



PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM MODELO DE TURBINA PELTON EM ESCALA REDUZIDA

Alex Nogueira Brasil

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – UFMG / Faculdade de Engenharia – Universidade de Itaúna, Av. Dona Cota 397, Itaúna – CEP 35680-033.

brasil@brhs.com.br

Carlos Barreira Martinez

CPH – Centro de Pesquisas Hidráulicas/EHR – Departamento de Hidráulica e Recursos Hídricos – UFMG – Av. Antonio Carlos 6627 – Campus UFMG – CEP 31270-901.

martinez@cce.ufmg.br

Jair Nascimento Filho

CPH – Centro de Pesquisas Hidráulicas – UFMG/DEMEC – Departamento de Engenharia Mecânica – UFMG – Av. Antonio Carlos 6627 – Campus UFMG – CEP 31270-901.

jair@demec.ufmg.br

***Resumo.** Esse trabalho apresenta o estudo, projeto e procedimento de construção de um modelo de turbina Pelton para ser utilizado em uma bancada de ensaio. Inicialmente faz-se um estudo da potência e dimensões da turbina passível de ser instalada na bancada existente. Em seguida faz-se uma reflexão acerca dos elementos da turbina que devem ser projetados de modo a permitir uma visualização do equipamento tanto no que diz respeito às características hidráulicas quanto mecânicas. Em seguida são apresentados os critérios utilizados para a seleção dos materiais de construção utilizados no modelo. As pás do rotor do modelo foram construídas em aço inoxidável fundido por processo de cera perdida evitando assim sua usinagem posterior. A carcaça foi fundida em alumínio e permite o acoplamento de um ou dois bicos injetores.*

***Palavras-chave:** turbinas Pelton, ensaios de turbomáquinas, modelo reduzido*

1. INTRODUÇÃO

A turbina foi concebida em função de uma bancada de ensaios de máquinas hidráulicas já existente. Tanto a bancada, como a turbina, foram construídas dentro do mesmo espírito de se obter equipamentos que apresentem facilidade de operação, de transporte e de instalação. O modelo desenvolve potência da ordem de 150W, o que permite sua utilização em bancadas que possam ser montadas e acionadas em instalações prediais corriqueiras. Esse trabalho apresenta um roteiro para a manufatura de um modelo em escala reduzida de turbina Pelton dentro das características supra citadas, constituindo-se em uma colaboração para a solução de obtenção de equipamentos relacionados a treinamentos e estudos de turbinas hidráulicas.

O principal objetivo deste artigo é a apresentação de um projeto de desenvolvimento de um modelo de turbina Pelton que possibilite o ensino de máquinas hidráulicas para alunos de graduação de engenharia civil, mecânica e elétrica a um baixo custo e com equipamento nacional.

Pelo fato do equipamento ser concebido em função de uma demanda dos atuais cursos supra citados da EEUFMG acredita-se que o mesmo servirá para preencher uma lacuna existente contribuindo para a melhoria do ensino de engenharia. Além disso, a apresentação da metodologia utilizada para a concepção do equipamento, bem como os passos para a construção física do modelo são uma contribuição que permitirá que diversas escolas produzam um equipamento semelhante, de baixo custo e adaptado às suas necessidades.

2. ESTUDO DA POTÊNCIA E DIMENSÕES DA TURBINA

A definição da potência da turbina a ser projetada teve como limitação a capacidade do módulo de ensaio disponível. Devido às limitações dos sistemas elétricos convencionais disponíveis na maior parte das salas de aulas, a bancada de ensaios foi concebida e construída para ser acionada por uma potência da ordem de 750 Watts. Esta limitação implica em uma potência máxima para o conjunto moto bomba de $\frac{1}{2}$ cv, que impõe uma vazão máxima de 1,0 l/s com uma pressão manométrica máxima de $2,5 \text{ kgf/cm}^2$. A partir da formulação clássica apresentada por Macintyre (1983) e Carvalho (1982) chegou-se às dimensões da turbina que são apresentadas na Fig. (1). Devido ao fato da turbina ter finalidade didática optou-se por fazer uma janela frontal em acrílico que permitirá a visualização do fluxo. Por meio desta janela pode-se visualizar a atuação do injetor, o que permite uma boa compreensão do seu funcionamento. O sistema de freio utilizado é do tipo convencional "Prony" e se assemelha aos amplamente empregados em equipamentos deste porte (Armifield, 1991; Salzard, 1965).

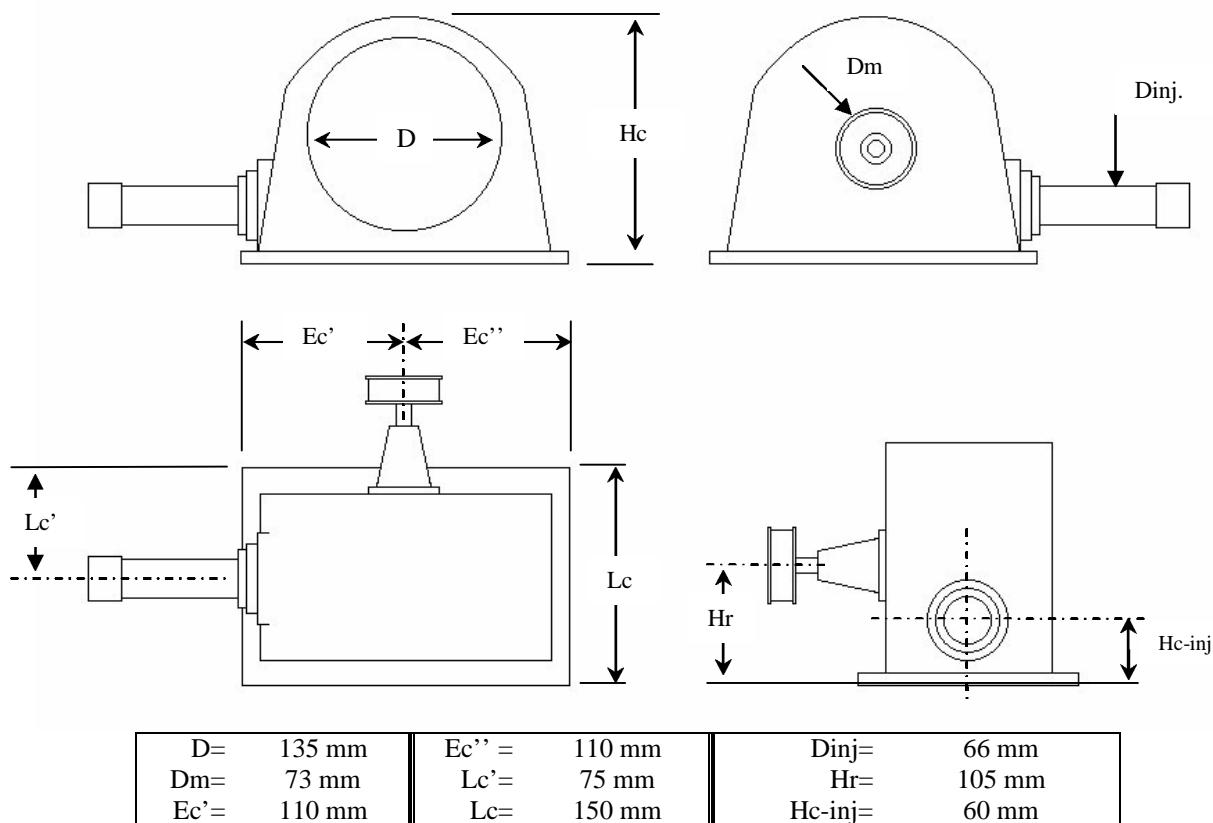


Figura 1. Dimensões básicas da turbina a ser construída

3. PROCESSO CONSTRUTIVO

3.1. O processo de fundição por “Cera Perdida”

O processo de fundição para fabricação de peças consiste, essencialmente, em preencher com metal líquido a cavidade de um molde contendo a mesma geometria da peça desejada. Pode-se dizer que no processo de fundição tem-se, quanto ao metal, apenas as etapas de fusão e solidificação entre a matéria prima sólida e o produto semi-acabado. A fundição apresenta diversas formas diferentes de se obter uma peça fundida, sendo uma destas, o processo de fundição por cera perdida. O processo de fundição por cera perdida ou microfundição apresenta recursos que permitem, num “curto” espaço de tempo, a fabricação de grande quantidade de peças, cujo formato pode variar desde o mais simples até o mais complexo, com espessuras de paredes reduzidas, alta qualidade superficial e tolerâncias dimensionais estreitas, além de apresentar possibilidades de uso de ligas alternativas. Este processo possibilita a eliminação de uma série de operações de usinagem, soldagem, encaixes, etc. Entretanto requer controles rígidos em todas as etapas e pode ser ajustado para atender as solicitações do cliente. O processo de fundição de precisão tende a compatibilizar a obtenção de peças com bom acabamento superficial e um mínimo de operações posteriores ao vazamento da peça.

Todavia, os proveitos que podem ser retirados desta tecnologia ultrapassam o campo da qualidade das peças produzidas. O processo de fabricação de peças por fundição de precisão normalmente reserva várias oportunidades para reduzir custos, dentre estas temos:

- Redução da usinagem, onde o corte dos gastos é bastante expressivo;
- Redução de gastos com acabamento superficial da peça;
- Transformação de um conjunto de peças (unidas anteriormente através de soldas, rebites, encaixes, etc.) numa única peça fundida.

Devido a estas características optou-se pela utilização deste processo para a fabricação das pás do rotor.

O modelo deve ter a geometria exata requerida pela peça final, mas deve ser feito “ligeiramente” maior, para compensar a contração volumétrica tanto do material usado para fabricar o modelo (cera, plástico) quanto da solidificação do metal.

O modelo deve ser construído com um ou mais canais de entrada, normalmente localizados nas seções de maior massa. Esse canal possui três funções distintas:

- Ligar esse modelo a uma vareta ou canal central, formando um cacho;
- Servir de saída para o material do modelo durante a deceragem;
- Servir de entrada do metal líquido durante o vazamento, garantindo um enchimento completo e uma solidificação dirigida (Microinox, 1990).

3.2. A Produção de Modelos em Cera

“O processo de fundição de precisão” permite várias opções quanto ao tipo de matriz, devido ao baixo ponto de fusão, boa fluidez e ausência de abrasividade das ceras.

Primeiramente através do desenho de uma peça, elabora-se o projeto, adaptando-o ao processo de cera perdida, a partir do qual consegue-se fabricar a matriz. Na seleção do material da matriz deve se considerar o custo e a vida útil da mesma, a qualidade e eficácia de produção dos modelos. No caso em questão o primeiro modelo foi esculpido em madeira de lei. A partir deste, foi construído uma matriz em resina epoxi utilizada para injeção dos modelos (cera). A Figura (2) mostra a matriz em resina utilizada para injeção dos modelos. Esta matriz é de cavidade única e de operação manual.

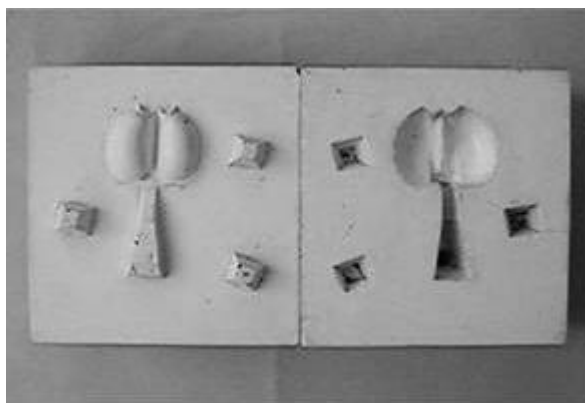


Figura 2. Matriz em resina utilizada neste trabalho

A Figura (3) representa o modelo em cera produzido. O modelo deve ser construído “ligeiramente” maior para compensar a contração volumétrica tanto do material usado para fabricar o modelo (cera) quanto da solidificação do metal (aço inox). O modelo possui as dimensões aproximadamente 3% maiores que da peça final devido à contração da cera ($\approx 1,5\%$) e do aço inox ($\approx 1,5\%$).

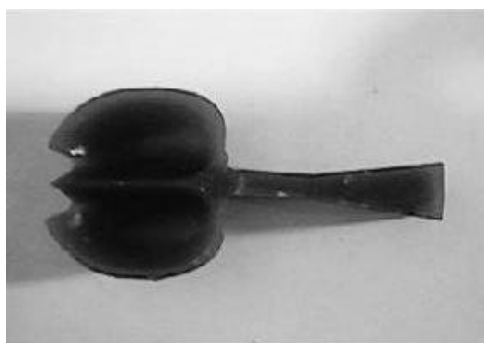


Figura 3. Modelo obtido em cera

As principais propriedades exigidas para a cera, estão correlacionadas principalmente com a injeção, extração, manuseio, montagem, controle dimensional, molhabilidade, deceragem e queima. As ceras para modelos são misturas complexas, compostas por ingredientes relativamente caros, formuladas para produzir modelos de ótima qualidade. A maior parte das ceras para modelo é feita por mistura de ceras de petróleo (30 a 70%, normalmente usa-se parafina e cera microcristalina), ceras naturais e/ou resinas (20 a 60%, como por exemplo a carnaúba e resinas de fontes naturais ou sintéticas), aditivos (0 a 20%, sendo mais comum o etileno acetato de vinila – EVA) e também agentes que minimizam a formação de vazios durante a solidificação da cera. Atualmente, pode-se adquirir no mercado, ceras para microfusão, dispensando portanto o preparo destas na indústria de microfusão. Geralmente após a deceragem dos cachos, a cera é reciclada. Modelos grandes são produzidos individualmente, mas os pequenos e médios são montados em cachos com vários modelos, para economia do processo. Componentes de alimentação, incluindo bacia (copo) de vazamento, são produzidos separadamente e são unidos com os modelos para se produzir o cacho ou árvore de modelos (Horton, 1988). A quantidade de “modelos por cacho” varia consideravelmente, até centenas de modelos, dependendo do tamanho, configuração e do tipo de metal que será fundido (Horton, 1988). A montagem dos modelos de cera é realizada utilizando-se um ferro quente ou espátula, ou uma pequena chama de gás.

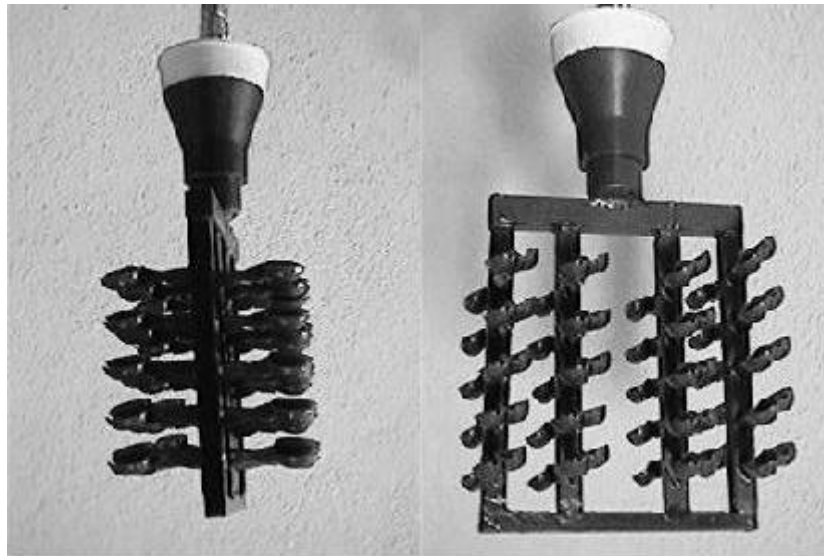


Figura 4. Cachos onde foram fixados os modelos de cera

A cera da superfície dos dois componentes é rapidamente fundida, e os componentes são pressionados entre si, até a ressolidificação da cera. A junta é então nivelada. Pode-se utilizar um adesivo fundido, em adição à soldagem. A soldagem manual da cera requer destreza e atenção consideráveis. Fixadores são essenciais para assegurar alinhamento na montagem dos modelos e frequentemente usados na montagem dos cachos. Os modelos devem ser adequadamente espaçados e alinhados (Horton, 1988). Deve-se tomar o cuidado de se evitar modelos danificados e gotas de cera sobre eles. A Figura (4) apresenta o modelo em cacho produzido para este trabalho. Cada cacho contém 40 modelos. Estes cachos serão utilizados para a construção dos moldes finais.

3.3. A Produção de Moldes Cerâmicos

Os moldes em casca na fundição de precisão são feitos pela imersão da árvore (cacho), em um banho cerâmico, remoção do banho em seguida, para escoamento da lama em excesso e produção de uma camada uniforme, e finalmente a cobertura com uma camada de partículas (estuco) de material refratário granulado, pela imersão dentro de um leito fluidizado ou aspersão das partículas. Esta etapa é denominada estucagem (Microinox, 1990; Horton, 1988). Esse processo é repetido por inúmeras vezes (5 a 10 vezes, dependendo do tamanho das peças) até formação de uma casca refratária suficientemente forte para resistir a basicamente dois grandes esforços (Microinox, 1990; Horton, 1988):

- saída do material termoplástico (cera) sob ação do calor;
- entrada do metal líquido e suportá-lo até completa solidificação.

A espessura da casca varia normalmente de 5 a 15 mm. É importante se utilizar materiais que suportem o metal fundido a altas temperaturas (cerca de 1650 °C) e evitem as reações metal-molde. A primeira camada fina de material cerâmico, forma a face interna do molde e reproduz todos os detalhes do modelo, incluindo sua superfície lisa. Ela contém, também, o agente aglomerante que propicia a resistência da casca.

Ao produzir a casca, cada camada deve estar endurecida antes de se aplicar a próxima, que é acompanhada por secagem. A última camada é normalmente deixada sem estuco para se evitar perdas de partículas da superfície do molde (Microinox, 1991).



Figura 5. Molde cerâmico após a deceragem

A retirada da cera é conhecida como deceragem. Não é possível retirar a cera em baixas temperaturas devido à expansão da mesma e a fragilidade da casca, podendo ocorrer trincas ou até mesmo a quebra. Várias técnicas têm sido empregadas para fundir a cera, dentre elas temos: autoclave, e a queima rápida. Optou-se pela autoclave, onde a cera é derretida sendo retirada de dentro do molde. A deceragem por autoclave permite a recuperação da cera.

Após este processo procede-se à calcinação que tem por objetivo fortalecer a casca cerâmica e a retirada de todo o resíduo de cera que ainda esteja no interior do molde. A Figura (5) apresenta o molde após o processo de deceragem, anterior à calcinação.

Após a calcinação, retira-se a casca do forno e faz-se rapidamente o vazamento. O vazamento pode ser por gravidade, centrifugação, sucção ou a vácuo. O equipamento de fusão depende das ligas utilizadas. Para ligas não ferrosas utilizam-se normalmente fornos a gás ou elétricos e para ligas ferrosas, fornos de indução de média ou alta frequência são mais usados. Pode-se realizar a fusão também a vácuo. Neste caso utilizou-se o processo de vazamento por gravidade. Após resfriamento dos moldes a casca refratária é removida através de vibração mecânica ou pelo processo manual. A Figura (6) apresenta o cacho das peças em aço inox, após a remoção da casca refratária.



Figura 6. Cacho logo após a remoção da casca refratária

3.4. Fundição da carcaça e do eixo

O processo utilizado para a fundição da carcaça é com molde de areia aglomerada com silicato de sódio e CO₂, o que permite um bom acabamento para este tipo de peça.

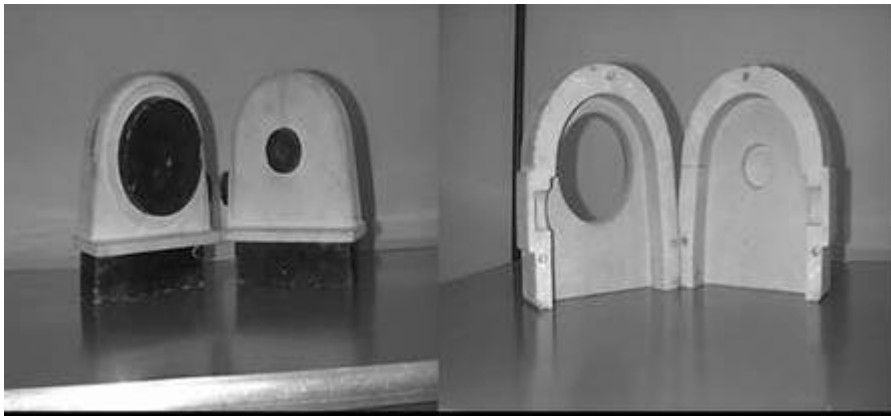


Figura 7. Modelo e caixa de macho para fundição da carcaça da turbina

A janela deixada na parte frontal da carcaça (janela de visualização de fluxo) deve ser usinada posteriormente para se obter um acabamento que permita o acoplamento da placa de acrílico para fechamento. O eixo foi usinado em aço inoxidável. O modelo e a caixa de macho utilizados para a confecção do molde em areia, são apresentados na Fig. (7) onde se podem observar os detalhes para fundição da peça.

O sistema de injeção também foi fundido em areia e posteriormente foi usinado alcançando assim as dimensões de projeto. O procedimento de fundição em areia é bastante difundido e de conhecimento amplo, desta forma não será descrito neste trabalho.

A agulha do injetor foi usinada em aço inox e o sistema de acionamento foi adaptado a partir de um reparo de registro de 3/4" convencional e disponível no mercado nacional.

4. MONTAGEM DA TURBINA E TESTES INICIAIS

O primeiro modelo foi construído com um único bico injetor, sendo posteriormente introduzido um segundo bico à 90° em relação ao primeiro, através da fundição de uma nova carcaça, como mostrado na Fig. (8).

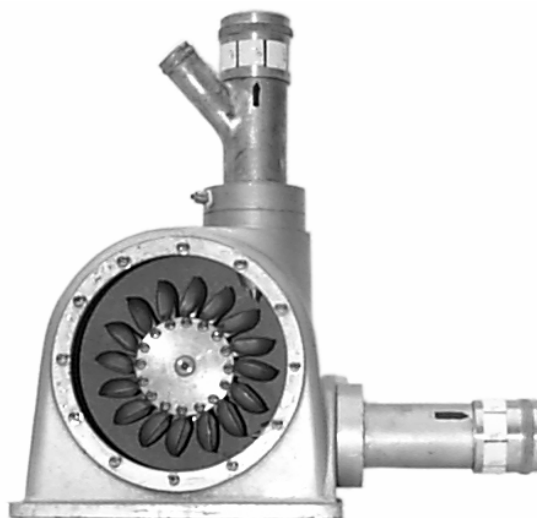


Figura 8. Modelo em escala reduzida

A Figura (9) apresenta a bancada de ensaios experimentais utilizada na realização dos testes.

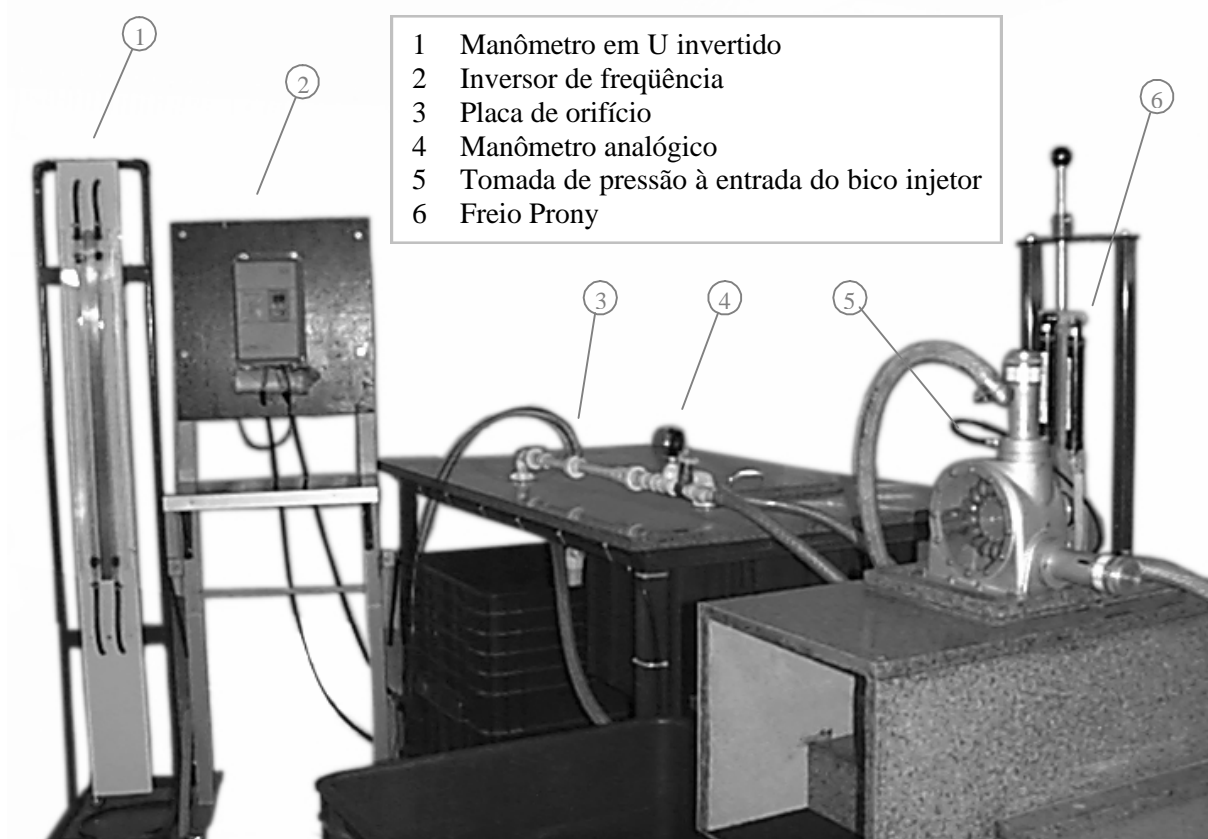


Figura 9. Bancada de ensaios experimentais

As curvas de rendimento do modelo reduzido foram levantadas em várias condições de funcionamento, de forma a se obter o ponto de operação da máquina. A curva onde foram obtidos os maiores rendimentos se refere aos seguintes parâmetros: queda líquida de 30 mca e rotação de 1800 rpm, representada pela Fig. (10).

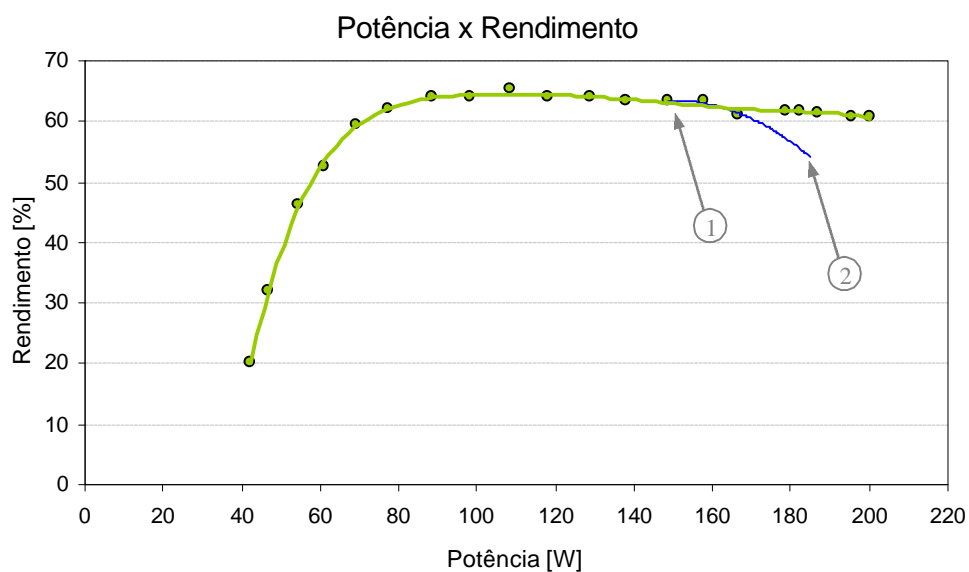


Figura 10. Curva de potência × rendimento do modelo

A Figura (10) mostra a curva de potência \times rendimento do modelo em escala reduzida, onde as legendas (1) e (2), representam respectivamente o ponto onde o segundo injetor entra em operação e a continuação da curva de rendimento para o funcionamento com apenas um bico injetor.

5. COMENTÁRIOS FINAIS

Apesar de existir uma grande variedade de equipamentos didáticos no mercado internacional, e de ser possível mediante um processo de importação adquiri-los, o esforço de concepção de um equipamento simples e tradicional com um arranjo similar tem como mérito iniciar um processo cultural de produção de equipamentos didáticos dentro das universidades. Este processo como descrito acima não se restringe apenas ao projeto do equipamento, mas a execução de todo o processo, que envolve desde o estudo de equipamentos similares existentes até a adaptação de processos disponíveis que permitam a execução do equipamento dentro de um ambiente acadêmico.

Além disso, a dificuldade de se obter em um único laboratório os equipamentos necessários a produção de um modelo de turbina induz o contato interdepartamental. Ainda dentro deste raciocínio a troca de experiência interinstitucional permite o trabalho de forma coordenada e em rede de cooperação efetivamente formando um vínculo bastante produtivo e interessante do ponto de vista acadêmico.

Apesar do equipamento construído ser bastante simples, e semelhante a equipamentos disponíveis (Macintyre, 1983; Armifield, 1991 e Didacta, 1991), o “Know-How” adquirido abre caminho para novos projetos e permitirá a médio prazo formar uma cultura cooperativa interdisciplinar que pode permitir um efetivo crescimento em termos de conhecimento e desenvolvimento.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração do SENAI - Centro Tecnológico de Fundação Marcelino Corradi (CETEF) de Itaúna - MG, nas pessoas dos engenheiros Alênio Wagner de Freitas e Ioná Macedo Leonardo Machado (cetef@fiemg.com.br), pela colaboração no desenvolvimento dos trabalhos de fundição, sem a qual não seria possível a realização deste projeto.

7. REFERÊNCIAS

- Macintyre, A.J., 1983, “Máquinas Motrizes Hidráulicas”, Ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, Brasil, 649 p.
- Carvalho, D.F., 1982, “Usinas Hidroelétricas. Turbinas”, FUMARC/UCMG, Belo Horizonte, Brasil, 197 p.
- Armifield, 1991, “Catálogo Técnico”, Bridge House, West Street, England.
- Salzard, J., 1965, “Hydraulique Apliquee a l'exploitation des Usines Hydroelectriques”, Dunod Paris.
- Microinox, 1990, “Fundição de Precisão”, São Paulo, Brasil, Vol. 1, No. 1.
- Horton, A.H., 1988, “Investment casting”, In Annual Handbook Metal Park, Vol. 15, pp. 253-269.
- Microinox, 1991, “Fundição de Precisão”, São Paulo, Brasil, Vol. 2, No. 4.
- Didacta Itália, 1991, “Idraulica”, Catálogo Técnico, Torino, Itália, pp. 1-11.

DESIGN OF PELTON TURBINE REDUCED MODEL

Alex Nogueira Brasil

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – UFMG / Faculdade de Engenharia – Universidade de Itaúna, Av. Dona Cota 397, Itaúna – CEP 35680-033.

brasil@brhs.com.br

Carlos Barreira Martinez

CPH – Centro de Pesquisas Hidráulicas/EHR – Departamento de Hidráulica e Recursos Hídricos – UFMG – Av. Antonio Carlos 6627 – Campus UFMG.

martinez@cce.ufmg.br

Jair Nascimento Filho

CPH – Centro de Pesquisas Hidráulicas – UFMG/DEMEC – Departamento de Engenharia Mecânica – UFMG – Av. Antonio Carlos 6627 – Campus UFMG.

jair@demec.ufmg.br

***Abstract.** This work deals with the study, analysis and design of a Pelton turbine reduced model for use in a test bench. Firstly, the turbine power and geometry are analyzed to select the proper design for the available test bench. Secondly, the turbine components are designed in order to allow the system assembly. The design requirements are based on both hydraulic and mechanic characteristics. Next, the design criteria used in the material analyses are presented. The rotor blades are manufactured by casting with stainless steel. The housing cast with aluminum and allows the use of 1 or 2 nozzles.*

***Keywords.** Pelton turbines, turbomachine testing, reduced model.*