



BANCADA DIDÁTICA PARA ANÁLISE DO RENDIMENTO DE BOMBAS HIDRODINÂMICAS ATRAVÉS DE SENSORES DE VAZÃO E NÍVEL

Carlos Alberto Della Giustina¹

Elvys Mercado Curi²

Richard de Medeiros Castro³

Resumo: O desempenho de uma bomba centrífuga avalia-se experimentalmente através da curva vazão e altura, para o qual é necessário dispor de uma bancada de ensaio. A medição da vazão do fluido e altura que atinge, realiza-se de maneira manual ou com instrumentos de leitura direta, digital ou com sinais analógicos. Usando atuadores é possível automatizar a coleta de dados para diferentes condições de funcionamento através de sensores e *softwares*. No processo de ensino e aprendizagem, a bancada didática de ensaios de bombas hidráulicas, permite obter a curva características das bombas, complementando-se com um sistema automatizado de coleta de dados o que facilita a execução do ensaio. O estudo de bombas hidráulicas industriais tem alto custo pelos equipamentos disponíveis no mercado, porém a bancada didática proposta foi construída de acordo com a ideia de ser um equipamento versátil em termos de operação, de fácil instalação, transporte, manipulação e interpretação de dados. Com a ajuda da bancada foi possível realizar estudos experimentais de validação das equações estudadas inicialmente na parte teórica dos cursos de engenharia, ou, por exemplo, na exploração das possibilidades de desempenho do equipamento em função de seus dados operacionais. A bancada é instrumentada com sensores de vazão volumétrica, sensores de nível e variador de rotação na bomba instalada. Esses dados são registrados em um programa de computador, que permite comunicar-se com os sensores de medição e processar a informação em tempo real para depois apresentar essas medições de maneira digital ou gráfica.

Palavras-chave: Bancada didática; Bomba centrífuga; Curva característica; Dados experimentais.

1 INTRODUÇÃO

Bancadas didáticas de ensaio são equipamentos indispensáveis em atividades educacionais relativas ao estudo de bombas e instalações de bombeamento. A medição dos parâmetros de vazão e altura é complementada com os de rendimento, potência consumida e torque. O rendimento de uma bomba é

¹Graduando em Engenharia Mecânica Faculdade Satc. carlosalbertodellagiustina@hotmail.com

² Professor Faculdade Satc. E-mail: elvys.curi@satc.edu.br

³ Professor Faculdade Satc. E-mail: richard.castro@satc.edu.br



extraído da curva de funcionamento fornecido pelos fabricantes nos catálogos ou manuais, entretanto quando não é disponível tal informação é necessário realizar medições dos principais parâmetros de funcionamentos. As medidas consistem na medição da vazão e a altura que atinge o fluido, correspondente para cada condição de funcionamento. Avaliar a eficiência ou rendimento da bomba é outro tema que depende da capacidade de medição e o nível de precisão destas. A realização dessas atividades requer uma bancada disponível, com a bomba instalada, um sistema hidráulico e seus instrumentos de medição.

O desenvolvimento de equipamentos didáticos compatíveis com a capacidade de investimento atual das universidades é uma maneira viável para minimizar a carência existente nos atuais cursos de engenharia. O projeto visualizou uma série de soluções que minimizasse os custos de montagem e de aquisição de equipamentos e componentes, propondo soluções simplificadas e que contivessem limitações de ordem operacional. Além disso, optou-se por um equipamento que pudesse ser transportado com facilidade e que fosse suficientemente leve para poder ser manobrado por uma pessoa. O acionamento do equipamento pode ser feito em corrente alternada, em 127 V e 220 V e (60 Hz), que possibilita a utilização em todo território nacional.

A bancada é instrumentada com sensores, placa analógica/digital e *software*, tem a praticidade de considerar temas de metrologia, máquinas de fluxo, programação e instrumentação, relacionando medidas do fluxo dinâmico da vazão que atravessa pelas tubulações e reservatórios em função da energia introduzida no motor da bomba.

A medição de vazão volumétrica de fluídos sempre esteve presente em nosso dia a dia, como exemplo o marcador de uma bomba de combustível nos veículos, o hidrômetro das residências. São fundamentais estratégica e economicamente nos processos industriais, pois, são utilizados para análise e garantia de qualidade, produtividade, segurança, análise de eficiência e rendimento etc.

A relação da teoria à prática se resume didaticamente na bancada de ensaios de bombas, com a manipulação dos parâmetros e variáveis que a mecânica de fluídos considera em seu processo de cálculo, visualizado com números extraídos do ensaio.



2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A bancada didática analisa o funcionamento das bombas, da mesma maneira como se executa em laboratórios industriais.

2.1 MÁQUINA DE FLUXO

A máquina de fluxo é um transformador de energia, onde há uma troca entre o fluido e o sistema mecânico. Sua classificação tem vários critérios, segundo Monterrey (1974), são pelo sentido de conversão de energia, pela direção do escoamento, pela forma dos canais entre as pás do rotor. Para a medida dos parâmetros da curva da bomba de vazão e altura, existem diversos tipos de instrumentos analógicos digitais.

2.2 BANCADA PARA ENSINO DE ENGENHARIA

Na criação do projeto da bancada de bombas hidráulicas e na sequência da sua construção, obteve-se uma solução em termos de layout, que permitisse a facilidade na modificação da bomba e no levantamento da curva característica de vazão e altura.

Segundo Martinez (1996), a bancada permite ter informação relevante e a partir do banco de dados levantados podem-se identificar quais são os pontos críticos nos ensaios, para estudar soluções dos problemas identificados.

Para Assunção (2005), a bancada apresenta as principais características das bombas hidráulicas e essas são usadas para avaliar a eficiência energética. Esse tipo de bancada se constrói com equipamentos utilizados na indústria e se reproduz em laboratório, representando o módulo de uma planta industrial monitorada e controlada por sensores, que poderá propiciar a disseminação de conceitos de otimização de sistemas motrizes industriais.

A bancada didática tem os seguintes objetivos, dentre outros:

- Levantamento das curvas características de bomba: altura manométrica x vazão volumétrica ($H \times Q$), vazão volumétrica x potência ($Q \times P$), vazão volumétrica x rotação ($Q \times n$);

- Estudo das características da bomba e sistema em função da velocidade de operação x estrangulamento da tubulação;
- Eficiência em instalações de bombeamento.

As principais curvas características se constroem em função da vazão como parâmetro independente e como parâmetros dependentes: a altura (H), o rendimento (η) e a potência do eixo (Pe) (HENNS, 2013). A Fig. 1 mostra exemplo das curvas características mais comuns.

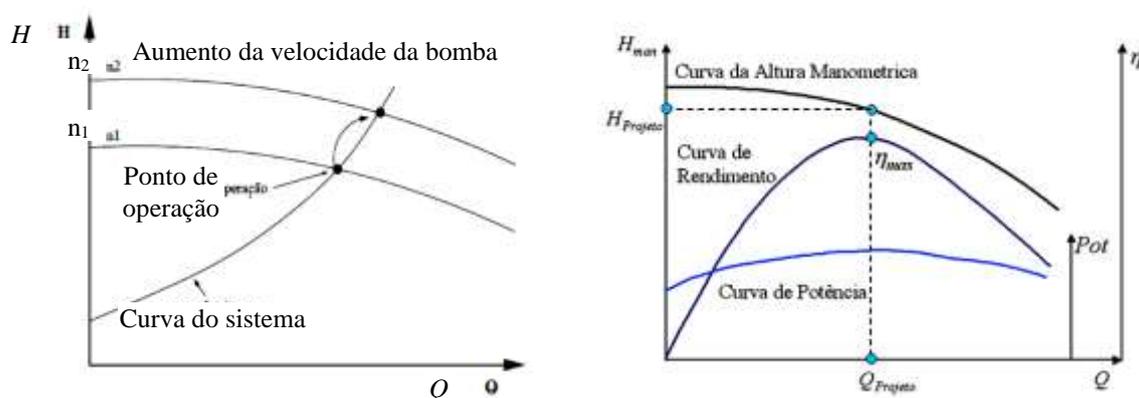


Figura 1: Curvas características das bombas a) Influência da velocidade em seu ponto de operação b) Ponto de operação da bomba centrífuga
Fonte: a) Barbosa (2006) b) Alé (2010)

2.3 MEDIDOR DE VAZÃO

Para Delmeé (2003), há basicamente três tipos de medidores de vazão. São indiretos, os utilizados em fenômenos relacionados a quantidades de fluido passante, os diretos estão relacionados ao volume do fluido e os especiais que são utilizados para ultrassônico e eletromagnetismo. Atualmente, se percebe que nas indústrias, a vazão volumétrica é a terceira grandeza mais medida nos processos fabris. Para controle e operações é muito importante realizar a medição da quantidade de fluxo de líquidos, gases e até sólidos granulados, não só para fins contábeis, mas também para a verificação do rendimento do processo.

Para Ribeiro (2002), sempre haverá um medidor para cada exigência, se for escolhido a solução mais adequada, mas é preciso ter cuidado, pois, o principal problema de medidas mal sucedidas, é que o comprador não sabe comprar, e o vendedor não sabe vender.



2.4 SENSORES DE NÍVEL

Os sensores de nível são utilizados para o controle de líquidos ou grãos, contidos em reservatórios, silos e tanques pressurizados utilizados na indústria. São úteis na detecção de um nível fixo (chave de nível – alarma ou sinaliza, quando atinge um determinado ponto) e na medição contínua (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2009).

Segundo Bahner (2001), no mercado existem mais de 20 métodos para medição de nível na indústria, porém cada tecnologia funciona apenas se for aplicada de maneira correta, respeitando condições especiais para garantir o perfeito funcionamento. Ribeiro (2002), explica que comercialmente destacam-se os seguintes princípios de medição: visor, boia, por diferencial de pressão, borbulhamento, deslocamento (força de empuxo), radiação nuclear, radar, ultrassônico, capacitiva e laser. Cassiolato (2015), define os sensores em três formas:

- 1) Medição direta: aquela que é realizada medindo-se diretamente a distância entre o nível do produto e uma referência definida. Neste caso se utiliza a observação visual.
- 2) Medição indireta: nessa forma o nível é medido indiretamente em função de grandezas físicas a ele relacionadas, como por exemplo, células de pressão diferencial, empuxo (deslocador), principio elétrico, capacitivos, condutivos, radioativos e ultrassônicos.
- 3) Medição Descontínua: tem a indicação quando o nível atinge certos pontos especificados, como por exemplo, condições de alarmes de níveis alto ou baixo.

2.5 MULTIMEDIDORES

É um equipamento eletrônico capaz de realizar diversas medições em um circuito elétrico. Possui a função de medições instantâneas, normalmente opera em sistemas CA (corrente alternada) e necessita medir a tensão e corrente elétrica do circuito a ser instalado. Essa informação pode ser obtida diretamente ou indiretamente.

Na bancada de Bombas hidráulicas de Assunção (2005), cada fonte de alimentação tem um medidor multifunção para a medida dos parâmetros elétricos dos



motores, de modo que se avalie a potência consumida através da medida da corrente e sua tensão elétrica.

2.6 BOMBAS HIDRÁULICAS

São máquinas de fluxo, cuja função é fornecer energia para a água, afim de elevá-la através da conversão de energia mecânica de seu rotor a combustão ou elétrico. As bombas convertem a energia mecânica em hidráulica com algumas perdas. A ação mecânica cria um vácuo parcial na entrada da bomba, o que permite que a pressão atmosférica force o fluido do reservatório hidráulico, através da linha de sucção a penetrar na bomba, que passará o fluido para abertura de descarga, forçando-o através do sistema hidráulico.

Segundo Balarim (2004), as bombas podem ser usadas como turbinas, considerando seus custos benéficos. Para micros centrais hidrelétricas, sempre que os custos constituírem o aspecto dominante, e para potências até 50 KW, a opção por bombas funcionando como turbinas (BFTs), devem ser consideradas em lugar das turbinas hidráulicas.

2.7 CALIBRAÇÃO

Segundo os Vocabulários Internacional de Metrologia (VIM, 2012), a calibração é um conjunto de operações que estabelece, sob condições específicas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição e os valores correspondentes das grandezas estabelecidas. As operações de calibração são baseadas na comparação de um instrumento de medição a outro que é padrão no SI (sistema Internacional).

As medições são baseadas na expectativa do conhecimento dos erros e das fontes de incerteza que estão associados. Para Albertazzi (2008), o sistema de medição possui uma grande influência nos erros de medidas. Por isso, tratar esses erros ou ainda, conhecer bem as características dos instrumentos de medição por meio de sua calibração é imprescindível.

Já para Webster (1999), a calibração é uma relação entre a variável de entrada e a variável do sensor, tipicamente, um sensor ou todo seu sistema é



calibrada, fornecendo dados do estímulo em relação à resposta de saída, mostrando o efeito da precisão.

2.8 SOFTWARE PARA CÁLCULOS HIDRÁULICOS

Os instrumentos de medição analógicas ou digitais são interligados a *softwares* apropriados para coleta de dados. Para uma bancada de bombas hidráulicas Ferreira (2015) desenvolveu um *software* por meio da IDE Visual Studio 2010© e em linguagem VB. NET para geração das curvas da bomba e cálculo do ponto de operação, além de avaliar o ponto de projeto, visar o custo de bombeamento de acordo com a tarifa escolhida pelo projetista.

Outro *software* usado em coleta de dados analógicos digitais é proposto pela National Instruments®, no manual de LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering), o qual permite criar uma interface com o usuário por meio de linguagem de programação gráfica, chamada de programação G. Essa linguagem possui um conjunto de instruções, mas ao invés de utilizar comandos na forma de texto para gerar a linhas de código, utiliza uma linguagem de programação gráfica, ou seja, o programa é feito na forma de blocos funcionais. Os mesmos apresentam bibliotecas de funções prontas para utilizar em qualquer tipo de aplicação específica como análise espectral e estatística, filtragem de sinais aquisição e controle de dados, comunicação com instrumentos I/O, dentre outros (INSTRUMENTS, 2006; 2003a).

3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

A concepção da bancada se realizou com a filosofia de ser simples, baixo peso e custo, de fácil manuseio, de rápida coleta de dados e instrumentados para ter uma leitura automatizada da vazão volumétrica e altura do nível de recalque. A Fig. 2 resume o método.

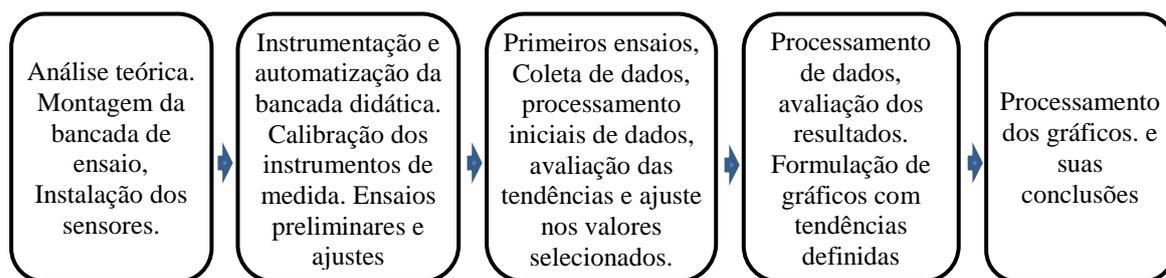
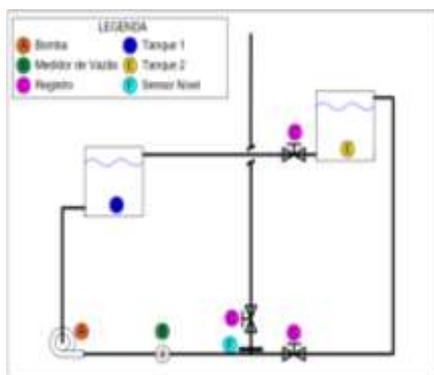
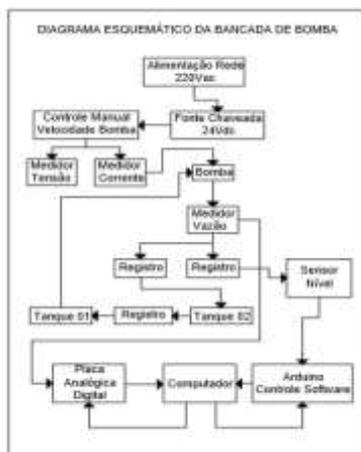


Figura 2: Fluxograma do processo metodológico
Fonte: Do autor

3.1 DESCRIÇÃO DA BANCADA

A curva característica da bomba realiza-se com medidas da vazão e altura, com a bomba funcionando na mesma velocidade. A proposta da bancada consiste em dois reservatórios hidráulicos, uma bomba e seus instrumentos de medição. A Fig. 3 apresenta a concepção da bancada.



(a) (b) (c)
Figura 3: Diagrama e foto da bancada didática; a) Diagrama esquemático, b) Instalação da bancada e c) Bancada didática com os instrumentos instalados
Fonte: Do autor

Para a montagem da bancada didática, foi utilizado os materiais listados na Qd. 1, denominada como lista de materiais, nesta se descreve os principais equipamentos/materiais, suas especificações técnicas e custos.

Quadro 1: Lista de materiais usados na bancada e seus custos

Lista de material utilizada para a fabricação da bancada e seus preços							
Item	Qtd	Descrição do material	Preço (R\$)	Item	Qtd	Descrição do material	Preço (R\$)
1	1	Madeira 40 x 60cm	28,45	12	1	Medidor Vazão FS300A	80,00
2	2	Tanque de 20cm x 20cm	15,67	13	1	Sensor Ultrassônico HC-SR04	56,00
3	2	Tubo de PVC 1/2 P. barra c/ 3m	22,34	14	1	Bomba rec. e suc. 20,3 mm, rosca de 1/2	134,00
4	4	Redutor de PVC 3/4 x 1/2 P.	11,40	15	1	Variador de velocidade	34,00
5	4	Curva de PVC de 1/2 P.90graus	2,85	16	1	Multimedidor	24,00
6	1	Curva de PVC de 1/2 P. 180graus	16,92	17	1	Canaleta de PVC 30x30 barra de 2m	20,00
7	4	Flange de PVC de 1/2 P.	2,24	18	10	Borne de 2,5mm	23,00
8	4	Cola de cano de PVC	6,87	19	1	Fonte chaveada 24V pra 220V	110,00
9	3	Registro de 1/2 P PVC	14,67	20	1	Cabo flexível para alimentação 2m	13,00
10	1	Mangueira 1/2 transp. com tamanho de 2m	11,23	21	1	Amperímetro de alicate SCT013 20A	80,00
11	1	Placa arduino	167,00	22	1	Placa analógica digital USB 6002	1.800,00
Valor Total							2.673,64

Fonte: Do autor

A descrição detalhada dos principais componentes da bancada e suas características técnicas informam-se a seguir:

Bomba: A mini bomba de água funciona com uma alimentação DC de 6 a 24 V, sua altura de sucção de 20,3 mm, tem um tubo de entrada e saída do fluido com roscas de 1/2" de diâmetro, sua vazão é de 960 l/h de água, e o eixo do motor é de aço inoxidável. A Fig. 4 mostra a bomba usada na bancada e um plano com suas dimensões.

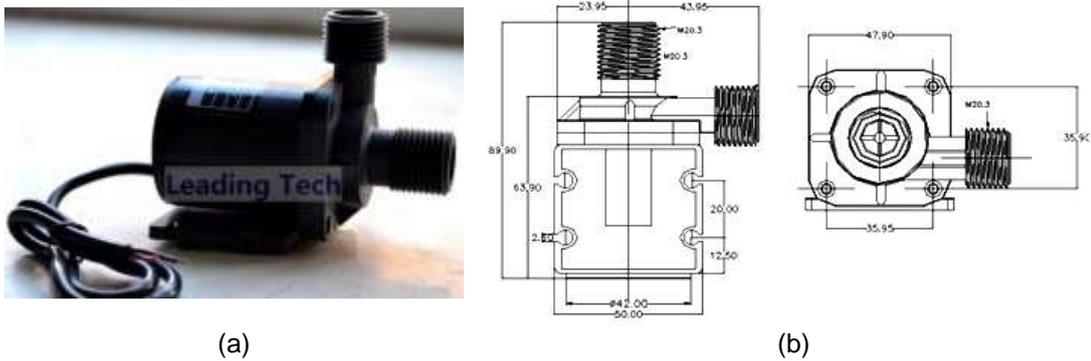


Figura 4: Bomba utilizada; a) foto do equipamento e b) dimensões da bomba
Fonte: Do autor

A velocidade de rotação da bomba (n) se calcula com a frequência (60 Hz), o número de polos do motor elétrico (n° polos), e o fator de escorregamento na Eq. 1:

$$n = 120 \cdot \frac{f}{n^\circ \text{ polos}} \quad (1)$$

Onde:

n [rpm]: Velocidade de rotação máxima da bomba;

f [Hz]: Frequência da linha de corrente (60 Hz);

n [--] Número de polos do motor elétrico da bomba (2).

s [%] Escorregamento do motor (2%)

Medidor de Vazão: O medidor de vazão utilizado para a coleta de dados foi o modelo FS-300A 6314, com uma faixa de 1 a 60 l/min. O sensor funciona digitalmente e fornece informação do número de voltas por minuto. A Fig. 5 mostra o medidor de vazão utilizado na bancada.



Figura 5: Equipamento; a) Medidor de vazão e b) Medidor de vazão na bancada
Fonte: Do autor



A vazão do fluido se relaciona com o volume geométrico (V_G) e rotação. A cada volta que o sensor de vazão realiza, terá um volume constante, a qual depende do espaço físico do sensor, a que está em sintonia com o diâmetro da tubulação. O cálculo da vazão se realiza pela Eq. (2):

$$Q = V_G \cdot n \quad (2)$$

Onde:

Q [lt/min]: Vazão mensurada do fluido

V_G [lt/rpm]: Volume geométrico do sensor de vazão.

n [rpm]: Velocidade de rotação mensurada no sensor.

Sensores Ultrassônico: O sensor utilizado é o HC-SR04. Descreve-se como um módulo variador ultrassônico, a fixa de medidas de dados é de 0,2 m a 4,00 m. A precisão pode chegar a 3 mm e o ângulo é menor que 15°. A tensão de funcionamento DC 5 V, a corrente 15 mA, trabalha em uma frequência de 40 Hz e sua dimensão é de 45 x 20 x 15mm.

No funcionamento, o sensor emissor envia uma onda de som em direção reta, e ao encontrar um obstáculo, o sinal volta, sendo captado pelo sensor receptor, após de isso, avalia-se o tempo de resposta (Δt), e calcula-se a distância. A medida se realiza em função de um tempo de coletas de mostras, para os ensaios forem coletados 30 segundos e realiza-se um cálculo do valor médio de todos os dados coletados.

Para o cálculo da distância se considera a velocidade do som na temperatura de ambiente, que a 25°C é 346,3 m/s, usando a seguinte Eq. (3):

$$e = v_{som} \cdot \Delta t \quad (3)$$

Onde:

E [m]: altura medida desde a posição do sensor até a referência indicada.

v_{som} [m/s]: Velocidade do som à pressão e temperatura do ambiente ($v_{som} = 340 \frac{m}{s}$).

Δt [s]: Tempo coletado de resposta da onda.

O sensor de medida utilizado é mostrado na Fig. 6, onde se observa uma imagem do sensor e sua instalação na bancada didática.

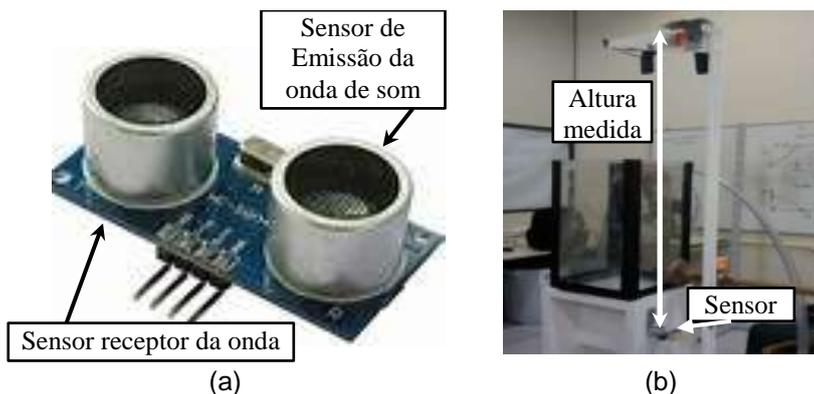


Figura 6: Detalhe do sensor a) sensor ultrassônico e b) sensor ultrassônico na bancada
Fonte: Do autor

Amperímetro de Alicate Digital: É um transformador de corrente, modelo SCT013 20A. O aparelho tem um campo magnético primário e secundário. O passo da corrente do condutor altera uma das bobinas gerando um diferencial de tensão, proporcional à corrente que circula pelo condutor elétrico, instalado dentro do alicate, captando-se a saída do diferencial de tensão para uma placa analógica digital ou voltímetro para sua leitura. A Fig. 7 apresenta o amperímetro utilizado, suas dimensões e um exemplo de sua instalação.

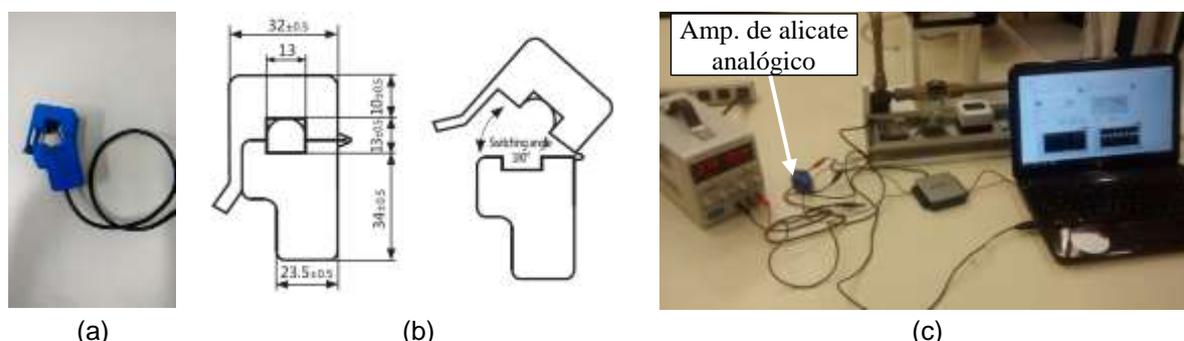


Figura 7: Equipamento a) amperímetro de alicate analógico; b) desenho e dimensão e c) amperímetro alicate instalado na bancada.
Fonte: Do autor

3.2 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA PARA A MEDIÇÃO DE VAZÃO

O medidor de vazão utilizado na bancada, foi o modelo FS300A da Walter Flow Sensor. Para o cálculo da vazão da bomba se realizou as seguintes atividades: Foi observado que o sensor de vazão, modelo FS300A, emite um pulso a cada volta. Esse pulso foi processado em um programa de LabView®, que contava a rotação em um determinado tempo. Ao dividir o número de rotações nesse tempo, se obteve a

frequência de giro do medidor de vazão. No primeiro ensaio, a bomba girava em sua máxima velocidade a 4516 rpm, com a tensão de entrada de 26,6 V. Os ensaios para determinar o valor de V_g são ilustrados na Fig. 8.

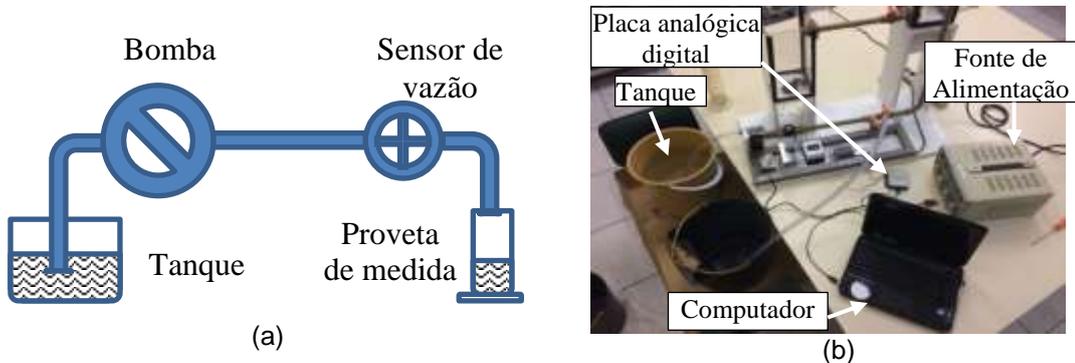


Figura 8: Calibração do sensor de vazão: a) esquema do funcionamento entre a bomba e o sensor de vazão e b) elementos usados na calibração do sensor de vazão
Fonte: Do autor

Para comparar a rotação entre a bomba e o sensor de vazão foi desmontada a bomba e se instalou um tacômetro na ponta do eixo, medindo-se a rotação, aproximando-se o valor medido pelo tacômetro com a medida de rotação do sensor de vazão.

Não foi possível medir a rotação da bomba em simultâneo com o sensor de pulso, por ser uma bomba hermética, por isso se realizou a medição da rotação separadamente.

Para determinar o V_g (Volume Geométrico), deve-se determinar a vazão e dividir entre a velocidade de giro, dado fornecido pelo sensor de pulso.

Para determinar a vazão real da bomba, se realizou a medição do volume de água em função do tempo, medindo-se o volume e o tempo inicial e final que levou para encher o recipiente de água. Com o volume e tempo calculou-se a vazão.

Foi repetido esse procedimento cinco vezes, obtendo-se o tempo, volume, rotação e vazão. Através da equação (2) se determina o V_g médio.

Para melhorar a confiabilidade nos cálculos do V_g , foi realizado o mesmo procedimento a 2996 rpm (15,6V). O resultado deu uma diferença de 0,00065 lt/rotação.

3.3 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE SENSOR DE NÍVEL

Para automatizar a bancada foi usado um sensor de nível ultrassônico HC-SR04, onde foi utilizada a placa de coleta de dados e o arduino, que ligados ao computador forneceram a leitura da distância de maneira digital. O arduino é parte do equipamento do sensor e tem portas que permitem o funcionamento de envios e recepção de ondas.

O valor medido pelo sensor é comparado com os valores da bancada, e a margem de erro foi de 0,03 mm. Com essa margem tão pequena foi adotada a leitura do sensor. A Fig. 9 mostra um exemplo dos experimentos realizados usando todos os sensores de medida.

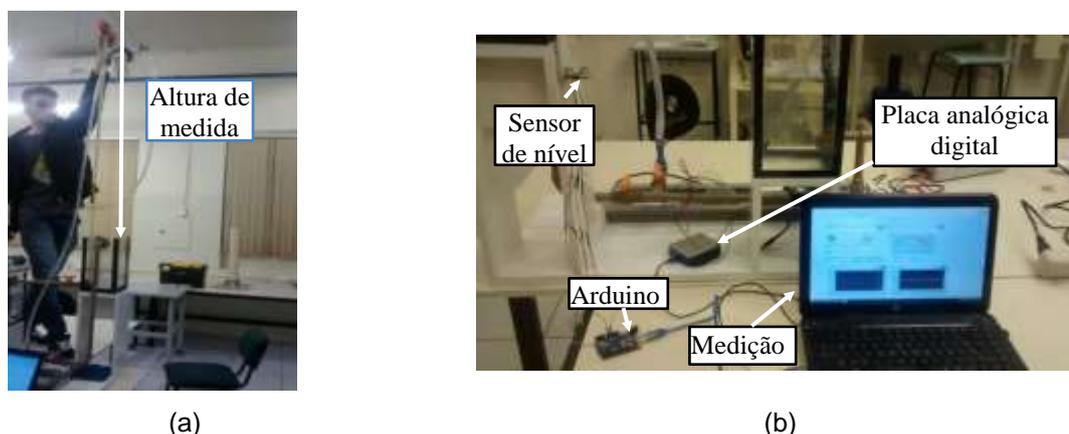


Figura 9: Equipamento: a) medida em execução e b) sensor de nível com arduino
Fonte: Do autor

3.4 CALIBRAÇÃO DO AMPERÍMETRO DIGITAL ANALÓGICO

A calibração do amperímetro analógico modelo SCT013 20A, realizou-se por comparação com o analisador de energia. O valor determinado foi de $I = 1,29 \times V - 0,15$. Para verificação da medição de corrente foi usado um alicate amperímetro da minipa ET3200. Trata-se de um amperímetro digital analógico cujos valores foram próximos.

4 SISTEMA DE AQUISIÇÃO E SUPERVISÃO DOS DADOS

Para a coleta de dados de todo o processo de medição da bancada didática, foi desenvolvido e integrado aos componentes apresentados na Fig. 10.



Figura 10: Diagrama do sistema de supervisão e aquisição de dados
Fonte: Do autor

O diagrama e seus principais componentes: sensor de vazão, sensor ultrassônico, amperímetro de alicate e o computador são interligados de maneira individual com a placa analógica digital e arduino e ambos ligados ao computador para o processamento de dados.

5 MEDIÇÕES NA BANCADA E CÁLCULO DO RENDIMENTO

As medições da bancada didática foram realizadas na Faculdade SATC, no laboratório LAVITRI. Com a bancada instrumentada foi iniciado o ensaio da seguinte maneira:

Primeiramente definiu-se as tensões de entrada para a bomba, foi feita as medições em três tensões: 15 V, 20 V e 24 V o que corresponde a três velocidades de giro da bomba de 3000 rpm, 3600 rpm e 4200 rpm respectivamente. Cada ensaio teve um tempo médio de 1 minuto de duração. A sequência de medição foi a seguinte:

- Selecionar a tensão de alimentação da bomba / bancada didática para 24 V;
- Selecionar o reservatório hidráulico 01 para realizar o ensaio;
- Verificar se os sensores estão todos ligados;
- Efetuar as medições e coleta de dados através do programa;
- Repetir por três vezes as medições com um tempo de 1 min cada coleta no reservatório;
- Mudar de reservatório hidráulico (reservatório 02) e repetir o mesmo processo citado na letra a, c, d, e;
- Mudar a tensão de alimentação da bomba / banca didática para 20 V;
- Efetuar novamente as medições e coleta de dados;
- Mudar a tensão de alimentação da bomba / bancada didática para 15 V;



j) Efetuar novamente as medições e coleta de dados;

Nos ensaios foi possível obter, em tempo real, na tela do computador, os valores da vazão, corrente, altura. Após a aquisição dos dados realizados na programação do *software*, testes foram realizados com intuito de validar a bancada de teste.

Com os valores medidos da intensidade da corrente (I) e da tensão elétrica (V) que consome o motor elétrico da bomba, se calcula a potência mecânica do eixo (P_e) com a eq:

$$P_e = I \cdot V \cdot \eta_e \quad (4)$$

Onde:

I [A]: Intensidade de corrente consumida da bomba.

V [V]: Diferencial de tensão em DC administrada na bomba.

η_e [-]: Rendimento elétrico da bomba.

O rendimento total da bomba (η_t) se calcula com a seguinte equação:

$$\eta_t = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q}{P_e} \quad (5)$$

Onde:

ρ [kg/m³]: Massa específica da água.

g [m/s²]: Gravidade da terra.

H [m]: Altura máxima que atinge o fluido com relação ao eixo de giro da bomba.

Q [m³/s]: vazão do sistema hidráulico medido com o sensor.

6 RESULTADO E ANÁLISE

A calibração do sensor de vazão consistiu em determinar o volume geométrico (V_g), calculando-se a média da vazão que passa pelo sensor. A medição da vazão padrão foi realizada medindo-se o volume em função do tempo. No primeiro ensaio fluiu um volume de 7 l de água em um tempo de 0,54 min, com uma rotação de 4533 rpm a 26,6 V, se mensurou o tempo e volume para ter o valor de V_g com a equação (2). Foram realizados cinco ensaios nessa rotação e obte-se um V_g médio de 0,002827 l/rot. Foram realizados cinco ensaios para conferir esse resultado com 15,3 V, dando o V_g médio de 0,002845 l/rot. O Qd. 2 mostra os resultados numéricos dos cinco ensaios para ter um valor médio de V_g .

Quadro 2: Valores das medidas do volume e cálculo do Vg

Valores de medidas do volume e cálculo do Vg									
Com a fonte (24VDC) da bancada a 15,3V					Com a fonte (24VDC) da bancada a 26,6V				
Testes	Volume [l]	Vazão [lpm]	RPM	Vg [l/rot]	Testes	Volume [l]	Vazão [lpm]	RPM	Vg [l/rot]
Test1	7,13	8,86	3114,53	0,002843	Test1	7,00	13,04	4533,01	0,00287
Test2	6,67	8,80	3089,40	0,002847	Test2	7,45	12,77	4518,74	0,002826
Test3	6,62	8,73	3048,88	0,002863	Test3	7,34	12,58	4500,28	0,00279
Test4	6,21	7,71	2741,22	0,002814	Test4	7,31	12,79	4512,99	0,002833
Test5	6,33	7,53	2636,52	0,002857	Test5	7,53	12,65	4517,09	0,00280
Média				0,002845	Média				0,002827

Fonte: Do autor

A Fig. 11 mostra os resultados de medida do Vg com uma dispersão maior, na maior velocidade (linha azul) e o valor médio é mais constante na menor velocidade.

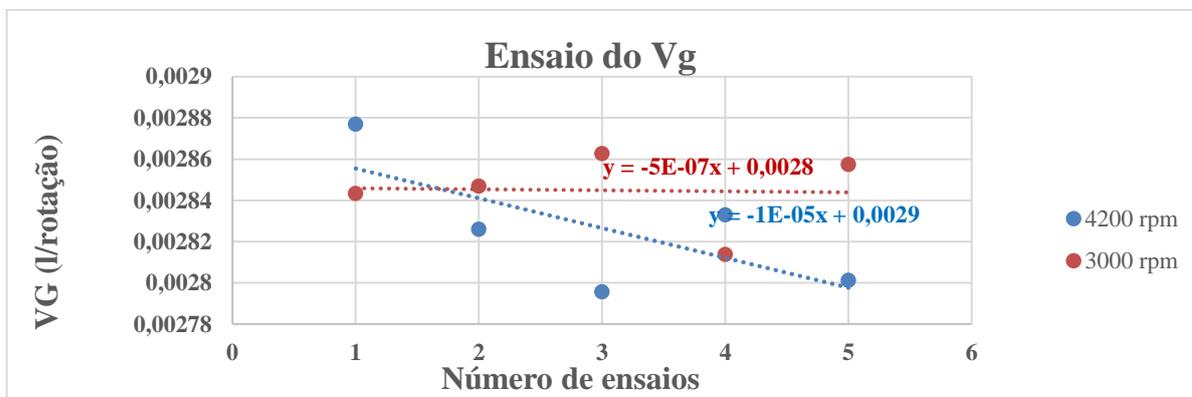


Figura 11: Valores do Vg determinado com a média da medição do volume e rotação

Fonte: Do autor

O valor do Vg foi de 0,002836 l/rot. O valor de conversão é introduzido no programa de LabView para ter o valor em l/s diretamente na tela do computador em tempo real.

Não foi necessário calibrar o sensor de nível, por estar calibrado pelo fabricante, mas foi conferido com uma trena os valores indicados pelo sensor para diferentes alturas testadas. As alturas usadas nos ensaios foram medidas manualmente e verificou-se o valor indicado pelo sensor. O manual indica que o sensor de nível tem um erro admissível de 0,03 mm.

A calibração do amperímetro se realizou por comparação, com alicate multimetro modelo MD-360, que mede a corrente em amperes e mostra seu valor digital. Foi colocado o alicate multimetro em série com a alimentação da bomba e o sensor amperímetro alicate no mesmo cabo para a coleta de dados. Os dados do sensor amperímetro foram registrados ao computador pela placa analógica digital que processa os dados no programa de LabView®.

Na calibração foram selecionados sete tensões elétricas de entrada na bomba e cada valor de corrente medido pelo amperímetro digital foi registrado, assim o sinal de saída em tensão elétrica do sensor, foi introduzido ao computador pela placa analógica digital. O tempo de coleta foi de 1 min para cada rotação da bomba selecionada.

Dos sinais coletados pelo sensor amperímetro, se considerou os 20 maiores valores da mostra, e se calculou o valor médio desses para relacionar o valor do sensor com o medido pelo amperímetro padrão. A Fig. 12 mostra o comportamento linear de todas as medições com seus respectivos valores de corrente para o alicate multimetro e tensão de saída para o amperímetro alicate digital. Os resultados da medição de intensidade de corrente do alicate multimetro foi linear, com 98,67 % com uma boa correlação com o modelo matemático ($y = 6,8165x - 0,012$). O comportamento linear permite ter o fator de conversão (6,815) para ajustar a tensão de saída do sensor e converter-la em medição da corrente que circula pelo cabo.

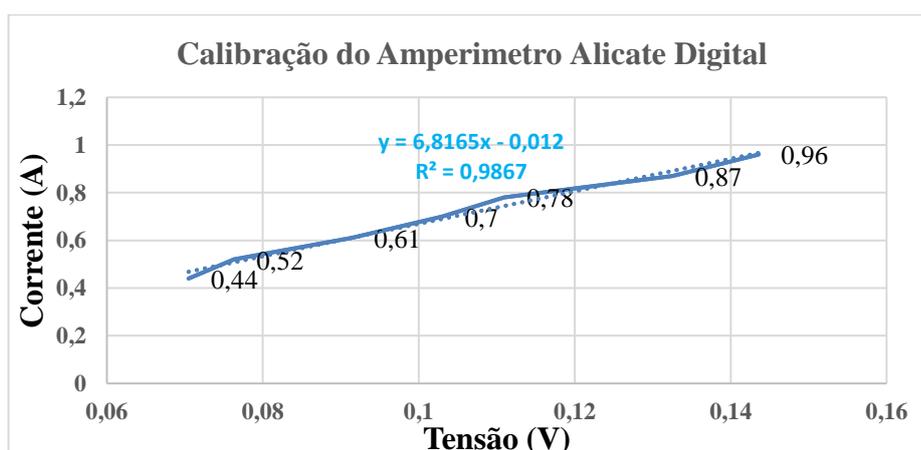


Figura 12: Fator de conversão das medições de tensão coletada em tensão elétrica e convertida em intensidade de corrente através da reta $y = 6,8165x - 0,01$

Fonte: Do autor

O fator de conversão de tensão e corrente, determinado com a equação da reta da Fig. 12, se introduz no programa do LabView, 2016 v.16.0 deste modo

controla-se as medidas de corrente do motor elétrico da bancada. No computador o sinal de tensão é lido em corrente ao ser alterado pela equação da calibração.

O programa para o controle de dados foi desenvolvido usando o *software* de labView, e consiste em registrar a informação das variáveis analógicas/digital de cada instrumento e coletar os dados em arquivos de texto. Os sinais dos sensores são lidos pela placa analógica digital USB-6002, fabricado pela *National Instruments* e incorporados ao computador através do *software* de coleta de dados. A informação se introduz por meio da configuração das portas de entrada (analogic input) especificadas em tensão ou valores digitais, onde se utilizou um bloco DAQ *assistant*, com a opção de aquisição contínua dos dados. Com o conhecimento de cada bloco funcional e sua programação, foi organizada a entrada de dados e formulou-se sua visualização digital e gráfica das medidas em tempo real.

O processamento de entradas e saídas das variáveis é controlado pela rotina de análises de dados, mantendo o mesmo período ou velocidade de rotação. Além de mostrar os dados de corrente, altura e vazão, foi possível elaborar um algoritmo de controle que atendesse a necessidade de salvar os dados quando for solicitado. A Fig. 13 apresenta o programa em linguagem G, usado o controle e coleta de dados da bancada.

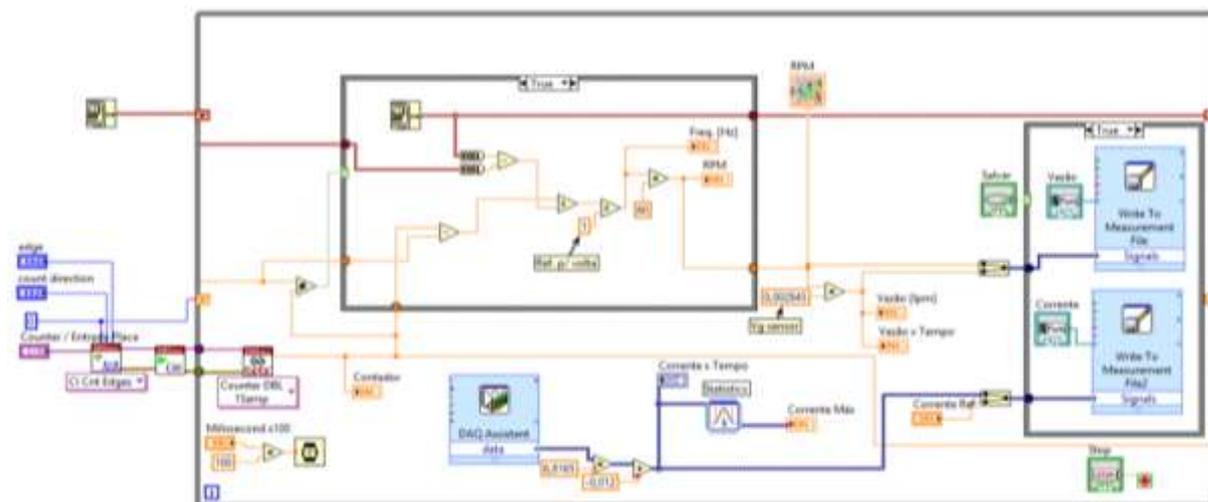


Figura 13: Diagrama de blocos elaborado em LabVIEW, 2016 v.16.0 para o controle e coleta de dados da bancada hidráulica.

Fonte: Do autor

O processo de aquisição de dados é realizado continuamente, sendo as variáveis enviadas para uma interface gráfica e visualizada em tempo real no painel frontal da interface, conforme se mostra na Fig. 14.

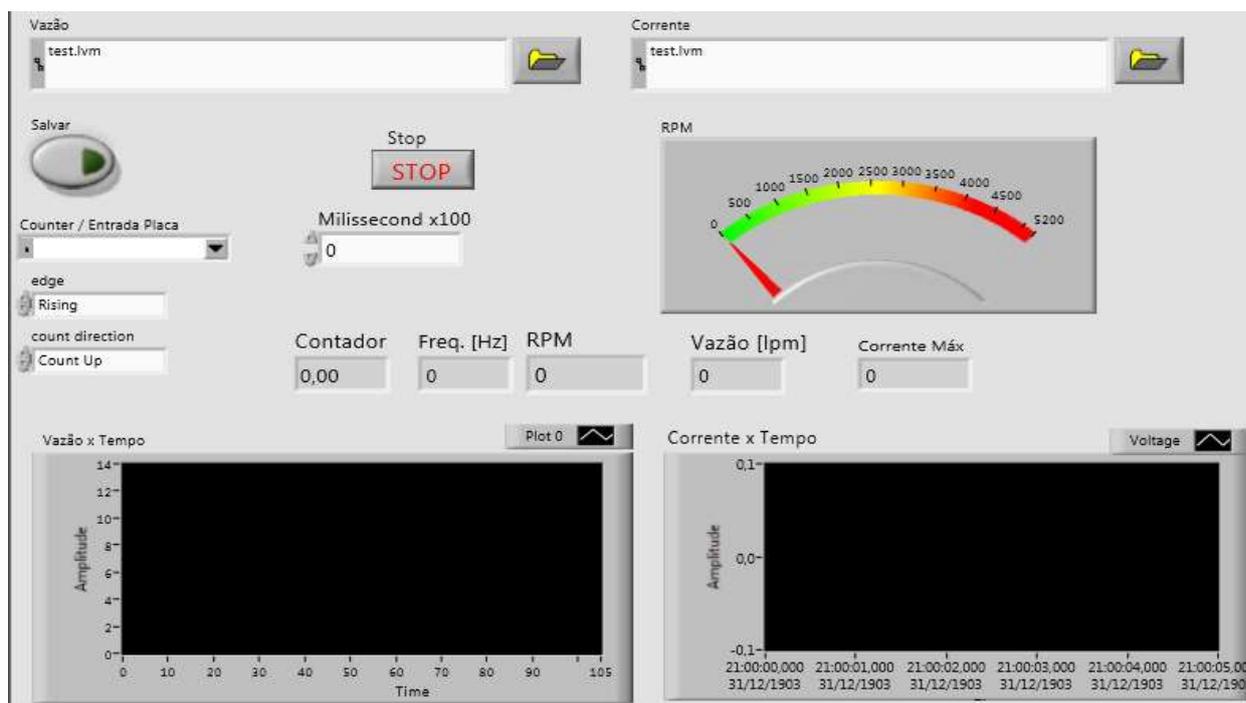


Figura 14: Interface gráfica elaborado em LabVIEW, 2016 v.16.0 para visualizar os dados em tempo real.

Fonte: Do autor

Os ensaios foram realizados para três velocidades da bomba, os valores aproximados da rotação da bomba foram de 4200 rpm com 24 V, 3600 rpm com 20 V e 3000 rpm com 15 V no motor elétrico. Se realizou dois tipos de experimentos:

O primeiro consistiu em usar dois reservatórios hidráulicos independentes, recalçando a água desde o reservatório que alimenta a bomba a outro reservatório instalado a uma altura maior. O reservatório instalado na maior altura tem uma tubulação de $\frac{1}{2}$ " de diâmetro que restitui a água do reservatório inferior. Para cada rotação permaneceu constante a tensão de alimentação da bomba.

Foram realizados três ensaios para cada nível, estes foram modificados com uma mangueira que se fixava em diferentes níveis, portanto os valores da vazão se modificaram em função da altura de ensaio. Após cada coleta de dados no processamento destes se determinou o valor médio de cada variável. A Qd. 3 resume os dados obtidos nos ensaios com dois reservatórios. Para a menor rotação e maiores alturas não foram possíveis obter valores pela dificuldade da bomba em funcionar de maneira constante.

Quadro 3: Resultados dos ensaios da bomba usando dois reservatórios hidráulicos

Ensaio com 2 reservatorio	Velocidade de rotação 4200 rpm (24 V)		Velocidade de rotação 3600 rpm (20 V)		Velocidade de rotação 3000 rpm (15 V)	
	Vazão (m ³ /s)	Altura (m)	Vazão (m ³ /s)	Altura (m)	Vazão (m ³ /s)	Altura (m)
1	0,000207	0,89	0,000172	0,88	0,000141	0,87
2	0,000206	1,13	0,000173	1,12	0,000140	1,14
3	0,000205	1,39	0,000172	1,36	0,000141	1,37
4	0,000204	1,62	0,000171	1,61	0,000136	1,62
5	0,000198	1,88	0,000168	1,85	0,000126	1,88
6	0,000190	2,20	0,000162	2,20	0,000118	2,20
7	0,000180	2,65	0,000159	2,65	0,000112	2,65
8	0,000173	3,00	0,000152	3,00	0,000102	3,00
9	0,000166	3,60	0,000144	3,60	-	-
10	0,000153	4,10	0,000123	4,10	-	-

Fonte: Do autor

Os resultados do comportamento da curva da bomba de vazão vs. altura para três velocidades executadas durante os ensaios, são mostradas na Fig. 15.

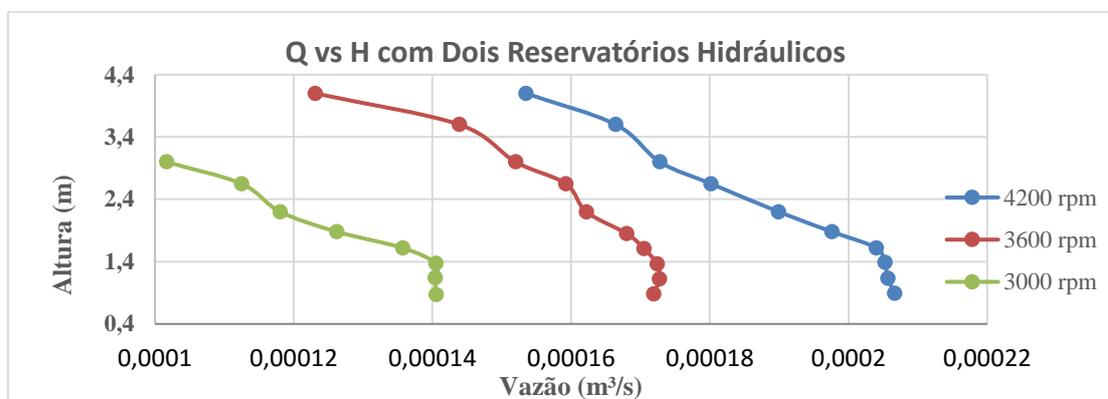


Figura 15: Curva da bomba para três velocidades de vazão vs altura com dois reservatórios hidráulicos
Fonte: Do autor

Os resultados da curva da bomba de vazão vs altura, com dois reservatórios hidráulicos, mostram que conforme aumenta a altura, a vazão diminui, sem visualizar-se a intercepção do eixo, devido às limitações da bomba em trabalhar com pequenas pressões e grandes alturas. A altura variável do reservatório de sucção influência nos valores de saída coletados.

O segundo experimento, se realizou restituindo o fluido diretamente ao reservatório hidráulico da bomba, de modo que o fluxo e nível de água permaneciam quase constante no reservatorio de sucção da bomba. Para cada rotação corresponde

uma tensão elétrica constante de alimentação da bomba. Foram realizados três ensaios para cada altura determinada, após a coleta dos ensaios realizou-se o processamento de dados. O Qd. 4 resume os dados obtidos nos ensaios usando o mesmo reservatório hidráulico de entrada e saída do fluido.

Quadro 4: Resultados dos ensaios da bomba usando o mesmo reservatório para o fluido

Ensaio com um reservatório	Velocidade de rotação 4200 rpm (24 V)		Velocidade de rotação 3600 rpm (20 V)		Velocidade de rotação 3000 rpm (15 V)	
	Vazão (m ³ /s)	Altura (m)	Vazão (m ³ /s)	Altura (m)	Vazão (m ³ /s)	Altura (m)
1	0,000200	0,89	0,000168	0,88	0,000136	0,87
2	0,000199	1,13	0,000165	1,12	0,000133	1,14
3	0,000199	1,39	0,000165	1,36	0,000133	1,37
4	0,000198	1,62	0,000165	1,61	0,000133	1,62
5	0,000190	1,88	0,000158	1,85	0,000128	1,88
6	0,000182	2,20	0,000151	2,20	0,000119	2,20
7	0,000176	2,65	0,000145	2,65	0,000111	2,65
8	0,000167	3,00	0,000140	3,00	0,000101	3,00
9	0,000159	3,60	0,000131	3,60	-	-
10	0,000147	4,10	0,000117	4,10	-	-

Fonte: Do autor

O comportamento da bomba de vazão vs altura com um reservatório, mostra uma tendência melhor ao de dois reservatórios conforme se aumenta a altura, a vazão diminui, isso se deve ao fato que o nível da altura de sucção foi mais constante que com dois reservatórios hidráulicos. A Fig. 16 mostra os resultados da vazão versus a altura da bomba em teste.

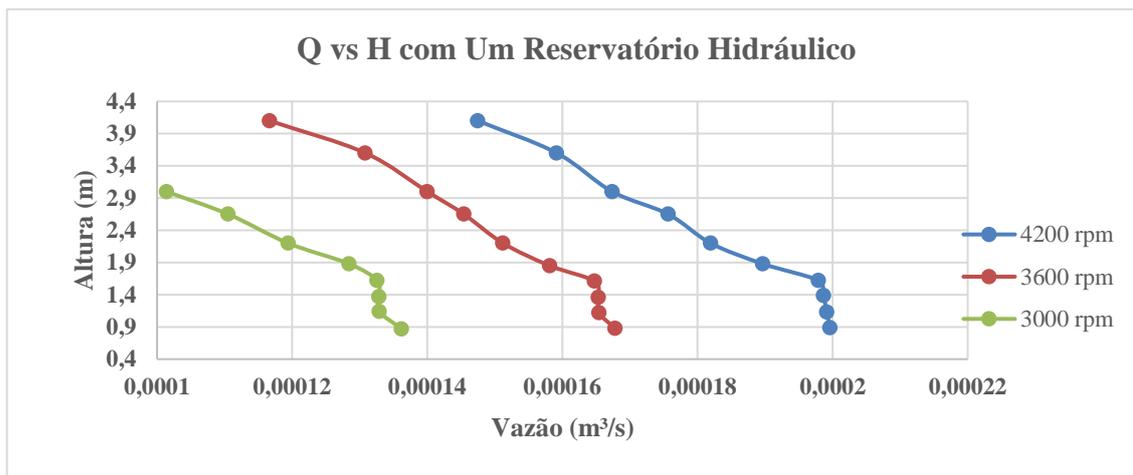


Figura 16: Curva da bomba para três velocidades de vazão vs altura usando o mesmo reservatório hidráulico

Fonte: Do autor

Os resultados para determinar o rendimento da bomba com dois reservatórios hidráulicos são mostrados na Qd. 5, de maneira resumida.

Quadro 5: Resultados dos ensaios de vazão, altura e rendimento usando dois reservatórios

Ensaio com dois reservatórios	Velocidade de rotação 4200 rpm (24 V)			Velocidade de rotação 3600 rpm (20 V)			Velocidade de rotação 3000 rpm (15 V)		
	Q (m³/s)	H (m)	η_t	Q (m³/s)	H (m)	η_t	Q (m³/s)	H (m)	η_t
1	0,000207	0,89	0,10	0,000172	0,88	0,14	0,000141	0,87	0,22
2	0,000206	1,13	0,13	0,000173	1,12	0,18	0,000140	1,14	0,28
3	0,000205	1,39	0,16	0,000172	1,36	0,22	0,000141	1,37	0,34
4	0,000204	1,62	0,18	0,000171	1,61	0,25	0,000136	1,62	0,39
5	0,000198	1,88	0,21	0,000168	1,85	0,29	0,000126	1,88	0,45
6	0,00019	2,20	0,23	0,000162	2,20	0,34	0,000118	2,20	0,44
7	0,00018	2,65	0,24	0,000159	2,65	0,35	0,000112	2,65	0,44
8	0,000173	3,00	0,25	0,000152	3,00	0,37	0,000102	3,00	0,42
9	0,000166	3,60	0,26	0,000144	3,60	0,38	-	-	-
10	0,000153	4,10	0,27	0,000123	4,10	0,37	-	-	-

Fonte: Do autor

A curva da bomba de vazão (Q), vs rendimento (η_t), para três velocidades, são mostradas na Fig. 17, nela se observa que os maiores rendimentos estão na menor velocidade, mas com um rendimento máximo pequeno.

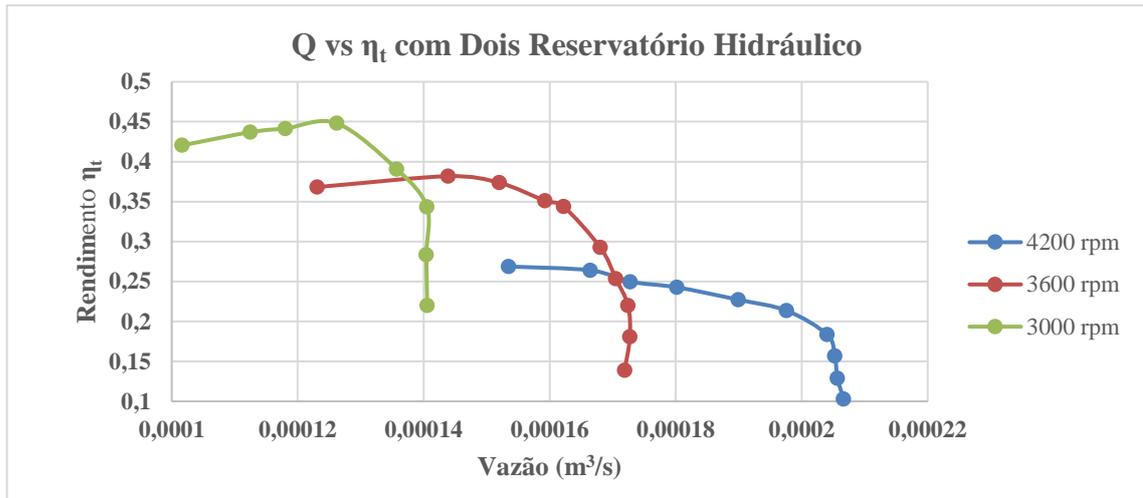


Figura 17: Curva da bomba para três velocidades de vazão vs rendimento para 2 reservatórios hidráulico
Fonte: Do autor

A curva da bomba de altura (h), vs rendimento η_t , se mostra na Fig. 18 mostra o comportamento da altura vs rendimento da bomba para três velocidades.

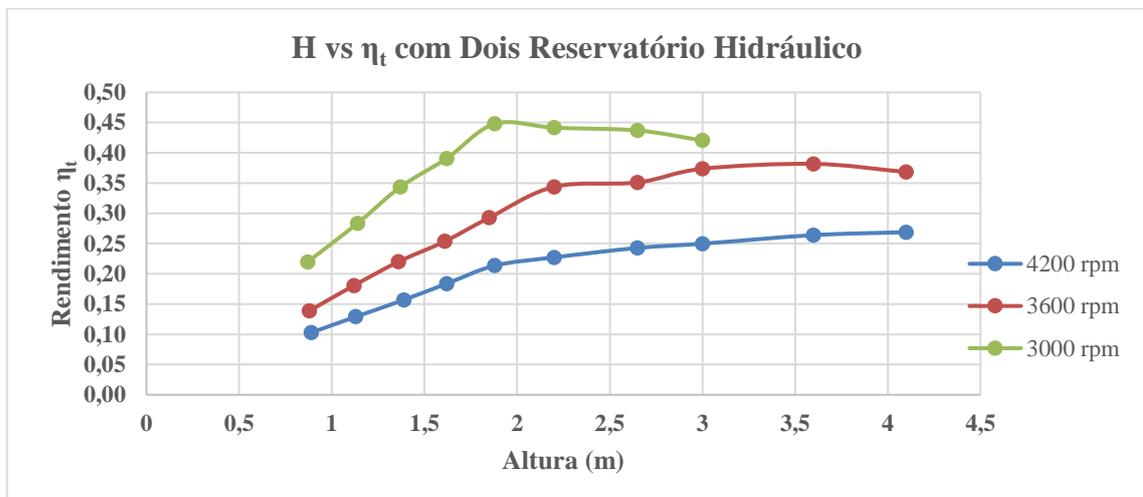


Figura 18: Curva para três velocidades de altura vs rendimento para dois reservatórios
Fonte: Do autor

Em relação ao gráfico de altura (H) vs rendimento (η_t) da Fig. 18, para dois reservatório hidráulico, os resultados do rendimento comporta-se de maneira semelhante ao de um reservatório hidráulico. O melhor rendimento foi com a menor velocidade (3000 rpm), linha verde do gráfico. nota-se que quando chega em uma certa altura o rendimento comessa a cair.

Os resultados do rendimento da bomba com 1 reservatório hidráulico, são mostrados no Qd. 6.

Quadro 6: Resultado dos ensaios de vazão, altura e rendimento usando o mesmo reservatório

Ensaio com o mesmo reservatório	Velocidade de rotação 4200 rpm (24 V)			Velocidade de rotação 3600 rpm (20 V)			Velocidade de rotação 3000 rpm (15 V)		
	Q (m ³ /s)	H (m)	η_t	Q (m ³ /s)	H (m)	η_t	Q (m ³ /s)	H (m)	η_t
1	0,0002	0,89	0,10	0,000168	0,88	0,14	0,000136	0,87	0,17
2	0,000199	1,13	0,13	0,000165	1,12	0,18	0,000133	1,14	0,21
3	0,000199	1,39	0,15	0,000165	1,36	0,22	0,000133	1,37	0,25
4	0,000198	1,62	0,18	0,000165	1,61	0,25	0,000133	1,62	0,30
5	0,00019	1,88	0,20	0,000158	1,85	0,28	0,000128	1,88	0,36
6	0,000182	2,20	0,21	0,000151	2,20	0,30	0,000119	2,20	0,37
7	0,000176	2,65	0,22	0,000145	2,65	0,32	0,000111	2,65	0,36
8	0,000167	3,00	0,23	0,000140	3,00	0,32	0,000101	3,00	0,34
9	0,000159	3,60	0,25	0,000131	3,60	0,32	-	-	-
10	0,000147	4,10	0,25	0,000117	4,10	0,31	-	-	-

Fonte: Do autor

Os resultados da curva da bomba de vazão (Q) vs rendimento (η_t), usando o mesmo reservatório na saída e chegada do fluido é mostrada na Fig. 19. O comportamento mostra que com pequenas variações de altura a vazão é quase a mesma, mas quando se modificou em maiores alturas a tendência aumenta.

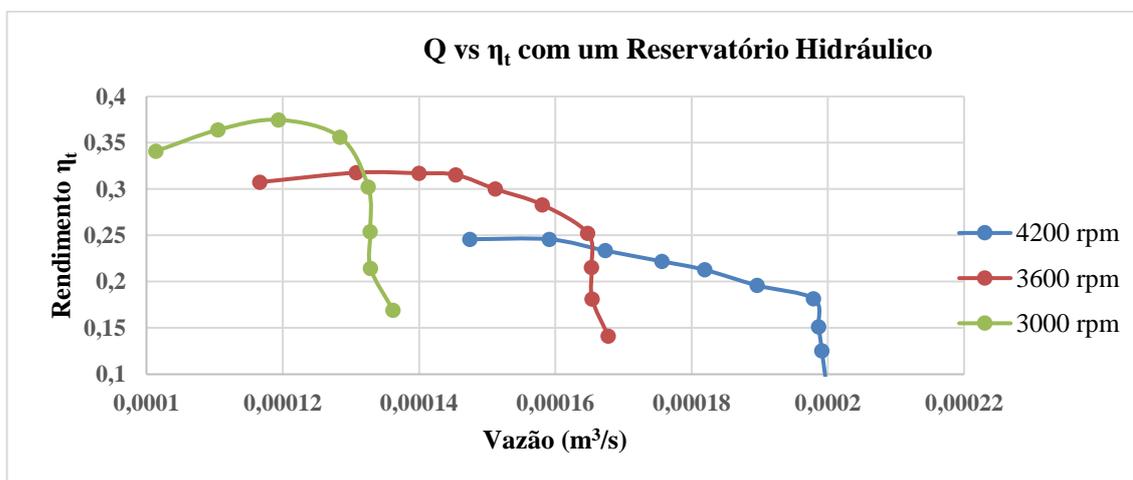


Figura 19: Curva para três velocidades de vazão vs rendimento para um reservatório
Fonte: Do autor

Na Fig. 20 se mostra o comportamento altura (H) vs rendimento (η_t). O resultado do rendimento comporta-se de maneira semelhante ao de dois reservatórios hidráulicos, mas os valores do rendimento foram menores para as três velocidades. Na menor velocidade (3000 rpm), o melhor rendimento foi de 0,37 com um reservatório

e com dois reservatórios chegou até 0,45, dando uma diferença de 8% maior com dois reservatórios

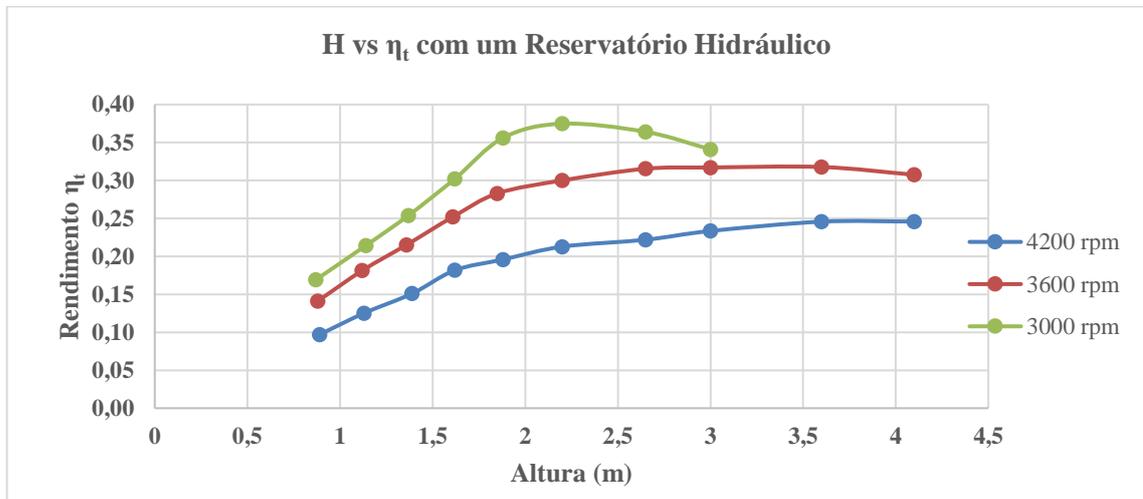


Figura 20: Curva para três velocidades de altura vs rendimento com um reservatório
Fonte: Do autor

Com a bancada foi possível observar o comportamento da curva característica da bomba ao visualizar-se as curvas característica da bomba de vazão vs altura, vazão vs rendimento e altura vs rendimentos, observando-se tendências similares mas com valores diferentes. Com menores velocidades de rotação, aumentou seu rendimento, sem explorar até onde consegue melhorar o desempenho da bomba. A calibração permitiu usar os sensores e obter os valores no computador em tempo real, mas foi necessário o processamento de dados em excel para construir as curvas, resultados do funcionamento da bomba.

7 CONCLUSÃO

Foram encontrados equipamentos de ensaios com baixo custo, peso e transportável, porém com algumas limitações nos custos das placas de aquisição de dados, mas com a grande vantagem de realizar experimentos de fácil e rápida execução.

Com esta banca didática os cursos de engenharia mecânica e engenharia elétrica poderão utilizar para demonstração em sala de aula ou laboratório como se calculam as potências, os rendimentos de uma bomba. Também explorar o



rendimento em função das velocidades e a capacidade dos equipamentos e a instalação.

O dilema de colocar um ou dois reservatórios hidráulicos na bancada foi observado com resultados quantitativos. Com dois reservatórios se obteve o melhor rendimento, mas foi necessário controlar o nível de água na entrada, devido ao fato que a tendência da curva se modifica.

Para realizar vários ensaios em diferentes velocidades e alturas, foram consideradas várias amostras, já que os valores se modificam entre um e outro ensaio, sendo necessário trabalhar com os valores médios.

Com o projeto realizado, verificou-se que os resultados foram positivos em relação às leituras dos sensores, que se mostraram eficazes e alinhados. Pode-se dizer que o projeto alcançou seus resultados iniciais, que tinha como objetivo trazer toda uma metodologia para desenvolver a instrumentação e a aquisição dos dados de uma bancada didática.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Aperfeiçoamento da bancada didática, melhorar o sistema de alimentação da bomba com uma fonte externa podendo variar a tensão de entrada, o sistema de suporte da mangueira onde se coleta os dados da altura;
- Colocar um sistema que funcione com várias bombas de maneira que se consiga realizar instalações que funcionem com bombas em serie e paralelo;
- Determinar a velocidade nominal da bomba.

REFERÊNCIAS

ALBERTAZZI, A. SOUSA, A. R. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. Barueri, São Paulo: Editora Manole, 2008.

ALÉ, Jorge A. **Sistemas fluidodinâmicos: sistemas de bombeamento**, apostila da faculdade de engenharia. Pontifícia universidade católica do Rio Grande do Sul, 2010.



ASSUNÇÃO, J. T.; Leão, P. C. A.; ASSUNÇÃO, T. C. B. N. **Proposta de uma bancada de bombas hidráulicas para avaliação da eficiência**: Conferência de energética em consumidores industriais, CE brasileiras: Eficiência energética em sistemas de bombeamento, 2005.

BAHNER, M. A. **Practical overview of level measurement technologies**: instrumentation and control resources. 2001. p. 1-9.

BALARIM, Carlos R. et al. Custo de bombas centrífugas funcionando como turbinas em microcentrais hidrelétricas. **Eng. Agríc.** Jaboticabal, v. 24, n. 1, p. 219-225, jan./abr. 2004.

BARBOSA, Bruno H. **Instrumentação, modelagem, controle e supervisão de um sistema de bombeamento de água e módulo turbina-gerador**. 2006. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Departamento de Engenharia eletrônica, Universidade Federal de Minas Gerais.

CASSIOLATO, César; ORELLANA, Evaristo. **Medição de vazão**. Disponível em: <<http://www.smar.com/newsletter/marketing/index40.html>>. Acesso em: 20 ago. 2015.

DELMEÉ, G. J. **Manual de medição de vazão**. 3. ed. Editora Edgard Blücher Ltda, 2003.

FERREIRA, L. G.; ASSUNÇÃO, J. C. Graficbomb. Software para cálculos hidráulicos e custos de bombeamento. **Irriga**, Botucatu, v. 20, n. 4, p. 694-704, out./dez. 2015.

INSTRUMENTS, N. **National Instruments Brasil**: Sobre a National Instruments. Disponível em: <<http://www.ni.com/brazil>>. Acesso em: 20 ago. 2015.

HENN, ÉRICO ANTÔNIO LOPES. **Máquinas de Fluido**. 2. ed. Editora UFSM, 2006. Disponível em: <http://inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/vim_2012.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2015.

MONTERREY, N. L. **Turbomáquinas hidráulicas**: princípios fundamentais. 1974.

MARTINEZ, C. B. **Tópicos de Hidráulica Aplicada**: Departamento de hidráulica e recursos hídricos. UFMG, 1996.



RIBEIRO, M. A. **Instrumentação**. 9. ed. Salvador: Tek Treinamento & Consultoria Ltda, 2002.

SOLAINY, M. et al. **Medidor de vazão coriólis**. Disponível em:
<<http://vidadestutante.blogspot.com.br/2012/10/medidor-de-vazao-coriolis.html>>.
Acesso em: 26 ago. 2015.

THOMAZZINI, D. Albuquerque, P. U. B. de. **Sensores industriais: fundamentos e aplicações**. 6. ed. São Paulo: Érica, 2009.

WEBSTER, J.G. **Measurement, instrumentation and sensors handbook**. EUA: CRC, 1999.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por sempre me iluminar nas horas mais difíceis e minha família por sempre me apoiar na conclusão do curso.

Ao meu orientador, professor Elvys Isaias Mercado Curi, pelas horas prestadas para o desenvolvimento do trabalho. Ao bolsista Rodrigo pela ajuda na realização dos ensaios e pela troca de conhecimentos durante os ensaios.