



## **LABORATÓRIO REAL DE GERAÇÃO HIDRELÉTRICA - PROPOSTA METODOLÓGICA DE UTILIZAÇÃO DE BANCADA DE ENSAIO DE TURBINA HIDRÁULICA NO CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA**

**Rudi Henri van Els** – rudi@unb.br

**Juliany Martins da Silva** – julianynds@gmail.com

**Bruna Bianca Machado Araújo** - brunabiancam@msn.com

**Olga Lucia Sanchez Santander** - olgalucia55@hotmail.com

Universidade de Brasília – Faculdade UnB Gama

Área Especial de Indústria - Projeção A

CEP: 72.444-240 – Gama-DF

**Resumo:** *O curso de engenharia de energia tem como objetivo formar engenheiros aptos para tratarem das questões contemporâneas da conversão, transporte e uso final da energia no nosso meio ambiente. A formação teórica do engenheiro de energia é complementada com a prática por meio de atividades de laboratório com kits didáticos específicos ou softwares de simulação onde o estudante pode aplicar e experimentar os conteúdos teóricos. Entretanto, esse tipo de experimentação simplificada não permite a possibilidade de entender o processo de conversão de energia no seu conjunto. Por isso apresenta-se uma proposta de laboratório de sistemas hidroelétricos com uma bancada de ensaios de máquinas hidráulicas para pico turbinas com uma metodologia para usar a bancada nas diferentes disciplinas do curso de engenharia de energia. Dessa forma pode-se experimentar ou aplicar o conteúdo de diversas disciplinas com a mesma instalação laboratorial mais próxima de realidade, podendo analisar e tratar problemas de engenharia com vários níveis de profundidade. São apresentados quatro níveis de complexidade: operação manual demonstrativa com instrumentação analógica; análise do comportamento hidrodinâmico; operação para geração distribuída; implementação de controle de sistemas dinâmicos. Esses modos de operação podem ser usadas nas disciplinas de sistemas de energia, fenômenos de transporte, dinâmica dos fluidos, máquinas de fluxo, sistemas hidroelétricos, circuitos elétricos, conversão eletromecânica de energia, transmissão e distribuição de energia. O laboratório real de conversão de energia em escala reduzida pode ter a mesma complexidade operacional de um sistema real e dessa forma preparará o futuro engenheiro para lidar com sistemas reais.*

**Palavras-chave:** *Pico-centrais hidroelétricas, Turbina hidráulica, Sistema hidroelétrico, Bancada didática.*



## 1. INTRODUÇÃO

O curso de engenharia de energia tem como objetivo formar engenheiros aptos para tratarem das questões contemporâneas da conversão, transporte e uso final da energia no nosso meio ambiente. Dessa forma, o perfil desse profissional é de um engenheiro eletromecânico, com sólida formação de base no domínio das teorias e tecnologias de sistemas de energia e com fortes interconexões interdisciplinares com conhecimentos sobre o meio ambiente, desenvolvimento sustentável e de gestão de sistemas energéticos (UNB, 2010).

A formação do curso de engenharia de energia prevê que o estudante curse disciplinas típicas do curso de engenharia mecânica, elétrica, química, relacionadas à conversão e uso de energia. Neste contexto, a base para entender a conversão de energia, e em especial o aproveitamento da energia hidrelétrica, o estudante começa com as disciplinas típicas de Fenômenos de Transporte, Dinâmica dos Fluidos e Máquinas de Fluxo, fundamentais no curso de engenharia, e conclui com a disciplina específica de Sistemas Hidroelétricos.

Todas as disciplinas citadas anteriormente preveem horas/aula dedicadas a laboratórios para que o estudante possa aplicar e experimentar os conteúdos teóricos de sala de aula. Esses laboratórios devem seguir a sequência do conteúdo ministrado em sala de aula conforme o respectivo plano de ensino da disciplina.

As novas tendências de ensino de engenharia deixaram de investir na manutenção de laboratórios tradicionais de sistemas energéticos em escala reduzida e diversos laboratórios foram sendo desativados. No lugar desses sistemas, começou-se a utilizar programas computacionais de simulação e kits didáticos com aplicações específicas. Há diversos *softwares* de modelagem em simulação que demonstram o funcionamento dos sistemas por meio de experimentação virtual e animações. Com o avanço tecnológico e disponibilização de programas de modelagem e animação é possível criar ambientes nos quais os alunos podem interagir com objetos virtuais (K. D. Oliveira et al., 2012). (J. C. de Oliveira, Pinto, & Albuquerque, 2012; L. M. De Oliveira, Teixeira, & Oliveira, 2012).

Além dos programas de simulação, foram introduzidos nos laboratórios kits didáticos especialmente desenvolvidos para trabalhar alguns conceitos específicos do conteúdo ministrado em sala de aula, seguindo a sequência do respectivo plano de ensino da disciplina.

Entretanto, esse tipo de formação com kits didáticos específicos e software de simulação tendem a simplificar a complexidade de um sistema de geração e conversão de energia, pois tem a preocupação de ensinar o princípio de funcionamento, mas deixa o tão necessário contato com sistemas reais em segundo plano.

Essa tendência de simplificação dos laboratórios e um certo afastamento dos sistemas mais reais e complexos nas práticas laboratoriais não é recente e caracteriza uma limitação na formação do engenheiro, que não adquire conhecimento para trabalhar em situações reais que envolvem problemas e desafios constantes. Isto é, o estudante perde a possibilidade de entender o processo de conversão de energia no seu conjunto, sendo que poderia experimentar ou aplicar o conteúdo de diversas disciplinas com a mesma instalação laboratorial mais próxima de realidade, analisando e tratando 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 e requer uma infraestrutura apropriada para seu correto funcionamento.

O presente artigo apresenta uma proposta de laboratório de sistemas hidroelétricos no curso de engenharia de energia. A proposta é a construção de uma bancada de ensaio de máquinas hidráulicas para pico turbinas comerciais disponíveis no mercado e estrutura de uso e conversão mais próximo de uma instalação real.

A bancada está sendo montada no laboratório de geração de energia elétrica do curso de engenharia de energia, e faz parte de uma proposta de pesquisa cooperativa com uma empresa fabricante de turbinas hidráulicas. Além disso o artigo apresenta uma proposta metodológica para usar esta bancada nas diversas disciplinas do curso de engenharia de energia, fazendo com que se consiga usar a infraestrutura construída, para a formação integrada do estudante de engenharia de energia.

## **2. LABORATÓRIO DE (PICO) GERAÇÃO DE ENERGIA**

A importância de trabalhar os conceitos teóricos e aplicações práticas de geração de energia elétrica é imperativo para o curso de engenharia de energia. Historicamente, a engenharia buscou na segunda metade do século vinte a maximização da conversão de energia por meio de projetos onde estava central o aumento de escala com grandes sistemas centralizadas. Atualmente, devido a diversos fatores, principalmente ligado aos condicionantes ambientais e sociais, a tendência é distribuir e descentralizar.

As novas tendências nesse ramo apontam cada vez mais para sistemas de conversão menores utilizando geração distribuída e/ou descentralizados e uso de fontes renováveis de energia. Ackermann (2001) define a geração distribuída como uma fonte de geração conectada diretamente na rede de distribuição ou ao consumidor. O setor elétrico define, por meio dos seus procedimentos de distribuição, a geração distribuída como sendo geração de energia elétrica, de qualquer potência, conectadas diretamente no sistema elétrico de distribuição ou através de instalações de consumidores, podendo operar em paralelo ou de forma isolada e despachadas – ou não – pelo ONS (ANEEL, 2005). Recentemente, no Brasil, a microgeração e minigeração distribuída foram regulamentados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2012).

A geração distribuída, que praticamente elimina os custos de transmissão e distribuição, viabiliza e estabelece uma nova dimensão de geração energética, de forma complementar ao modelo de grande escala. É reconhecida como a metodologia operacional que viabiliza o uso de todas as fontes renováveis alternativas, como a hidroeletricidades em menores escalas. (PLATAFORMA ITAIPU)

A demanda por profissionais específicos para a geração de energia de forma distribuída aumentará e, por isso, é de urgência é de total interesse que os estudantes de graduação sejam bem preparados para lidar com situações reais.

Os empreendimentos com micro geração também são importantes alternativas para sistemas onde não chega a rede de distribuição. Neste sentido o interesse nos pequenos aproveitamentos hidrelétricos estão a cada dia maior, visto que trata-se de uma estratégia para o desenvolvimento de regiões mais isoladas, como na área rural ou comunidades da Amazônia. Este tipo de empreendimento possui limitações técnicas e ambientais reduzidas em comparação à geração em escalas maiores e, com o controle de potência, possibilita a injeção de energia à rede, contribuindo com o aumento da energia de fonte renovável na matriz energética do país.



A bancada didática proposta neste trabalho contribui para a formação de profissionais para a geração de energia distribuída a partir de pico centrais hidrelétricas, isto é, aproveitamentos hidroelétricos com potência inferior a 10 kW.

### **3. A BANCADA DIDÁTICA**

Para atender à demanda por energia, os pequenos aproveitamentos são estudados de forma a produzir mais e com menos requisitos possíveis. Assim, há uma busca incessante por novas tecnologias e equipamentos de geração, conversão e transmissão de energia e, principalmente, mão de obra especializada na área da geração de energias renováveis. Nesta busca, a formação dos futuros profissionais nas universidades a pesquisa realizada nestas são de grande importância.

Nas universidades as novas tecnologias podem ser estudadas e analisadas de forma a otimizá-las para a utilização em grande escala. Neste sentido, o curso de engenharia de energia está executando um projeto de pesquisa cooperativa com um fabricante de turbinas hidráulicas. O projeto de pesquisa cooperativa tem como objetivo a modelagem, simulação, otimização de turbinas hidráulicas e sua validação experimental com protótipo em escala real em bancada de ensaio, bem como pesquisar equipamentos eletromecânicos e elétricos para a interligação de micro centrais hidrelétricas para formar sistemas de geração distribuída de energia elétrica.

A bancada de ensaio foi desenvolvida de tal forma a também possibilitar a utilização como bancada didática. Essa bancada didática, em escala apropriadamente reduzida, não apenas possibilita ao estudante de engenharia e futuro profissional da área de energia hídrica o contato com a situação prática, aproximada da realidade, mas também apresenta-se como uma ferramenta de análises e estudo de máquinas hidráulicas.

Inicialmente, a bancada ensaiará a turbina hidráulica Indalma para fazer a caracterização desta turbina fabricada de forma quase artesanal pela empresa homônima. Esta turbina é uma modificação de uma turbina Francis, que tem como principal inovação o fato de reunir as características de uma turbina de ação e reação numa configuração especial que permite o funcionamento da máquina sem distribuidor.

A turbina Indalma foi desenvolvida para atender o segmento de turbinas hidráulicas para pico (até 10 kW), micro (de 10 a 100 kW) e mini (de 100 a 1000 kW) centrais hidrelétricas na Amazônia, que precisam de máquinas robustas, de fácil construção e simplificação de operação e manutenção. O fato de não possuir distribuidor ou sistema mecânico sofisticado para controle de vazão e potência, facilita a sua utilização em pequenos aproveitamentos hidrológicos.

A bancada é composta por circuito hidráulico com reservatório de 1000 litros (2), bomba de 25CV (1), tubulação de 8', 6' e 4' com queda de até 7 metros, turbina hidráulica (4) sobre teste, canal de saída (3) com vertedouro triangular. O circuito hidráulico foi de tal forma desenhado que é possível programar uma altura constante de coluna d'água por meio das válvulas (a,b,c e d) que transbordem a água para o dreno. A vazão da bomba pode ser controlada por meio de um inversor de frequência (6), permitindo assim um controle mais preciso da pressão da coluna d'água no circuito de adução da turbina vazão. A turbina está acoplada a um freio de Prony (7) e a um gerador elétrico, permitindo a colocar carga mecânica ou elétrica.

Na “Figura 1” a bancada é apresentada de forma esquemática:

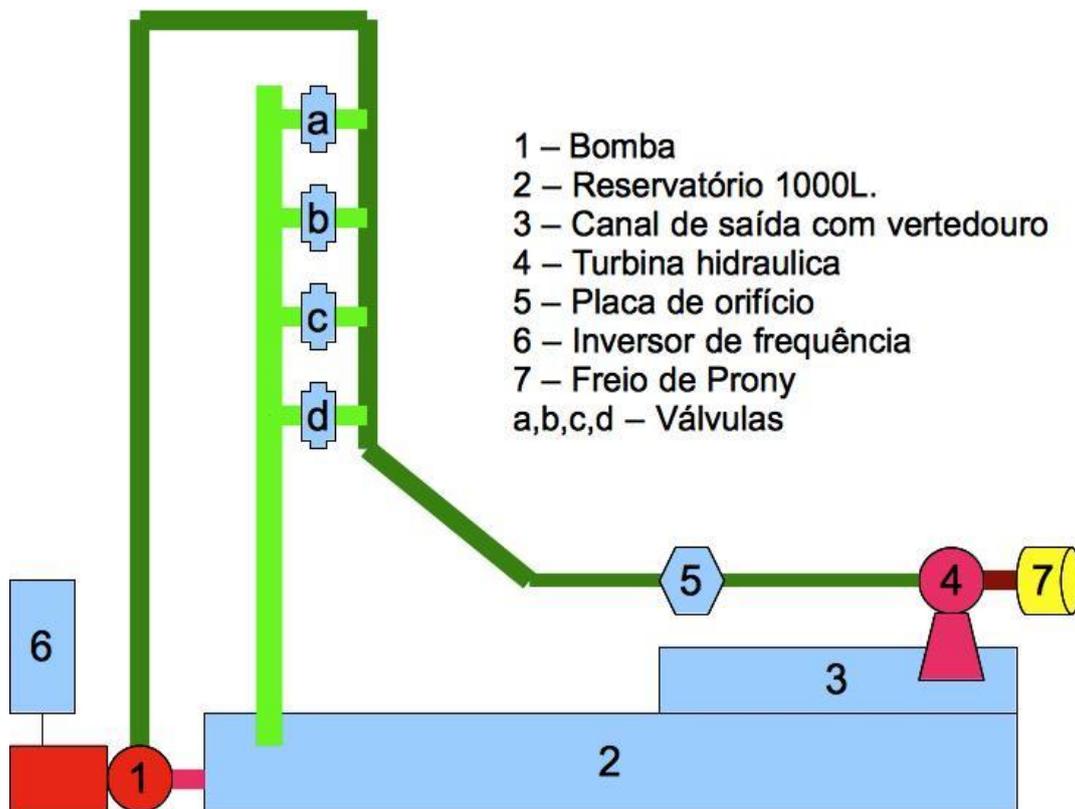


Figura 1 – Esquema da bancada didática de ensaio de micro turbinas hidráulicas.

O sistema foi desenvolvido para permitir a medição de todas as grandezas físicas com instrumentos analógicos simples e também por um sistema baseado em instrumentação por computador. A altura da coluna água, vazão, torque e rotação podem ser medidos diretamente na bancada com mangueira de nível, vertedouro no canal de saída, freio de Prony respectivamente. Além disso o sistema terá medição de vazão por placa de orifício, medidores de pressão na turbina e tubulação além de medição das grandezas elétricas do gerador.

O desenho da bancada em CAD faz parte da documentação deste projeto. Os desenhos são realizados por estudantes que cursam a disciplina “desenho industrial assistido por computador” utilizando o *software* CATIA versão V5R19 e a ferramenta de desenho do Google, Sketch Up. A “Figura 2” apresenta o desenho da bancada, desenvolvido no *software* CATIA V5R19, e na “Figura 3” são mostradas fotografias da bancada montada em laboratório.

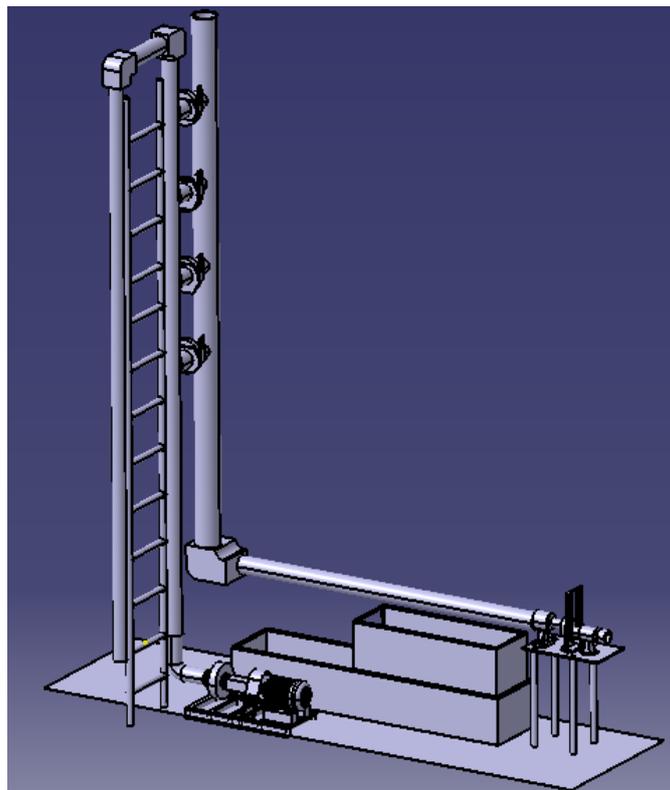


Figura 2 – Esquema da bancada didática de ensaio de micro turbinas hidráulicas.



Figura 3 – Fotografias de partes da bancada: elevação com válvulas, conjunto de moto bomba e freio de Prony.

#### 4. PROPOSTA METODOLÓGICA

A bancada conta com vários elementos que compõem uma central hidrelétrica em escala reduzida, visto que cada elemento tem uma função com um nível de complexidade diferente, a proposta é trabalhar em diferentes níveis de acordo com a disciplina.

**4.1. Primeiro nível:** operação manual demonstrativa com instrumentação analógica elementar.

Experiências direcionadas às disciplinas do segundo, terceiro e quarto semestre podendo trabalhar conceitos de fonte de energia, fenômenos de transporte. Este nível inclui a utilização de vertedouro triangular para o cálculo da vazão, cálculo da perda de carga na tubulação e medição de pressão.

Neste nível também é possível aplicar a teoria do balanço de energia, a partir da simplificação da Equação de Bernoulli é possível obter um resultado aproximado para a velocidade e calcular a vazão. Esta análise apresenta o quanto a teoria está perto da realidade e quais são os fatores que interferem para a provável diferença de valores.

A “Figura 4” apresenta o vertedouro triangular no desenho desenvolvido no *software* SketchUp.

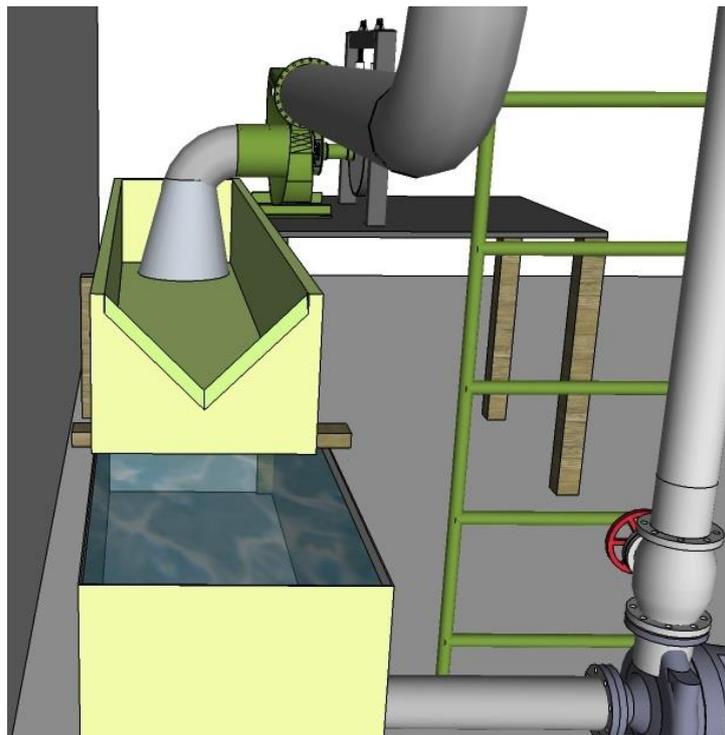


Figura 4 – Canal de saída com vertedouro triangular.

**4.2. Segundo nível:** instrumentação para entender e avaliar o comportamento hidrodinâmico da turbina ou circuito de bombeamento.

Experiências direcionadas às disciplinas do quarto e quinto semestre de engenharia (fenômenos de transporte, dinâmica dos fluidos, máquinas de fluxo). Neste nível de

complexidade o aluno utiliza uma placa de orifício com sensores de pressão para a medição da vazão, o freio de Prony para obtenção do torque e cálculo da potência da turbina. Pelo desenho desenvolvido no SketchUp, mostrado na “Figura 5” é possível visualizar o freio de Prony com a turbina na bancada.

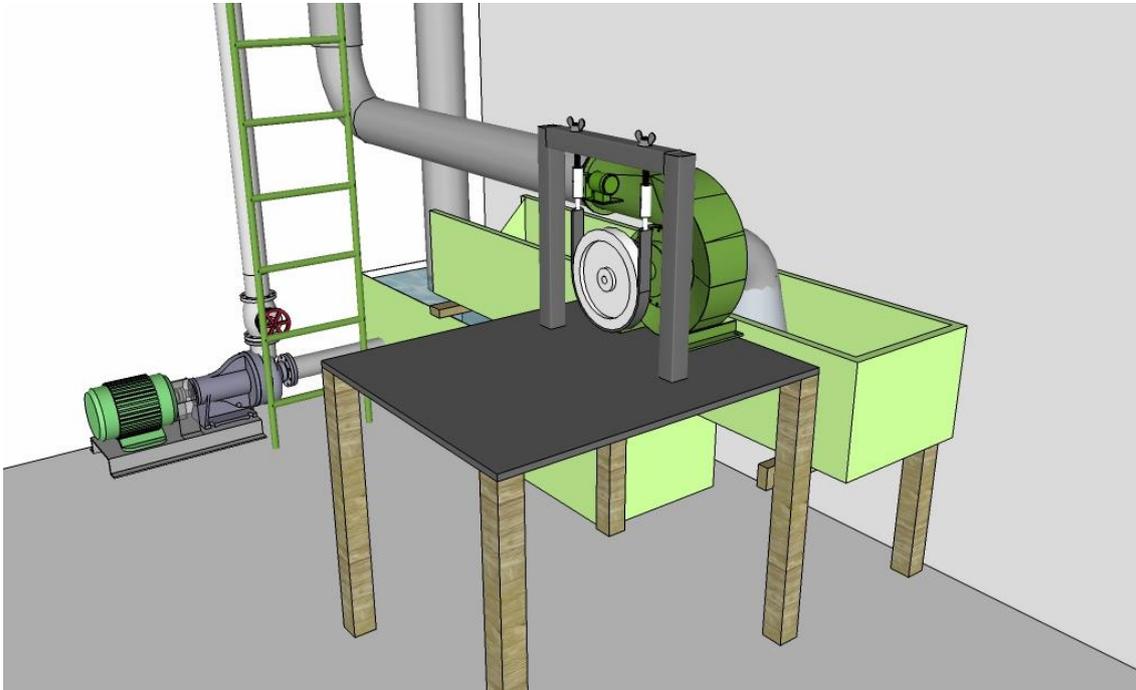


Figura 5 – Freio de prony com desenho da turbina.

**4.3. Terceiro nível:** geração de energia elétrica e sua interligação com a rede de distribuição elétrica.

Experiências direcionadas à disciplinas do quinto, sexto e sétimo semestres. Circuitos elétricos, conversão eletromecânico de energia, transmissão e distribuição de energia.

Neste nível de complexidade o foco das experiências é na conversão eletromecânica de energia elétrica e o uso da eletricidade gerada. Além do processo de conversão, também podem ser trabalhados conceitos ligado a qualidade de energia, como correção de fator de potência e geração distribuída.

**4.4. Quarto nível:** controle de processo e sistemas dinâmicos.

Experiências direcionadas à disciplina de instrumentação e controle de sistemas dinâmicos do sétimo, oitavo e nono semestre de engenharia. A bancada permite o estudo da turbina hidráulica como um sistema de geração que permite que alunos desenvolvam experiências de controle de processo e instrumentação na referida bancada.

Além da modelagem matemática de toda a estrutura do reservatório, conduto forçado e a própria turbina, o sistema elétrico também pode ser modelado e estudado. Serão desenvolvidos dois modelos do conjunto, circuito hidráulico e turbina. Um modelo linear em torno de um ponto de operação do sistema e um modelo não linear. O



modelo linear representa o desempenho da turbina a pequenas variações de sinal, onde o aluno poderá reconhecer esses sinais.

Além dessas experiências, a bancada permitirá a realização de projetos de iniciação científica e trabalhos de pesquisa de conclusão de curso, pois a sua montagem modular facilitará a sua adaptação para situações com problemas específicos.

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O presente artigo apresenta uma proposta de metodologia de trabalho de laboratório para o curso de engenharia de energia, em especial para as disciplinas do curso que de alguma forma tratam a conversão hidrelétrica de energia elétrica.

A proposta é que a estrutura laboratorial permita que o estudante tenha a oportunidade de entender o processo de conversão de energia no seu conjunto, podendo experimentar ou aplicar o conteúdo de diversas disciplinas com a mesma instalação laboratorial mais próxima de realidade, podendo analisar e tratar problemas de engenharia com vários níveis de profundidade.

Sabe-se que um sistema de conversão de energia em escala reduzida pode ter a mesma complexidade operacional de um sistema real e requer uma infraestrutura apropriada para seu correto funcionamento.

A bancada desenvolvida está sendo montada no laboratório de geração de energia elétrica do curso de engenharia de energia, e faz parte de uma proposta de pesquisa cooperativa com uma empresa fabricante de turbinas hidráulicas. Além disso o artigo apresentou uma proposta metodológica para usar essa bancada nas diversas disciplinas do curso de engenharia de energia, fazendo com que se consiga usar a infraestrutura construída, para a formação integrada do estudante de engenharia de energia. O laboratório real de conversão de energia em escala reduzida pode ter a mesma complexidade operacional de um sistema real e dessa forma preparará o futuro engenheiro para lidar com sistemas reais.

## **6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ACKERMANN, T., ANDERSSON, G., SÖDER, L., "Distributed generation: a definition", 2001.

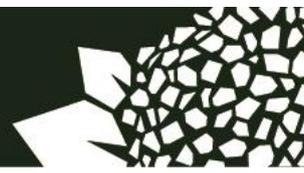
ANEEL, Resolução normativa no 482 de 17 de abril de 2012. Diário Oficial de 19/04/2012, seção 1, p.53, v 149, n.76, Brasília, 2012.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 1 – Introdução, dezembro de 2005

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A. ELETROBRÁS. MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. Diretrizes para Estudo de Pequenas Centrais. 1. ed., 2000.

DIAS, M. V. X.; BOROTNI, E. C.; HADDAD, J. Geração distribuída no Brasil: oportunidades e barreiras. Revista Brasileira de Energia, Vol. 11, nº 2.

OLIVEIRA, J. C. de; PINTO, V. P.; ALBUQUERQUE, H. F. de. Desenvolvimento de práticas de laboratório de controle dinâmico utilizando o labview ®. XL Congresso Brasileiro de educação em engenharia – COBENGE, 2012.



OLIVEIRA, L. M. de; TEIXEIRA, D. P.; OLIVEIRA, A. R. de. Utilização de uma Planta Didática Smar para Complementação do Ensino de Engenharia de Controle e Automação. Anais: XL Congresso Brasileiro de educação em engenharia – COBENGE, 2012.

OLIVEIRA, K. D.; SANTOS, W. L. dos; SOUZA, R. C.; MOURA, R. O.; FREDERICSON, J.; COSTA, D. M.; MENEZES, J. W. M. Laboratório Virtual de Química: Blender 3D Auxiliando no Ensino da Química. Anais: XL Congresso Brasileiro de educação em engenharia – COBENGE, 2012.

PLATAFORMA ITAIPU DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Solução para a eficiência energética – Geração distribuída.** Disponível em: <<http://www.plataformaitaipu.org/plataforma/geracao-distribuida>>, acessado em 02 jun. 2013.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA (UNB). Projeto Político Pedagógico – Curso de Graduação em Engenharia de Energia. Brasília–DF, 2010

VIANA, F. B.; VIANA, A. N. C. Microcentrais Hidrelétricas: Alternativa às Comunidades Rurais Isoladas.

### **Real hydroelectric generation lab - methodological proposal to use a hydraulic turbine test bench in the undergraduate course of energy engineering**

**Abstract:** *The objective of the graduate course in energy engineering course is to form engineers able to address contemporary issues of conversion, transportation and end use of energy. The more theoretical part of the course is complemented by practical laboratory activities with specific learning kits or simulation software where the student can apply the theory and experiment. However, this type of experimenting does not allow the possibility to view of the power conversion process as a whole. Therefore we present a proposal for hydroelectric systems laboratory with a test bench for hydraulic turbines and a methodology to use the bench in the different disciplines of engineering course energy. Thus it's possible to apply the content of various disciplines with the same laboratory facility and to analyze and handle engineering problems in different depth. There are four operation levels of complexity: manual demonstrative operation with analogue instrumentation; analyses of hydrodynamic behavior, operation in distributed generation, implementation of control of dynamical systems. These operation schemes can be used in the disciplines of energy systems, transport phenomena, fluid dynamics, flow machines, systems hydroelectric, electric circuits, electromechanical energy conversion, transmission and distribution of energy. This real hydropower lab actual in reduced scale may have the same operating complexity of a bigger system and thereby will prepare the future engineer to deal with real systems*

**Key-words:** *Pico hydropower plants, Hydraulic turbines, Hydraulic systems, Didatic bench.*