



21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

PROJETO DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA ENSAIOS DE PICO TURBINAS HIDRÁULICAS

Altamir Crhistian dos Santos Barros, altamir.ufopa@gmail.com¹
Lazaro João Santana da Silva, lazarojss@yahoo.com.br²

¹Universidade Federal do Oeste do Pará, Rua Vera Paz s/n° (Unidade Tapajós), Bairro Salé, CEP:68035-1110.

² Universidade Federal do Oeste do Pará, Rua Vera Paz s/n° (Unidade Tapajós), Bairro Salé, CEP:68035-1110.

Resumo: As bancadas didáticas favorecem a fluidez do processo de ensino-aprendizagem e a melhoria da qualidade da educação técnica, estimulando a aquisição do conhecimento. Através da bancada, os alunos ainda no ambiente da Universidade, podem aplicar o conteúdo de várias disciplinas, tendo contato direto com um processo real, considerando que a bancada didática é um modelo em escala reduzida de um sistema de conversão de energia e pode ter a mesma complexidade operacional de um sistema real, fornecendo uma experiência mais tangível a realidade e motivadora, enriquecendo a sua formação profissional e consequentemente o desenvolvimento na região. O presente trabalho apresenta uma proposta de projeto, contendo especificação de todo o aparato de equipamentos eletromecânicos e dos componentes do circuito hidráulico incluindo o sistema de medição das grandezas físicas que servirão de escopo para a construção de uma bancada didática para ensaio de pico turbinas hidráulicas para os cursos de Bacharelado em Engenharia Física com ênfase em energia e Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal do Oeste do Pará - UFOPA, em especial para atendimento às disciplinas do curso que de alguma forma tratam com processos envolvendo a conversão de energia hidráulica em energia elétrica e formas de controle.

Palavras-chave: turbinas hidráulicas, turbina indalma, bancada de didática.

1. INTRODUÇÃO

Apesar da região amazônica, possuir grande potencial energético, as longas distâncias e o difícil acesso às comunidades inviabilizam o fornecimento de energia elétrica, por parte da concessionária e/ou dos programas de eletrificação do governo federal, a uma parte significativa da população local. Essas comunidades em geral utilizam geradores a diesel para produção de energia elétrica, porém devido ao alto custo do diesel, dificuldade de transporte que é feito por via terrestre em estradas precárias ou por pequenas embarcações, que também utilizam o diesel como combustível e desta forma aumentam o consumo de combustível, e contribuição para os índices de poluição pela queima do combustível de acordo com (ANP, 2015). Os empreendimentos com micro geração hídrica são importantes alternativas para solucionar este problema. De acordo com (Filho, 2006) a implantação de pequenas centrais hidrelétricas ao longo de rios da região e aproveitamento do fluxo d'água para conversão de energia, configurando pequenos pontos de geração descentralizada que geram impactos ambientais reduzidas em comparação à geração em grande escala e centralizada, estes empreendimentos são uma importante estratégia para o desenvolvimento de comunidades isoladas.

Como na maioria das propriedades rurais e comunidades isoladas do País não há disponibilização de energia elétrica pela rede de distribuição. De acordo com (MME, 2015), o Brasil tem intensificado as políticas públicas para levar energia elétrica às comunidades isoladas como forma de proporcionar o desenvolvimento e a inclusão social através do Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica – Luz para Todos.

De acordo com (UFOPA, 2015) o curso de Bacharelado em Engenharia Física da UFOPA surge com a proposta de desenvolvimento de tecnologias sustentáveis no campo da geração de energia, automatização e materiais, aproveitando os recursos naturais da maneira mais ambientalmente aceitável para a região amazônica, o curso proporciona uma formação com foco na inovação tecnológica, pesquisa e extensão direcionado para o desenvolvimento de novas fontes de energia, novos materiais, automatização e aperfeiçoamento das tecnologias já existentes, baseando-se em características não poluentes, flexíveis e concordantes com o contexto amazônico existente.

Nesse sentido, a elaboração de um projeto de uma bancada didática de ensaio de pico turbinas hidráulicas está voltado para a melhoria do ensino de disciplinas dessa área no curso de Engenharia Física e, consequentemente atendendo diretamente a formação técnica de recursos humanos diante a demanda da região, nesta área, corroborando para isso a reconhecida importância da aplicação prática e experimental do estudo de turbinas hidráulicas nos cursos de graduação, reforçado pelo contexto atual em termos de geração e aproveitamento de energia (Martinez & Nascimento, 2001).

Este trabalho faz parte do projeto Pró-Amazônia: Biodiversidade e Sustentabilidade, que vigora em parceria com as seguintes instituições: Universidade Federal do Pará – UFPA; Universidade Federal do Oeste do Pará - UFOPA; Universidade de Brasília - UNB e a Indalma, sediada em Santarém, Pará, sendo que esta última é uma fabricante de turbinas que já instalou cerca 44 pico centrais e 12 micro centrais hidrelétricas na região, desde 2001, segundos resultados disponíveis em Filho *et al.* (2006). O projeto tem como objetivos: o desenvolvimento de tecnologias em turbinas hidráulicas para geração de energia na Amazônia; a formação de pessoal altamente capacitado na área; o fortalecimento da pós-graduação na área nas instituições envolvidas, com integração às atividades de graduação.

O presente trabalho visou o estudo e elaboração do projeto de uma bancada didática baseada na conversão da energia hidráulica a partir de pico centrais hidrelétricas, classificadas na Tab. 1. A proposta é que a estrutura laboratorial da bancada, com características similares aos sistemas reais, permita que o estudante tenha a oportunidade de entender o processo de conversão de energia no seu todo, podendo experimentar ou aplicar o conteúdo de diversas disciplinas como: mecânica dos fluidos, turbo máquinas, energias renováveis, pequenas centrais hidrelétricas, métodos numéricos e experimentos com escoamentos de fluidos, medição de vazão e simulação de perda de carga, além de analisar e tratar problemas de engenharia com vários níveis de profundidade. Pois, sabe-se que um sistema de conversão de energia em escala reduzida pode ter a mesma complexidade operacional de um sistema real. Dessa forma, é imperativo que se faça o projeto adequado com todas as características de dimensionamento e especificações de equipamentos e de instalações para posterior implantação da bancada.

Classificação	Potência
Grandes Centrais Hidrelétricas (GCH)	Acima de 50 MW
Médias Centrais Hidrelétricas (UHE)	De 30 e 50 MW
Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH)	De 1 e 30 MW
Mini Centrais Hidrelétricas (mCH)	De 100 até 1000 kW
Micro Centrais Hidrelétricas (μCH)	De 20 até 100 kW
Pico Centrais Hidrelétricas (πCH)	Até 20 kW

Tabela 1 – Classificação das centrais hidrelétricas - Filho *et al.* (2006) *apud* Oliveira (2014)

2. OBJETIVOS

Projetar uma bancada didática de ensaio de pico turbinas hidráulicas para os cursos de Engenharia Física e Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal do Oeste do Pará, inicialmente o projeto prevê o ensaio de uma turbina Indalma de 6”(polegadas), com a possibilidade do acoplamento de uma mesa elevadora para que seja feito o alinhamento do eixo de uma família de turbina com o eixo da tubulação. Esta família de turbinas leva em consideração variações nas dimensões do rotor Indalma. Também, através dessa facilidade, permitirá o ensaio de turbinas de outros desenvolvedores buscando com isso o levantamento de curvas que possam parametrizar o funcionamento dessas máquinas.

2.1. Objetivos Específicos

- Oferecer aos acadêmicos conhecimentos a cerca dos elementos eletromecânicos e elétricos que são necessários para a composição de uma pico central hidrelétrica;
- Permitir aos estudantes a compreensão dos aspectos envolvidos nos processos de conversão e aproveitamento de energia e todo seu conjunto;
- Contribuir para o processo de união dos conceitos teóricos e aplicações práticas, além de capacitar o corpo discente a tratar problemas de engenharia com vários graus de complexidade. E desta forma, contribuir para o desenvolvimento na região.

3. METODOLOGIA

Inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica acerca dos processos de implantação e desenvolvimento de bancadas didáticas, servindo de base para a elaboração do projeto. A metodologia proposta é fundamentada a partir da necessidade de implementação de uma banca didática para servir de suporte experimental às disciplinas dos cursos de bacharelado em Ciência e Tecnologia e bacharelado em Engenharia Física, aliado a isso, ainda há a necessidade de estudar o comportamento da turbina Indalma sob novas condições de trabalho, para isso será utilizada uma turbina Indalma de 6”, diferentemente da mais utilizada (4”) que a empresa, com sede em Santarém-PA e parceira do Projeto

Pro-Amazônia, fabrica e instala na região amazônica. Segundo (Santander, 2014) a turbina Indalma pode ser construída com diâmetro de entrada e de saída de fluxo de 4 até 25”.

Em seguida, foi feita a especificação dos equipamentos e instalações (eletromecânicos e circuito hidráulico) com base em (Oliveira, 2014; Santander, 2014) e foi indicado um espaço para a construção da bancada, que ficou definido como sendo o laboratório de turbo máquinas da Universidade Federal do Oeste do Pará - UFOPA, que está sendo construído em parceria com as Centrais Elétricas do Norte – ELETRONORTE e ficará localizado na base científica da hidrelétrica de Curuá-una, logo em seguida foi desenvolvido o projeto em 2D utilizando o software AutoCad 2015, versão para estudante, locando todos os componentes (conjunto motor-bomba, tubulação, freio de prony, medidores de vazão, válvulas, conexões e reservatórios).

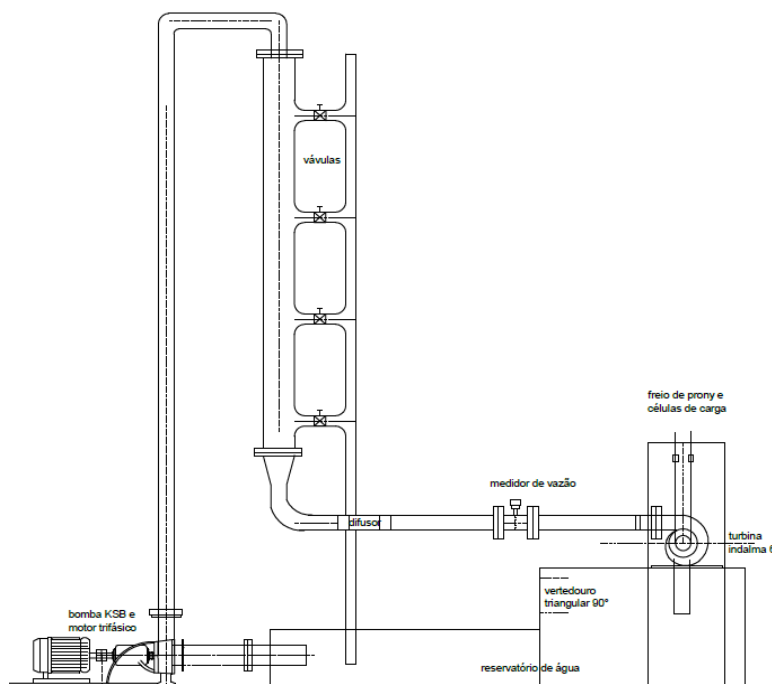


Figura 2. Representação em 2D da Bancada Didática

Consultamos o Projeto Pedagógico do curso de Engenharia Física (UFOPA, 2015) e identificamos o conjunto de disciplinas que poderiam usufruir da bancada, que uma vez implementada, dará suporte ao curso durante a formação do aluno a partir do quarto semestre, e será possível o aluno desenvolver atividades experimentais, efetuando medições e calculando as variáveis necessárias e desta forma compreender melhor todo o processo de conversão de energia. A bancada ainda poderá servir de suporte a pesquisa, sendo possível o desenvolvimento de projetos de iniciação científica, trabalho de conclusão de curso e até mesmo pós-graduação, como prevê o projeto Pró-Amazônia.

Após a conclusão das especificações dos equipamentos, foi feito um levantamento de custos incluindo os principais componentes do projeto Tabela 2.

Equipamento	Quantidade	Preço
Inversor de frequência WEG CFW09	1	R\$ 5.000,00
Motor elétrico WEG 40 Cv	1	R\$ 3.000,00
Bomba MEGANORM 200-150-250	1	R\$ 18.000,00
Turbina Indalma 6"	1	R\$ 17.000,00
Células de Carga MK	2	R\$ 291,00
Sensor indutivo JNG	1	R\$ 100,00
Válvulas de esfera de 4"	4	R\$ 2.900,00
Medidores de pressão WIKA	2	R\$ 790,00
Medidor de vazão volumétrica 6"	1	R\$ 11.000,00
TOTAL		R\$ 58.081,00

Tabela 2 – Levantamento inicial de custos

4. REFERENCIAL TEÓRICO

Um fluido pode ser definido como uma substância que se deforma continuamente, sob a ação de uma tensão de cisalhamento (tangencial) por menor que seja. Os fluidos compreendem as fases líquidas e gasosas (ou de vapor). Sendo

assim, a principal característica dos fluidos, esta relacionada à propriedade de não resistir à deformação e apresentar a capacidade de fluir. A distinção entre um fluido e o estado sólido da matéria é clara quando é feita a comparação dos seus comportamentos (Fox, 2006). Convém-nos estudar especificamente o comportamento dos fluidos em sua fase líquida, considerando o que o nosso fluido de trabalho é água limpa.

Basicamente, os fluidos podem ser classificados de duas maneiras distintas: os que obedecem à equação da proporcionalidade Eq. (1), ou seja, no qual ocorre uma relação linear entre o valor da tensão de cisalhamento aplicada e a velocidade de deformação resultante, o coeficiente de viscosidade dinâmica μ constante, são denominados de fluidos newtonianos, inclusive a água, líquidos finos e os gases em geral. Os fluidos que não respeitam a essa equação são denominados fluidos não-newtonianos e costumam ser encontrados nos problemas reais de engenharia civil, são exemplos a lama e o lodo. Nesse tipo de fluido, não existe relação linear entre a tensão de cisalhamento aplicada e a velocidade de deformação angular (Netto, 2007). Os fluidos podem ser ainda ser classificados como incompressíveis, quando o fluido apresenta resistência à redução de volume próprio, ou compressíveis quando o fluido responde com uma redução de seu volume próprio ao ser submetido à ação de uma força. (Brunetti, 2008).

$$\sigma = \frac{F}{A} = \mu = \frac{\Delta V}{y} \quad (1)$$

Para analisar o comportamento físico dos fluidos e suas propriedades, costuma-se utilizar o estudo de mecânica dos fluidos contando com o auxílio das leis fundamentais da física e mecânica, como lei do movimento de Newton, a da conservação da massa, a primeira e a segunda lei da termodinâmica. O estudo de mecânica dos fluidos é dividido basicamente em dois ramos, a estática dos fluidos e dinâmica dos fluidos. A estática dos fluidos estuda as propriedades e leis físicas que regem o comportamento dos fluidos livre da ação de forças externas, ou seja, neste caso o fluido esta em repouso ou ainda em deslocamento, porém com velocidade constante, por outro lado, a dinâmica dos fluidos estuda o comportamento dos fluidos em regime de movimento acelerado no qual se faz presente a ação de forças externas responsáveis pelo transporte de massa.

4.1 Propriedades dos fluidos

Os fluidos apresentam algumas características importantes para os estudo de diversos fenômenos ou problemas em engenharia, de acordo com (Fox, 2006; Netto, 2007).

- i. **Massa específica (ρ):** A massa de um fluido é denominada de densidade absoluta, também conhecida com massa específica que é representada em (Kg/m^3) em função da relação massa/volume de acordo com a Eq. (2).

$$\rho = m/V \quad (2)$$

- ii. **Peso específico (γ):** É o peso da unidade de volume do fluido representado em (N/m^3). Nos líquidos varia muito pouco com a pressão, porém tem acentuada variação de acordo com a temperatura, já para os gases pressão e temperatura influenciam muito na variação deste valor, de acordo com as Eq. (3) para líquidos, onde G = peso e V = volume e Eq. (4) para gases, onde P = pressão absoluta (Kgf/m^2), R =constante do gás e T = temperatura absoluta ($^{\circ}C$).

$$\gamma = G/V \quad (3)$$

$$\gamma = P/RT \quad (4)$$

Podemos obter a relação de massa específica e peso específico, de acordo com a Eq. (5).

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{m}{V} g \rightarrow \gamma = \rho g \quad (5)$$

- iii. **Peso específico relativo (γ_r):** Não possui unidades, é um número puro, escrito a partir da relação representada pela Eq. (6).

$$\gamma_r = \frac{G}{G_{H_2O}} \quad (6)$$

Fazendo Eq. (7), obteremos a Eq. (8) que resultara na eq. (9) que representa (γ_r).

$$\gamma = \frac{G}{V} \rightarrow G = \gamma V \quad (7)$$

$$\gamma_{H_2O} = \frac{G_{H_2O}}{V} \rightarrow G_{H_2O} = \gamma_{H_2O} V \quad (8)$$

$$\gamma_r = \frac{G}{G_{H_2O}} = \frac{\gamma V}{\gamma_{H_2O} V} \quad (9)$$

- iv. **Volume específico (V_s):** É dado pela relação G/V , sendo inversamente proporcional γ de acordo com a Eq. (10).

$$V_s = \frac{V}{G} = \frac{1}{\gamma} \quad (10)$$

4.2 Hidrostática

A hidrostática ou estática dos fluidos é uma ramificação da mecânica dos fluidos que estuda o comportamento de fluidos em condições de equilíbrio estático, para o estudo e solução de problemas relacionados à pressão estática e escalas de pressão, é importante o conhecimento de alguns conceitos fundamentais.

Pressão (P): A pressão média aplicada sobre uma superfície pode ser definida pela relação da força aplicada e a área da superfície, sendo assim, pode-se efetuar o seu cálculo numericamente de acordo com a Eq. (11).

$$P = \frac{F}{A} \quad (11)$$

Considerando toda a área, o efeito da pressão produzirá uma força resultante (empuxo) que será igual à Densidade do fluido (df) vezes o volume do fluido deslocado (vfd) vezes a aceleração da gravidade (g), podendo ser calculado pela Eq. (12).

$$E = df \times vfd \times g \quad (12)$$

Lei de Pascal: O princípio de Pascal, foi uma significativa contribuição prática para o estudo de mecânica dos fluidos, tratando de problemas que envolvem a transmissão e a amplificação de forças através da pressão aplicada a um fluido. Seu enunciado diz que quando um ponto de um líquido em equilíbrio sofre uma variação de pressão, todos os pontos também sofrem a mesma variação. Conforme (Brunetti, 2008) “A pressão aplicada num ponto de um fluido em repouso transmite-se integralmente a todos os pontos do fluido”. Essa propriedade dos fluidos, expressa pela lei de Pascal, é utilizada por diversos dispositivos tanto para amplificar forças como para transmiti-las de um ponto a outro.

Teorema de Stevin: O teorema de Stevin, também é conhecido com o teorema fundamental da hidrostática e sua definição é muito importante quando buscamos determinar a pressão atuante em qualquer ponto de uma coluna de líquido. De acordo com, (Netto, 2007) a lei enunciada diz que “A diferença de pressões entre dois pontos da massa de um líquido em equilíbrio é igual à diferença de profundidade multiplicada pelo peso específico do líquido”, desta forma, podemos representar o enunciado pela Eq. (13).

$$\Delta P = \rho g \Delta h \quad (13)$$

4.3 Hidrodinâmica

A hidrodinâmica é uma ramificação da mecânica dos fluidos que tem como objetivo o estudo dos movimentos e a vazão da massa fluida. Os movimentos dos fluidos é um fenômeno conhecido com escoamento, que são definidos por parâmetros físicos e o comportamento destes ao longo do tempo, de acordo com esses parâmetros podem-se classificar os tipos de escoamento (laminar ou turbulento) o que facilita seu estudo e compreensão.

Para isso, é fundamental o conhecimento dos conceitos vazão, escoamento e as equações que regem o movimento dos fluidos. A partir da segunda lei de Newton ($F=ma$), podemos obter a equação de Bernolli e aplica-la ao estudo de escoamentos. Este ramo da mecânica dos fluidos será de grande importância para a realização de estudos com o auxílio da bancada didática.

Vazão volumétrica (Q_v): É a relação entre volume de fluido que atravessa uma superfície e o tempo necessário para atravessá-la, a forma mais simples de representar a vazão volumétrica de um fluido é demonstrada na Eq. (14). Pela relação de volume por unidade de tempo (V/t). De maneira semelhante, podemos definir os conceitos de dois outros tipos importantes de vazão: **Vazão em massa (Q_m)** e **Vazão em peso (Q_w)**. A vazão em massa é caracterizada pela massa de fluido que escoar em um determinado intervalo de tempo, podendo ser representada pela Eq. (15). A vazão em peso caracteriza-se pelo peso do fluido que escoar em um determinado intervalo de tempo, representado na Eq. (16).

$$Q_v = V/t \quad (14)$$

$$Q_m = m/t \rightarrow Q_m = \rho \cdot Q_v \quad (15)$$

$$Q_w = W/t \rightarrow Q_w = \gamma \cdot Q_v \quad (16)$$

Outro fator de fundamental importância é o escoamento, que de acordo com (Fox, 2006) pode ser classificado como: escoamento laminar ou turbulento; compressível ou incompressível, interno ou externo, sendo que o escoamento **laminar** é aquele no qual as partículas fluidas se movem em camadas lisas, já o escoamento **turbulento** é aquele no qual as partículas rapidamente se misturam, enquanto se movimentam ao longo do escoamento; quando se tem um escoamento onde as variações da massa específica são desprezíveis, este é dito **incompressível**, como as variações na massa específica não podem ser desprezadas diz-se escoamento **compressível**, já o escoamento **interno** é definido como escoamento que ocorre completamente envolto por superfícies sólidas, de forma semelhante, o escoamento externo é aquele sobre corpos imersos em um fluido não contido.

4.4 A equação de Bernoulli

Daniel Bernoulli, a partir de considerações de energia aplicada ao escoamento de fluidos, conseguiu estabelecer a equação fundamental da hidrodinâmica, na qual, correlaciona pressão, velocidade e a altura em pontos de uma linha de corrente, sendo de grande aplicabilidade em mecânica dos fluidos. De acordo com (Munson, 2004) podemos representá-la com demonstrado na Eq. (17), para este caso a equação foi aplicada entre dois pontos de uma linha de corrente, (1) e (2), sendo que o escoamento foi considerado como invíscido, incompressível em regime permanente.

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \gamma z_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \gamma z_2 \quad (17)$$

A equação de Bernoulli possui várias aplicações, um caso específico e interessante para análise é a aplicação utilizada (Oliveira, 2015), de acordo com (ABNT, 1990). Onde foi manipulada a equação de Bernoulli em função da pressão, velocidade média e nível topográfico, na entrada e na saída da turbina, e posterior determinação da altura de queda líquida H disponível, de acordo com a Eq. (18). Considerando a potência hidráulica (P_h) calculada de acordo com (ABNT, 1990), representada pela Eq. (19).

$$H = \left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} \right)_1 - \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} \right)_2 \quad (18)$$

$$P_h = \gamma \cdot Q \cdot H \quad (19)$$

De posse dessas informações, é possível encontrar numericamente os valores para a potência, perdas de carga, determinar tipos de escoamentos nas seções da bancada, bem como, o rendimento da turbina. Coube a esse tópico, apenas elencar pontos importantes para a realização de experimentos e estudos utilizando a bancada didática, cada um destes pontos podem ser estudados de maneira mais aprofundada, dependendo na necessidade ou experimentos específicos.

5. A BANCADA DIDÁTICA

A bancada foi projetada para ensaiar uma turbina Indalma (Figura 2), que foi desenvolvida e patenteada pela empresa Indalma, esta turbina possui fabricação artesanal, concebida empiricamente sendo seus componentes unidos por soldagem. Esse equipamento possui a finalidade de atender a demanda de energia de pequenas comunidades, sendo capaz de suportar as condições de trabalho típicas da região amazônica e apresenta bons rendimentos, considerando-se as alturas de quedas e vazões disponíveis na região. Os resultados disponíveis em Els *et al.* (2010), mostram que esta turbina já foi instalada em diversas localidades da região Norte do Brasil. Resultados disponíveis em Filho *et al.* (2006), mostram que o rendimento desta turbina é da ordem de 70%, no ponto ótimo de operação.



Figura 1. Vista isométrica turbina Indalma – Oliveira (2014)

A turbina Indalma é classificada como uma turbina de reação centrípeta-axial, desenvolvida empiricamente a partir de uma turbina Francis. Ela é composta de uma caixa espiral de seção transversal triangular desprovida de pás diretrizes, apropriada para pequenos aproveitamentos hidrológicos, e possui uma importante característica que é a ausência de distribuidor ou sistema mecânico sofisticado para controle de vazão e potência. A água é direcionada para um rotor composto de duas seções, na primeira seção as pás são constantes e dispostas na direção radial, enquanto que

no centro do rotor, a seção muda para uma disposição longitudinal onde ocorre escoamento axial (Oliveira, 2014; Santander, 2014).

Um dos métodos para registro de vazão será o uso do Medidor de Vazão Tipo Turbina – Série TVT, que possui um rotor balanceado individualmente e montado em um eixo disposto em posição axial ao fluxo de fluido. De acordo com o fabricante, a energia cinética do fluido é transferida ao rotor que gira em velocidade proporcional à velocidade do fluido. Um sensor eletrônico detecta a velocidade de rotação do rotor, informando o módulo eletrônico para medidor de vazão o qual indica a vazão e o volume totalizado em unidades de engenharia. A faixa de medição para o equipamento que será utilizado 6" é de 46,8 a 648,8 m³/h.

De acordo com a norma (ABNT, 1995) para vazões estimadas entre 30l/s e 300l/s é recomendado usar um vertedor triangular ou retangular, os quais oferecem a mesma precisão. O método do vertedouro triangular com abertura de 90° será usado pois a descarga será pequena e a medição da vazão direta, com a altura da coluna água definindo a vazão através da fórmula de Thompson.

$$Q = 1,4.H^{\frac{5}{2}} \quad (20)$$

Em que H é altura entre o vértice do triângulo e a linha d'água. A diferença entre o vértice e o fim do reservatório deverá ser maior ou igual a duas vezes H. para esta bancada, a vazão máxima será de 90 l/s, sendo o reservatório com capacidade de 3000 l, e a altura do vertedouro para esta vazão será de 0,334 m. A NBR 13403 estabelece que o método do vertedor pode ter um erro sistemático máximo de até 3%.

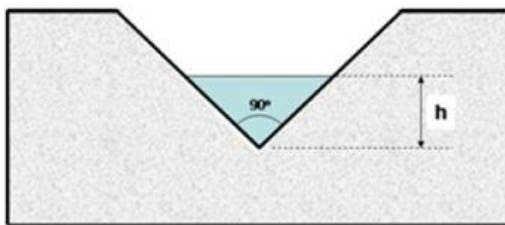


Figura 2. Vertedouro triangular com ângulo de abertura de 90° - Adaptado de Santander (2014)

Por meio da medição do torque e da velocidade de rotação do eixo da turbina na bancada pode-se obter a potência de saída da turbina hidráulica. Um dos métodos que pode ser utilizado é o freio tipo prony, semelhante ao freio de cinta de fricção mecânica, e o torque aplicado pode ser medido através de células de carga.

6. RESULTADOS OBTIDOS

6.1 Descrição da Bancada

Os equipamentos abaixo relacionados foram especificados a partir do dimensionamento da bancada, de acordo com o levantamento de informações feito na literatura e junto ao fabricante da turbina, onde se verificou a necessidade de ensaiar a turbina Indalma para uma altura de 20 mca, pois até o momento ainda não se tem resultados em laboratório para o comportamento da turbina operando nessa faixa de altura e vazão, a partir da implementação desta bancada será possível verificar a sua eficiência, bem como, ensaiar uma família de turbinas, variando apenas os aspectos construtivos do seu rotor, logo será possível analisar os resultados e verificar qual o melhor rotor, ou seja, o que apresenta melhor eficiência para esta faixa de operação. Foi elaborado projeto em 2D, em seguida, com base no modelo de instalação para ensaio de turbinas hidráulicas proposto por (Oliveira, 2014), foram feitas as adaptações necessárias, de acordo, o dimensionamento e especificações dos equipamentos.

1. Inversor de frequência WEG CFW09;
2. Motor WEG, trifásico, 1777 RPM, 40CV, 60Hz;
3. Bomba MEGANORM 200-150-250, Q = 324 m³/h, H = 20 mca
4. Turbina Indalma com diâmetro de entrada de 6";
5. Reservatório de água com capacidade de 3000l;
6. Medidores de pressão WIKA (0 a 0.25 Bar e 0 a 1 Bar);
7. Medidor de vazão volumétrica 6" tipo turbina, faixa de vazão 3240 a 8100 L/min;
8. Vertedor triangular 90°;
9. Células de carga da marca MK modelo CSA/ZL – 20;
10. Sensor indutivo JNG modelo LM8 – 3002NA;
11. Válvulas de esfera de 4".

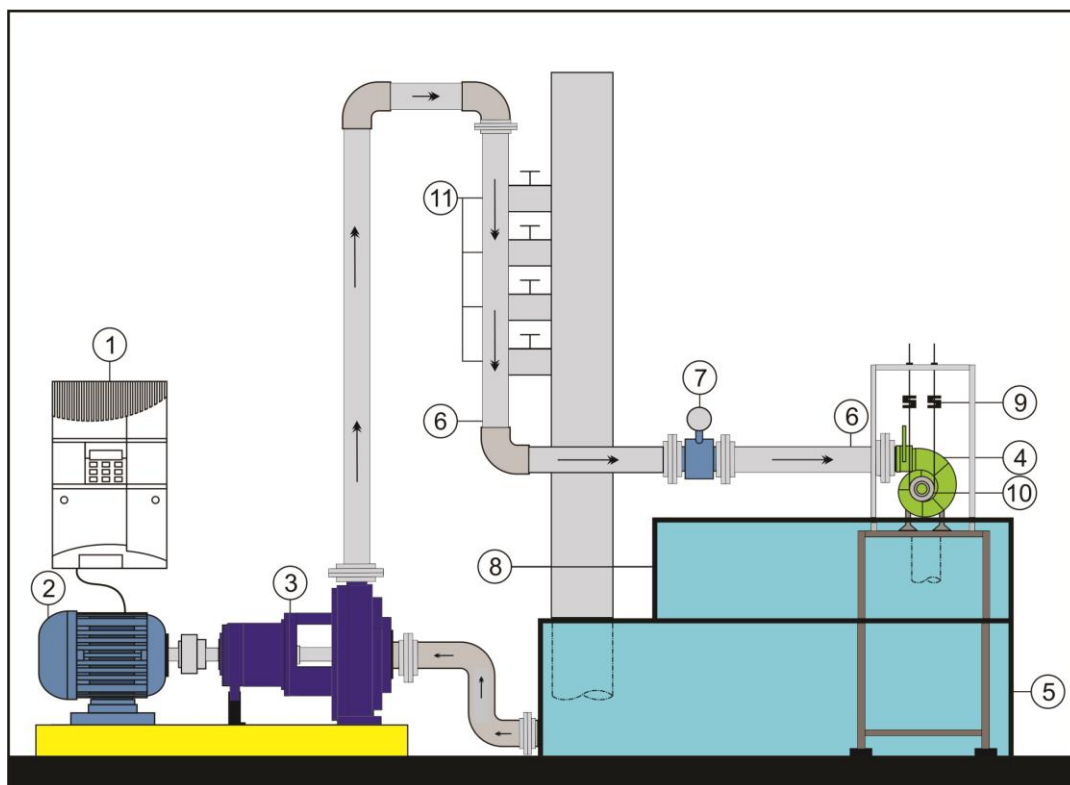


Figura 3. Representação da Bancada Didática – Adaptado de Oliveira (2014)

A bancada é composta por tubulações de 6, 8 e 12", por uma bomba de água (3) de 23,34 KW/ 31,73 cv (pot. absorv.) acionada por um motor trifásico (2) de 1777 RPM, 40 cv, 60 hz. Um inversor de frequência WEG CF W 09 (1) acoplado ao motor trifásico (2) permitirá fazer alterações na vazão através do controle de rotação. A pressão da água ou da altura da coluna de água será controlada por um circuito de entrada de água com níveis de altura selecionados a partir de comandos manuais em quatro válvulas (11), com a abertura destas válvulas é possível manter a altura constante desviando o excesso de água para uma tubulação dreno. A bancada conterá ainda: um sistema de medição de pressão na entrada e na saída da turbina (6), uma turbina Indalma (4), um canal de saída da água com vertedouro para medição de vazão (8) e um sistema de medição de vazão volumétrica na entrada da turbina (7). A turbina está ligada a um freio de prony contendo células de carga (9) para medir o Torque mecânico desenvolvida pelo eixo da turbina. Um sensor indutivo (10) instalado próximo ao eixo da turbina informará os números de rpm da turbina. Para realizar a medição da potência desenvolvida pela turbina serão usadas as informações do sensor indutivo (número de rpm) e das células de carga (torque). Para a circulação do fluido, a bancada terá dois reservatórios de água com capacidade de 3000 litros (5).

6.2. Onde se pode aplicar a utilização da Bancada Didática

A bancada simula, em escala reduzida, uma central hidrelétrica real, podendo ter a mesma complexidade operacional, desta forma, seus elementos componentes podem ser estudados em vários níveis de profundidade, dependendo da necessidade requerida de cada disciplina ou experimento específico.

Uma vez implementada, a bancada poderá ser utilizada como suporte a várias disciplinas do curso, integrando conhecimento teórico a práticas experimentais, além servir de base para o desenvolvimento de pesquisas de iniciação científica, desenvolvimento tecnológico ou ainda trabalhos de conclusão de curso.

Seguindo as grades curriculares dos cursos de Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia e Bacharelado em Engenharia Física, disponível em (UFOPA, 2015), dentre as disciplinas ofertadas, no segundo ciclo, podemos citar a disciplina de **Física Conceitual**, onde são abordados temas introdutórios a diversos conteúdos importantes que serão tratados no decorrer dos cursos, como: Sistemas de unidades; medição de grandezas fundamentais e derivadas; teoria dos erros; conceitos de mecânica, eletricidade e magnetismo e leis de conservação da massa e energia. Com auxílio da bancada didática será possível um melhor aproveitamento do ensino teórico, aplicando experimentalmente os conceitos discutidos em sala de aula.

No quarto semestre, são ofertadas as disciplinas: **Técnicas em Linguagem de Programação**, **Cálculo III**, **Física II** e **Fundamentos da Termodinâmica**, neste é possível estudar e aplicar os conhecimentos envolvendo os temas: Estudo da derivação e simplificação da equação de Bernoulli, estática e dinâmica dos fluidos, além de noções básicas de programação servindo de escopo para o estudo e implementação de um sistema de aquisição de dados para a bancada.

No quinto semestre, haverá oferta das componentes curriculares: **Projeto Auxiliado por Computador**, onde será possível efetuar a modelagem de geometrias em 2D e 3D, e modelagem de chapas e peças da bancada, bem como seus

processos de fabricação e montagem; **Energias Renováveis e Sustentabilidade**, onde podem ser estudados os conceitos de energia hidráulica, processos de geração, distribuição e conversão de energia; **Mecânica dos Fluidos e Laboratório de Mecânica do Fluidos**, para essa disciplina a utilização da bancada será de extrema importância para o processo de facilitação de aprendizagem, por se tratar de uma disciplina específica para o estudo de fluidos, englobando vários conteúdos importantes para a formação do aluno, como: Fundamentos e propriedades dos fluidos, estática dos fluidos (tensão e hidrostática), cinemática dos fluidos, sendo possível verificar o comportamento laminar ou turbulento do escoamento, calculando-se o número de Reynolds e observando os experimentos com os fluidos. Também é possível aplicar as equações integrais de balanço para volume de controle, cálculo e medição de perda de carga distribuída e localizada em tubulações, válvulas e conexões, noções de instrumentação para medida das propriedades dos fluidos e dos escoamentos, medidas de pressão e experimentos de perda de pressão, além de fazer a calibração dos medidores de pressão e vacuômetros, pode-se efetuar medidas de velocidade utilizando o método do tubo de Pitot e Prandtl, aplicar conceitos e métodos de medição de vazão como placas de orifício, bocais de vazão, tubos do Venturi, visualizar escoamentos externos e internos (visualização dos fenômenos da Cavitação), medidores de vazão em canais abertos (vertedouros) e escoamento em bocais.

No sexto e sétimo semestres, serão ofertadas as disciplinas de **Sinais e Sistemas, Sistemas de Controle e Termodinâmica aplicada**, onde são estudados sistemas representados por equações diferenciais, análise de Fourier para sinais contínuos e discretos, definição de sistemas termodinâmicos, volume de controle, volume específico, massa específica, pressão absoluta e pressão referencial, as leis da termodinâmica aplicadas às turbinas.

No nono e décimo semestre, têm-se as disciplinas de **Máquinas Elétricas, Turbo Máquinas, Pequenas Centrais Hidrelétricas, Transmissão e Distribuição de Energia**, onde serão estudados os fundamentos da modelagem e da simulação numérica de máquinas elétricas, de atuadores e de sensores eletromecânicos, sistemas de corrente elétrica, componentes, equipamentos e acessórios de pequenas centrais hidrelétricas, grupos geradores: turbinas, geradores, equipamentos complementares, classificação de turbo máquinas, máquinas de um ou mais estágios, além de mecânicas dos fluidos, termodinâmica aplicada à turbo máquinas e configuração de redes de distribuição de energia.

7. COMENTÁRIOS FINAIS

O presente trabalho visou o estudo e elaboração do projeto de uma bancada didática de testes de turbinas hidráulicas, na qual será possível para o aluno, ainda no ambiente da universidade, realizar experimentos que simulem processos reais envolvendo sistemas de conversão de energia hidráulica em energia elétrica como aqueles que acontecem em algumas pequenas centrais hidrelétricas já instaladas na região Oeste do Pará, também colocará o aluno em contato direto com os diversos tipos de componentes eletromecânicos e elétricos, instalados numa pequena central hidrelétrica, enriquecendo a sua formação profissional com experiências práticas. E desta forma, fortalecer o processo de ensino e aprendizagem, a partir da junção do conhecimento teórico com as práticas laboratoriais.

Com AutoCad versão 2015 para estudante foi possível elaborar o projeto em 2D da bancada didática com um modelo reduzido de turbina produzido pela empresa Indalma. A bancada foi projetada para atender a demanda de uma turbina de 6" com potência 1,26 KW considerando uma queda de até 20 mca, vazão de 90 l/s e rendimento de 70%. Esse projeto está vinculado ao projeto Pró-Amazônia: Biodiversidade e Sustentabilidade – Desenvolvimento de Tecnologia em Turbinas Hidráulicas para Geração de Energia na Amazônia e faz parte do laboratório de turbo máquinas que está sendo implantado, através de uma parceria entre a ELETRONORTE e a UFOPA, na base científica da Hidrelétrica de Curuá-una, na cidade de Santarém-PA.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Oeste do Pará, ao Instituto de Engenharia e Geociências, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior, ao grupo de pesquisa Pró-Amazônia, e a empresa Indalma, pelo apoio concedido ao desenvolvimento deste trabalho.

9. REFERÊNCIAS

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) 2015, “Boletim Anual de Preços”, Rio de Janeiro - RJ, pp. 128-130.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 13403 – “Medição de vazão em efluentes líquidos e corpos receptores Escoamento livre - Procedimento. Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas”, 1995.

Brunetti, F., 2008 “Mecânica dos Fluidos”, 2ª ed., Ed. Pearson Prentice Hall, São Paulo – SP.

Els, R. H. V., Silva, J. M. da, Araujo, B. B. M. e Santander, O.L.S., 2013, “Laboratório real de geração hidrelétrica - proposta metodológica de utilização de bancada de ensaio de turbina hidráulica no curso de Engenharia de Energia”, XLI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia - COBENGE – 2013. Gramado, RS.

Els, R. H. V., Diniz, J. D. A., Souza, J. S. A., Júnior, A. C. P. B., Sousa, A. N. A., Kroetz, J. G., 2010, “Eletrificação Rural em Santarém: Contribuição das Microcentrais”, *Revista Brasileira de Energia*, v. 16, n. 2, p. 35–46.

Filho, G. L. T., Gabetta, J. H., Campos, B. T. L. C., 2006, “As Microcentrais hidrelétricas como alternativa de atendimento a comunidades isoladas – Um estudo de caso”, 6º Congresso sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural – VI AGRENER GD, Minas Gerais – MG.

Filho, G. L. T., Nogueira, F. J. H., Marcucci, F. R., 2006, “A Micro-turbina hidráulica Indalma: análise de suas características operacionais”, V Simpósio Brasileiro sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas, Florianópolis – SC.

Fox, R.W., McDonald, A.T., Pritchard, P.J., 2006, “Introdução à Mecânica dos Fluidos”, 6ª ed., LTC, Rio de Janeiro – RJ.

Martinez, C. B., Filho, J. N., 2001, “Módulo didático de ensaios de turbinas de ação”, XXIX Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia - COBENGE – 2001, Porto Alegre, RS.

Ministério de Minas e Energia (MME) 2015, “Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica – Luz para Todos (PLpT)”, Minas Gerais-MG, pp. 4-6.

Munson, B. R., 2004, “Fundamentos da Mecânica de Fluidos”. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher

Netto, J. M. A., Fernandez, M. F., Araújo, F., Ito, A. E., 2007 “Manual de Hidráulica”, 8ª ed., Ed. Edgard Blücher, São Paulo – SP.

Oliveira, D. S. Avaliação Experimental em Modelo Reduzido de uma Turbina Hidráulica. 2014. Monografia. Universidade de Brasília – UnB Faculdade UnB Gama – FGA. Brasília, DF.

Santander, O. L. S., 2014, “Montagem e instrumentação de uma Bancada para turbina hidráulica”. Dissertação. Universidade de Brasília – Departamento de Engenharia Mecânica. Brasília, DF.

Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA) 2015, “Projeto Pedagógico – Curso de Bacharelado em Engenharia Física”, Santarém-PA, pp. 10-11.

10. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

PROJECT OF A WORKBENCH DIDACTIC FOR TEST PICO TURBINES HYDRAULICS

Altamir Crhistian dos Santos Barros, altamir.ufopa@gmail.com¹

Lazaro João Santana da Silva, lazarojs@yahoo.com.br²

¹Universidade Federal do Oeste do Pará, Rua Vera Paz s/nº (Unidade Tapajós), Bairro Salé, CEP:68035-1110.

² Universidade Federal do Oeste do Pará, Rua Vera Paz s/nº (Unidade Tapajós), Bairro Salé, CEP:68035-1110.

Abstract. Didactic benches favor the fluidity of the teaching-learning process and improve the quality of technical education, encouraging the acquisition of knowledge. Through bench, students still in the University environment, may apply content from various disciplines, having direct contact with a real process, whereas the didactic bench is a small-scale model of a power conversion system and can be same operational complexity of a real system, providing a more tangible experience reality and motivating, enriching their professional training and hence development in the region. This paper presents a project proposal containing specification of the whole apparatus of electromechanical equipment and components of the hydraulic circuit including the measuring system of physical quantities that will be the scope for building a didactic bench for peak test turbines for the courses of Bachelor of Engineering Physics with an emphasis on energy and Bachelor Interdisciplinary Science and Technology of the Federal University of Para West - UFOPA, especially for meeting the course subjects that somehow deal with cases involving the hydraulic energy conversion electricity and forms of control.

Keywords: hydraulic turbines, turbine indalma, didactics workbench.