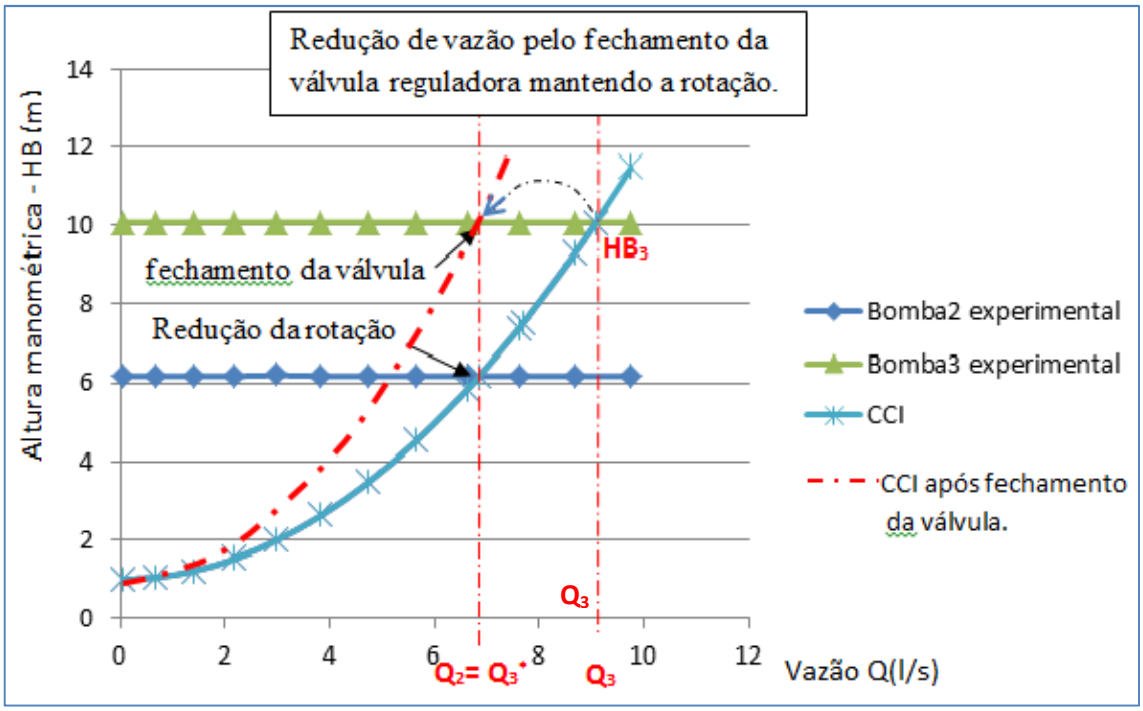


Figura 26 - Comparação entre os métodos de redução de vazão.

Na Tabela 12 está apresentada a redução de potência para o caso particular estudado.

Tabela 12 - Redução de potência para o caso particular estudado.

Pontos de funcionamento	Redução pela válvula	Redução pela rotação	
Vazão (l/s)	6,861	6,861	
Altura manométrica (m)	10,079	6,178	Redução de potência (%)
Potência entregue ao fluido (cv)	0,92	0,56	39,13 %

Conforme previsto na teoria, os resultados mostram um aumento de vazão e de altura manométrica com o aumento de rotação e consequente redução destes parâmetros com a redução da vazão. A variação da potência em uma instalação de recalque depende da curva característica da instalação e pode ser determinada empiricamente.

Todos os ensaios estão apresentados no apêndice A, sendo que as curvas utilizadas foram determinadas a partir da curva média dos ensaios que mantiveram valores próximos. No apêndice B, têm-se as curvas originais do fabricante da bomba.

Foram utilizados valores de potência entregue ao fluido para não serem necessários os levantamentos de rendimento mecânico e consequente cálculo de potência no eixo.

A curva do fabricante não serve de parâmetro, pois a bomba utilizada teve o diâmetro do rotor alterado e assim a curva de referência foi determinada experimentalmente.

5 CONCLUSÃO

1. A operação de controle de vazão através da variação de rotação do conjunto moto bomba efetuado nos ensaios do Laboratório de Mecânica dos Fluidos da Universidade Santa Cecília, comprovou a **economia de energia elétrica de 39,13 %,** além de um controle mais preciso da vazão em relação à operação convencional de controle de vazão por válvula reguladora tipo globo. A redução no consumo de energia elétrica ativa na operação do sistema não foi testada, mas sim na redução da potência que a máquina transferiu ao fluido através do rotor.
2. O investimento na eficiência energética através do inversor de frequência é bem menor se comparado ao custo da energia elétrica consumida durante a vida útil de uma máquina ou equipamento.
3. Apesar de o Brasil estar investindo em energias renováveis como, por exemplo, biomassa, eólica, geotérmica, solar, oceânica e fusão nuclear, ainda há um campo enorme de aplicações em equipamentos e instalações na indústria, comercio e residência, para implementar medidas de eficiência energética para diminuir o gasto com energia elétrica, como foi o caso estudado e desenvolvido nas experiências aqui relatadas.

5.1 Trabalhos futuros

Como proposta para trabalhos futuros recomenda-se:

a) Estudar a potência no eixo do motor como consequência de uma quantificação na variação do rendimento da bomba.
b) Variar a rotação e o diâmetro de rotor visando verificar se há a manutenção dos parâmetros estabelecidos nas relações teóricas de semelhança.
c) Montar um módulo para o estudo de bombas de deslocamento positivo.

REFERÊNCIAS

BENEDICT, R. P., Fundamental of Temperature, Pressure and Flow Measurement, 3 ed.,Wiley,1984.

BRUNETTI, F., Mecânica dos fluidos, Pearson Prentice Hall, 2.ed. rev, 2008.

DELMEE, G. J., Manual de medição de vazão, Edgard Blücher, 2 edição, 1999.

FRANCHI, C. M., Inversores de Frequência: Teoria e Aplicações – 2.ed – São Paulo: Érica,2009.

FOX, R.W., McDonald, A.T. and Pritchard, P.J.; "Introdução à Mecânica dos Fluidos", LTC, 6a ed. 2004.

FRANÇOIS M.; AL K. J.; KAMAL E. Power conversion optimization for hydraulic systems controlled by variable speed drives. Journal of Process Control. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959152417302044 Acesso em 20 de jan. de 2018.

GARCIA, A. G. P. - Impacto da Lei de Eficiência Energética para Motores Elétricos no Potencial de Conservação de Energia na Indústria. 2003. 127 p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Rio de Janeiro, 2003.

MATTOS, E. E. de e FALCO, R. de, Bombas Industriais, Editora Interciência, 2ª. Edição, 1998.

MACINTYRE, A. J., Bombas e Instalações de Bombeamento, LTC Editora, 2ª. Edição revisada, 1997.

MASCHERONI, José M.. LICHTBLAU, Marcos e GERARDI, Denise. Guia de Aplicação de Inversores de Frequência. Weg Automação, 2ª Edição, 2006.

MORAES Jr., D., Moraes, M.S., Laboratório de Operações Unitárias I, 2ª. Ed.2017.

NASIR K. Efficient Energy Management: Is Variable Frequency Drives the Solution. Procedia - Social and Behavioral Sciences. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042814039044 Acesso em: 13 de out. de 2017.

PROCEL; CEMIG; ELETROBRÁS. Avaliação do desempenho dos motores elétricos trifásicos. Belo Horizonte, 1990.

RODRIGUES, WLAMIR. "Critérios para o Uso Eficiente de Inversores de Freqüência em Sistemas de Bombeamento de Água". Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2.007. 208 p. Tese (Doutorado).

SANTOS, S. L. dos, Bombas e Instalações Hidráulicas, LTCE Editora, 2007.

SIGHIERI, L., Nishinari, A. Controle Automático de Processos Industriais - 2ª Edição, 1973, 248 pp.

SOUZA, Z. de, Projeto de máquinas de fluxo: bombas hidráulicas com rotores radiais e axiais, Interciência, 2011.

APÊNDICE A - Tabelas dos 30 ensaios das rotações 1.300 – 1.500 – 1.700.

Ensaio: 01	n = 1300rpm	Data: 06/06/2017

Ponto	$h_{PLACA\ DE\ ORIFÍCIO}$ (mm)	$h_{PS\text{-}PE\ (BOMBA)}$ (mm)	$F_{DINAMÔMETRO}$ (kgf)	Rotação (rpm)
01	0	485	2,60	1309
02	12	487	2,64	1313
03	20	485	2,64	1299
04	26	485	2,68	1299
05	32	486	2,72	1299
06	37	485	2,74	1299
07	38	485	2,74	1299
08	42	485	2,76	1299
09	43	485	2,76	1299
10	43	485	2,76	1299
T = 20ºC	$P_{atmosférica}$ = 752mmHg	Δ Z = 200 mm	Braço → b = 225mm	

Ensaio: 02	n = 1300 rpm	Data: 06/06/2017

Ponto	$h_{PLACA\ DE\ ORIFÍCIO}$ (mm)	$h_{PS\text{-}PE\ (BOMBA)}$ (mm)	$F_{DINAMÔMETRO}$ (kgf)	Rotação (rpm)
01	0	485	2,36	1303
02	10	485	2,48	1303
03	18	485	2,52	1304
04	23	485	2,56	1304
05	28	485	2,60	1303
06	34	485	2,62	1303
07	36	485	2,62	1304
08	38	485	2,63	1304
09	38	485	2,66	1304
10	43	485	2,70	1304
T = 20ºC	$P_{atmosférica}$ = 752mmHg	Δ Z = 200 mm	Braço → b = 225mm	

Ensaio: 03	n = 1300rpm	Data: 06/06/2017

Ponto	$h_{PLACA\ DE\ ORIFÍCIO}$ (mm)	$h_{PS\text{-}PE\ (BOMBA)}$ (mm)	$F_{DINAMÔMETRO}$ (kgf)	Rotação (rpm)
01	0	480	2,44	1303
02	10	480	2,52	1307
03	16	480	2,56	1303
04	26	480	2,56	1299
05	28	480	2,64	1300
06	32	480	2,68	1300
07	34	480	2,70	1299
08	36	480	2,70	1303
09	38	480	2,72	1299
10	42	480	2,72	1299
T = 20ºC	$P_{atmosférica}$ = 752mmHg	Δ Z = 200 mm	Braço → b = 225mm	

Ensaio: 04	n = 1300 rpm	Data: 06/06/17

Ponto	$h_{PLACA\ DE\ ORIFÍCIO}$ (mm)	$h_{PS\text{-}PE\ (BOMBA)}$ (mm)	$F_{DINAMÔMETRO}$ (kgf)	Rotação (rpm)
01	0	480	2,46	1303
02	10	480	2,52	1299
03	14	480	2,56	1301
04	26	480	2,58	1303
05	26	480	2,60	1299
06	28	480	2,60	1299
07	34	480	2,64	1299
08	36	480	2,66	1303
09	40	480	2,70	1303
10	42	480	2,74	1301
T = 20ºC	$P_{atmosférica}$ = 752mmHg	Δ Z = 200 mm	Braço → b = 225mm	

Ensaio: 05	n = 1300rpm	Data: 06/06/17

Ponto	$h_{PLACA\ DE\ ORIFÍCIO}$ (mm)	$h_{PS\text{-}PE\ (BOMBA)}$ (mm)	$F_{DINAMÔMETRO}$ (kgf)	Rotação (rpm)
01	0	480	2,50	1299
02	12	480	2,52	1299
03	14	480	2,54	1299
04	18	480	2,58	1300
05	24	480	2,60	1303
06	26	480	2,64	1303
07	32	480	2,66	1303
08	34	480	2,72	1299
09	38	480	2,74	1299
10	42	480	2,74	1299
T = 20ºC	$P_{atmosférica}$ = 752mmHg	Δ Z = 200 mm	Braço → b = 225mm	

Ensaio: 06	n = 1300rpm	Data: 06/06/17

Ponto	$h_{PLACA\ DE\ ORIFÍCIO}$ (mm)	$h_{PS\text{-}PE\ (BOMBA)}$ (mm)	$F_{DINAMÔMETRO}$ (kgf)	Rotação (rpm)
01	0	480	2,50	1299
02	12	480	2,54	1299
03	14	480	2,54	1303
04	16	480	2,58	1303
05	20	480	2,62	1299
06	24	480	2,64	1299
07	32	480	2,68	1299
08	38	480	2,74	1299
09	40	480	2,74	1303
10	44	480	2,74	1303
T = 20ºC	$P_{atmosférica}$ = 752mmHg	Δ Z = 200 mm	Braço → b = 225mm	

Ensaio: 07	n = 1300rpm	Data: 06/06/17

Ponto	$h_{PLACA\ DE\ ORIFÍCIO}$ (mm)	$h_{PS\text{-}PE\ (BOMBA)}$ (mm)	$F_{DINAMÔMETRO}$ (kgf)	Rotação (rpm)
01	0	480	2,48	1303
02	12	480	2,54	1303
03	18	480	2,58	1303
04	24	480	2,62	1303
05	30	480	2,64	1303
06	35	480	2,68	1303
07	38	480	2,70	1303
08	40	480	2,72	1303
09	42	480	2,74	1299
10	42	480	2,74	1299
T = 20ºC	$P_{atmosférica}$ =752mmHg		Δ Z = 200 mm	Braço → b = 225mm

Ensaio: 08	n = 1300rpm	Data: 06/06/17

Ponto	$h_{PLACA\ DE\ ORIFÍCIO}$ (mm)	$h_{PS\text{-}PE\ (BOMBA)}$ (mm)	$F_{DINAMÔMETRO}$ (kgf)	Rotação (rpm)
01	0	485	2,50	1303
02	10	485	2,52	1299
03	14	480	2,54	1299
04	18	480	2,60	1303
05	28	480	2,64	1303
06	36	480	2,64	1299
07	36	480	2,66	1299
08	38	480	2,70	1303
09	38	480	2,72	1303
10	42	480	2,72	1299
T = 20ºC	$P_{atmosférica}$ = 752mmHg		Δ Z = 200 mm	Braço → b = 225mm

Ensaio: 09	n = 1300rpm	Data: 06/06/17

Ponto	$h_{PLACA\ DE\ ORIFÍCIO}$ (mm)	$h_{PS\text{-}PE\ (BOMBA)}$ (mm)	$F_{DINAMÔMETRO}$ (kgf)	Rotação (rpm)
01	0	480	2,52	1303
02	12	480	2,58	1303
03	18	480	2,58	1303
04	24	480	2,60	1303
05	30	480	2,64	1303
06	36	480	2,68	1303
07	38	480	2,70	1303
08	40	480	2,70	1303
09	42	480	2,74	1303
10	44	480	2,74	1303
T = 20ºC	$P_{atmosférica}$ = 752mmHg		Δ Z = 200 mm	Braço → b = 225mm

Ensaio: 10	n = 1300rpm	Data: 06/06/17

Ponto	$h_{PLACA\ DE\ ORIFÍCIO}$ (mm)	$h_{PS\text{-}PE\ (BOMBA)}$ (mm)	$F_{DINAMÔMETRO}$ (kgf)	Rotação (rpm)
01	0	480	2,44	1299
02	12	480	2,48	1299
03	16	480	2,50	1299
04	22	480	2,54	1303
05	28	480	2,58	1303
06	32	480	2,62	1303
07	34	480	2,62	1299
08	36	480	2,68	1303
09	38	480	2,70	1303
10	42	480	2,70	1299
T = 20ºC	$P_{atmosférica}$ = 752mmHg		Δ Z = 200 mm	Braço → b = 225mm

Ensaio: 01	n = 1500rpm	Data: 30/05/17

Ponto	$h_{PLACA\ DE\ ORIFÍCIO}$ (mm)	$h_{PS\text{-}PE\ (BOMBA)}$ (mm)	$F_{DINAMÔMETRO}$ (kgf)	Rotação (rpm)
01	0	640	3,41	1501
02	13	640	3,41	1501
03	25	640	3,48	1499
04	36	640	3,54	1499
05	46	640	3,60	1496
06	53	640	3,62	1499
07	59	640	3,64	1499
08	62	640	3,70	1498
09	62	640	3,70	1500
10	64	640	3,68	1501
T = 18ºC	$P_{atmosférica}$ = 752mmHg		Δ Z = 200 mm	Braço → b = 225mm

Ensaio: 02	n = 1500rpm	Data: 30/05/17

Ponto	$h_{PLACA\ DE\ ORIFÍCIO}$ (mm)	$h_{PS\text{-}PE\ (BOMBA)}$ (mm)	$F_{DINAMÔMETRO}$ (kgf)	Rotação (rpm)
01	09	640	3,40	1498
02	12	640	3,41	1498
03	24	640	3,50	1501
04	37	640	3,52	1501
05	47	640	3,58	1501
06	52	640	3,62	1499
07	56	640	3,62	1499
08	63	640	3,68	1499
09	63	640	3,68	1500
10	66	640	3,68	1501
T = 18ºC	$P_{atmosférica}$ = 752mmHg		Δ Z = 200 mm	Braço → b = 225mm

Ensaio: 03	n = 1500rpm	Data: 31/05/17

Ponto	$h_{PLACA\ DE\ ORIFÍCIO}$ (mm)	$h_{PS\text{-}PE\ (BOMBA)}$ (mm)	$F_{DINAMÔMETRO}$ (kgf)	Rotação (rpm)
01	10	640	3,40	1500
02	14	640	3,40	1500
03	25	640	3,50	1500
04	35	640	3,54	1498
05	45	643	3,62	1497
06	52	640	3,62	1496
07	57	640	3,64	1495
08	60	642	3,70	1496
09	62	640	3,70	1494
10	65	640	3,70	1495
T = 19ºC	$P_{atmosférica}$ = 752mmHg		Δ Z = 200 mm	Braço → b = 225mm

Ensaio: 4	n = 1500rpm	Data: 31/05/17

Ponto	$h_{PLACA\ DE\ ORIFÍCIO}$ (mm)	$h_{PS\text{-}PE\ (BOMBA)}$ (mm)	$F_{DINAMÔMETRO}$ (kgf)	Rotação (rpm)
01	09	635	3,14	1501
02	15	635	3,22	1499
03	27	640	3,34	1498
04	37	640	3,40	1496
05	46	640	3,50	1497
06	52	640	3,54	1498
07	56	640	3,54	1498
08	60	640	3,60	1498
09	64	640	3,62	1499
10	65	640	3,62	1499
T = 19ºC	$P_{atmosférica}$ = 752mmHg		Δ Z = 200 mm	Braço → b = 225mm

Ensaio: 5	n = 1500rpm	Data: 31/05/17

Ponto	$h_{PLACA\ DE\ ORIFÍCIO}$ (mm)	$h_{PS\text{-}PE\ (BOMBA)}$ (mm)	$F_{DINAMÔMETRO}$ (kgf)	Rotação (rpm)
01	09	635	3,10	1500
02	15	635	3,20	1499
03	28	635	3,34	1498
04	38	635	3,40	1498
05	45	635	3,50	1499
06	52	635	3,52	1495
07	55	635	3,56	1498
08	60	635	3,60	1499
09	63	635	3,62	1499
10	64	635	3,62	1499
T = 19ºC	$P_{atmosférica}$ = 752mmHg		Δ Z = 200 mm	Braço → b = 225mm

Ensaio: 6	n = 1500rpm	Data: 31/05/17

Ponto	$h_{PLACA\ DE\ ORIFÍCIO}$ (mm)	$h_{PS\text{-}PE\ (BOMBA)}$ (mm)	$F_{DINAMÔMETRO}$ (kgf)	Rotação (rpm)
01	10	640	3,20	1501
02	16	640	3,32	1501
03	26	640	3,48	1498
04	65	640	3,48	1499
05	46	640	3,60	1501
06	50	640	3,60	1500
07	54	640	3,62	1500
08	60	640	3,64	1499
09	64	640	3,68	1499
10	64	640	3,68	1499
T = 18ºC	$P_{atmosférica}$ = 752mmHg	Δ Z = 200 mm	Braço → b = 225mm	

Ensaio: 07	n = 1500rpm	Data: 31/05/17

Ponto	$h_{PLACA\ DE\ ORIFÍCIO}$ (mm)	$h_{PS\text{-}PE\ (BOMBA)}$ (mm)	$F_{DINAMÔMETRO}$ (kgf)	Rotação (rpm)
01	09	640	3,26	1498
02	15	640	3,30	1498
03	24	640	3,34	1502
04	37	640	3,46	1501
05	45	640	3,48	1500
06	52	640	3,54	1500
07	55	640	3,58	1499
08	62	640	3,62	1499
09	63	640	3,64	1501
10	63	640	3,64	1501
T = 18ºC	$P_{atmosférica}$ = 725mmHg	Δ Z = 200 mm	Braço → b = 225mm	

Ensaio: 08	n = 1500rpm	Data: 31/05/17

Ponto	$h_{PLACA\ DE\ ORIFÍCIO}$ (mm)	$h_{PS\text{-}PE\ (BOMBA)}$ (mm)	$F_{DINAMÔMETRO}$ (kgf)	Rotação (rpm)
01	10	640	3,24	1502
02	12	640	3,28	1498
03	24	640	3,32	1499
04	35	640	3,42	1501
05	45	640	3,48	1500
06	50	640	3,52	1500
07	57	640	3,56	1499
08	61	640	3,60	1499
09	63	640	3,64	1501
10	63	640	3,64	1499
T = 18ºC	$P_{atmosférica}$ = 752mmHg	Δ Z = 200 mm	Braço → b = 225mm	

Ensaio: 09	n = 1500rpm	Data: 31/05/17

Ponto	$h_{PLACA\ DE\ ORIFÍCIO}$ (mm)	$h_{PS\text{-}PE\ (BOMBA)}$ (mm)	$F_{DINAMÔMETRO}$ (kgf)	Rotação (rpm)
01	10	640	3,18	1501
02	14	640	3,26	1501
03	20	640	3,34	1501
04	32	640	3,40	1498
05	40	640	3,46	1499
06	52	640	3,50	1498
07	58	640	3,54	1501
08	62	640	3,58	1500
09	63	640	3,62	1501
10	63	640	3,64	1498
T = 18ºC	$P_{atmosférica}$ = 752mmHg	Δ Z = 200 mm	Braço → b = 225mm	

Ensaio: 10	n = 1500rpm	Data: 31/05/17

Ponto	$h_{PLACA\ DE\ ORIFÍCIO}$ (mm)	$h_{PS\text{-}PE\ (BOMBA)}$ (mm)	$F_{DINAMÔMETRO}$ (kgf)	Rotação (rpm)
01	11	640	3,20	1501
02	15	640	3,26	1501
03	22	640	3,34	1501
04	34	640	3,42	1498
05	40	640	3,46	1499
06	54	640	3,52	1501
07	58	640	3,54	1498
08	63	640	3,58	1499
09	64	640	3,58	1499
10	64	640	3,60	1499
T = 18ºC	$P_{atmosférica}$ = 7520mmHg	Δ Z = 200 mm	Braço → b = 225mm	

Ensaio: 01	n = 1700rpm	Data: 07/06/17

Ponto	$h_{PLACA\ DE\ ORIFÍCIO}$ (mm)	$h_{PS\text{-}PE\ (BOMBA)}$ (mm)	$F_{DINAMÔMETRO}$ (kgf)	Rotação (rpm)
01	0	820	3,74	1701
02	15	820	3,86	1700
03	30	820	4,00	1700
04	45	820	4,08	1700
05	57	820	4,24	1701
06	63	820	4,28	1701
07	70	820	4,30	1700
08	74	820	4,32	1700
09	76	820	4,32	1701
10	78	820	4,34	1701
T = 20ºC	$P_{atmosférica}$ = 752mmHg	Δ Z = 200 mm	Braço → b = 225mm	

Ensaio: 02	n = 1700rpm	Data: 07/06/17

Ponto	$h_{PLACA\ DE\ ORIFÍCIO}$ (mm)	$h_{PS\text{-}PE\ (BOMBA)}$ (mm)	$F_{DINAMÔMETRO}$ (kgf)	Rotação (rpm)
01	0	820	3,60	1700
02	13	820	3,74	1700
03	30	820	4,00	1700
04	44	820	4,10	1700
05	57	820	4,22	1700
06	62	820	4,24	1700
07	70	820	4,28	1700
08	74	820	4,26	1700
09	76	820	4,24	1700
10	78	820	4,26	1700
T = 20ºC	$P_{atmosférica}$ = 752mmHg		Δ Z = 200 mm	Braço → b = 225mm

Ensaio: 03	n = 1700rpm	Data: 07/06/17

Ponto	$h_{PLACA\ DE\ ORIFÍCIO}$ (mm)	$h_{PS\text{-}PE\ (BOMBA)}$ (mm)	$F_{DINAMÔMETRO}$ (kgf)	Rotação (rpm)
01	0	815	4,00	1700
02	13	815	4,00	1692
03	28	815	4,20	1689
04	46	815	4,22	1689
05	55	815	4,34	1689
06	62	815	4,34	1689
07	68	817	4,36	1688
08	72	817	4,40	1689
09	76	817	4,40	1688
10	78	817	4,40	1687
T = 20ºC	$P_{atmosférica}$ = 752mmHg		Δ Z = 200 mm	Braço → b = 225mm

Ensaio: 04	n = 1700rpm	Data: 07/06/17

Ponto	$h_{PLACA\ DE\ ORIFÍCIO}$ (mm)	$h_{PS\text{-}PE\ (BOMBA)}$ (mm)	$F_{DINAMÔMETRO}$ (kgf)	Rotação (rpm)
01	0	820	4,00	1700
02	12	820	4,10	1700
03	28	820	4,20	1700
04	44	820	4,22	1700
05	56	820	4,32	1692
06	62	820	4,32	1692
07	68	820	4,36	1701
08	72	820	4,38	1701
09	78	820	4,38	1700
10	78	820	4,38	1692
T = 20ºC	$P_{atmosférica}$ = 752mmHg		Δ Z = 200 mm	Braço → b = 225mm

Ensaio: 05	n = 1700rpm	Data: 07/06/17

Ponto	$h_{PLACA\ DE\ ORIFÍCIO}$ (mm)	$h_{PS\text{-}PE\ (BOMBA)}$ (mm)	$F_{DINAMÔMETRO}$ (kgf)	Rotação (rpm)
01	0	820	3,76	1701
02	14	820	4,10	1701
03	32	820	4,20	1701
04	42	820	4,22	1692
05	56	820	4,30	1692
06	62	820	4,34	1701
07	66	820	4,38	1692
08	72	820	4,38	1700
09	76	820	4,38	1700
10	78	820	4,38	1700
T = 20ºC	$P_{atmosférica}$ = 752mmHg		Δ Z = 200 mm	Braço → b = 225mm

Ensaio: 06	n = 1700rpm	Data: 07/06/17

Ponto	$h_{PLACA\ DE\ ORIFÍCIO}$ (mm)	$h_{PS\text{-}PE\ (BOMBA)}$ (mm)	$F_{DINAMÔMETRO}$ (kgf)	Rotação (rpm)
01	0	820	3,74	1701
02	13	820	3,74	1701
03	32	820	4,20	1703
04	40	820	4,22	1703
05	54	820	4,30	1700
06	62	820	4,34	1700
07	64	820	4,34	1701
08	70	820	4,36	1701
09	76	820	4,38	1700
10	78	820	4,38	1700
T = 20ºC	$P_{atmosférica}$ = 752mmHg		Δ Z = 200 mm	Braço → b = 225mm

Ensaio: 07	n = 1700rpm	Data: 07/06/17

Ponto	$h_{PLACA\ DE\ ORIFÍCIO}$ (mm)	$h_{PS\text{-}PE\ (BOMBA)}$ (mm)	$F_{DINAMÔMETRO}$ (kgf)	Rotação (rpm)
01	0	820	3,72	1700
02	14	820	3,74	1700
03	30	820	4,20	1689
04	44	820	4,24	1689
05	57	820	4,30	1701
06	64	820	4,32	1701
07	69	820	4,36	1689
08	72	820	4,36	1689
09	76	820	4,36	1700
10	78	820	4,38	1700
T = 20ºC	$P_{atmosférica}$ = 752mmHg		Δ Z = 200 mm	Braço → b = 225mm

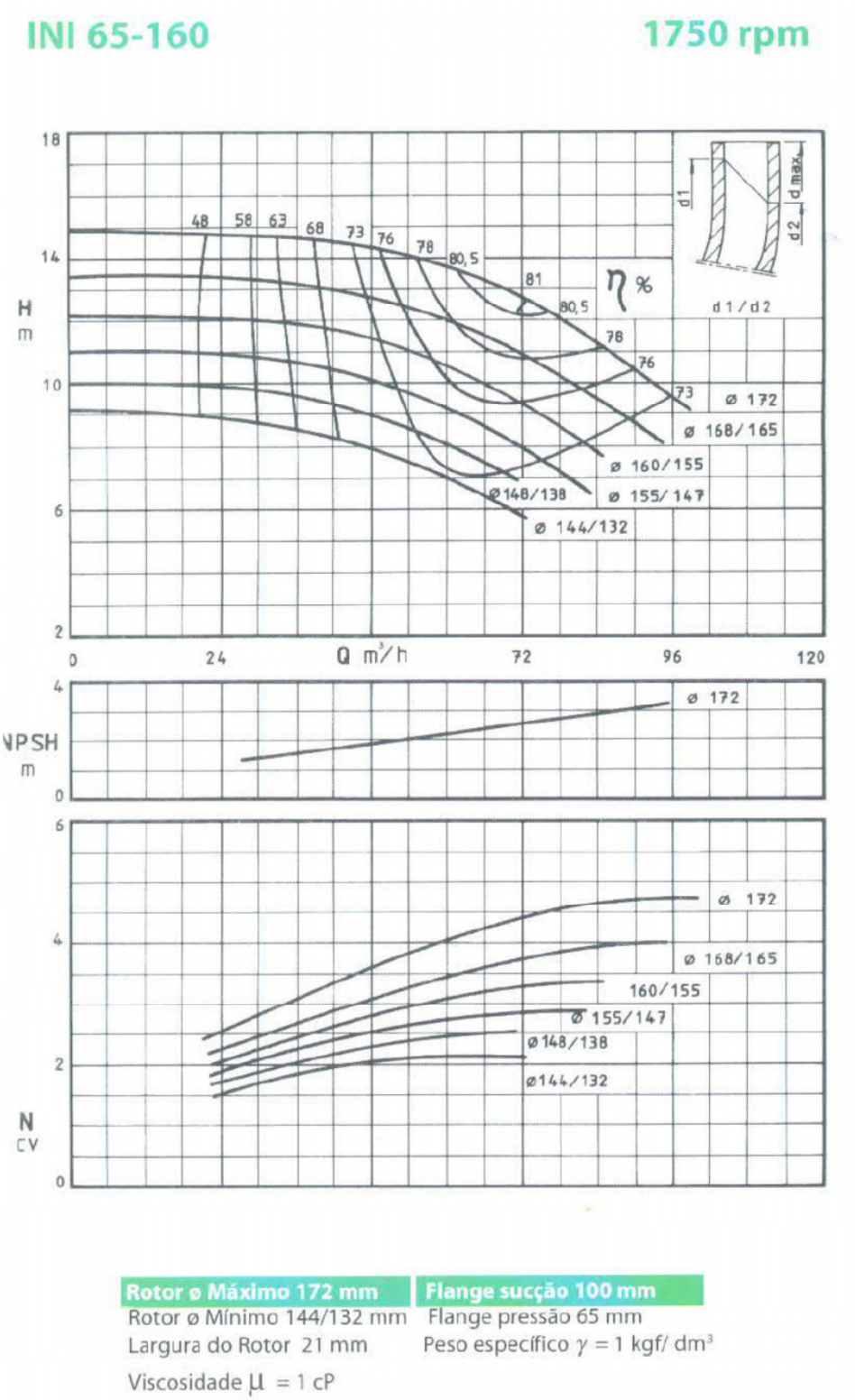
Ensaio: 08	n = 1700rpm	Data: 07/06/17

Ponto	$h_{PLACA\ DE\ ORIFÍCIO}$ (mm)	$h_{PS\text{-}PE\ (BOMBA)}$ (mm)	$F_{DINAMÔMETRO}$ (kgf)	Rotação (rpm)
01	0	820	3,74	1701
02	14	820	3,74	1701
03	32	820	4,20	1701
04	42	820	4,24	1692
05	56	820	4,24	1692
06	64	820	4,26	1703
07	68	820	4,34	1703
08	72	820	4,38	1703
09	76	820	4,38	1700
10	78	820	4,38	1700
T = 20ºC	$P_{atmosférica}$ = 752mmHg		Δ Z = 200 mm	Braço → b = 225mm

Ensaio: 09	n = 1700rpm	Data: 07/06/17

Ponto	$h_{PLACA\ DE\ ORIFÍCIO}$ (mm)	$h_{PS\text{-}PE\ (BOMBA)}$ (mm)	$F_{DINAMÔMETRO}$ (kgf)	Rotação (rpm)
01	0	820	3,74	1701
02	14	820	3,74	1701
03	30	820	3,80	1701
04	36	820	4,24	1692
05	42	820	4,26	1692
06	56	820	4,26	1703
07	68	820	4,33	1700
08	72	820	4,38	1700
09	76	820	4,38	1701
10	78	820	4,38	1701
T = 20ºC	$P_{atmosférica}$ = 752mmHg		Δ Z = 200 mm	Braço → b = 225mm

Ensaio: 10	n = 1700rpm	Data: 07/06/17

Ponto	$h_{PLACA\ DE\ ORIFÍCIO}$ (mm)	$h_{PS\text{-}PE\ (BOMBA)}$ (mm)	$F_{DINAMÔMETRO}$ (kgf)	Rotação (rpm)
01	0	820	3,74	1701
02	14	820	3,74	1701
03	32	820	4,20	1701
04	36	820	4,24	1692
05	42	820	4,24	1692
06	48	820	4,26	1700
07	54	820	4,34	1700
08	72	820	4,36	1700
09	76	820	4,38	1700
10	78	820	4,38	1700
T = 20ºC	$P_{atmosférica}$ = 752mmHg		Δ Z = 200 mm	Braço → b = 225mm

APÊNDICE B – Curvas da bomba Imbil para 1.750 rpm – INI 65-160.