

**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia de Energia**

**A INFLUÊNCIA DE DIFUSOR NA EFICIÊNCIA DE
UMA TURBINA HIDRÁULICA**

**Autor: Ina Tayane Barbosa Tavares
Orientador: Dr. Augusto César de Mendonça Brasil
Co-Orientador: Dr. Luciano Gonçalves Noletto**

**Brasília, DF
2014**



INA TAYANE BARBOSA TAVARES

A INFLUÊNCIA DE DIFUSOR NA EFICIÊNCIA DE UMA TURBINA HIDRÁULICA

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Doutor Augusto César de Mendonça Brasil

Co-Orientador: Doutor Luciano Gonçalves Noleto

**Brasília, DF
2014**

CIP – Catalogação Internacional da Publicação

Barbosa, Ina Tayane.

A influência de difusor na eficiência de uma turbina hidráulica / Ina Tayane Barbosa Tavares. Brasília: UnB, 2014.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília
Faculdade do Gama, Brasília, 2014. Orientação: Professor Dr.
Augusto César de Mendonça Brasil.

1. Turbina Hidráulica. 2. Difusor. 3. Eficiência I. Brasil, Augusto.
II. Doutor.

CDU Classificação



A INFLUÊNCIA DE DIFUSOR NA EFICIÊNCIA DE UMA TURBINA HIDRÁULICA

Ina Tayane Barbosa Tavares

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 28/11/14 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof. Doutor Augusto César de Mendonça Brasil, UnB/ FGA
Orientador

Prof. Doutor Luciano Gonçalves Noletto, UnB/ FGA
Co-Orientador

Prof. Doutor Jorge Andrés Cormane Angarita, UnB/ FGA
Membro Convidado

Prof. Doutora Cristina de Abreu Silveira, UnB/ FGA
Membro Convidado

Brasília, DF
2014

Esse trabalho é dedicado à minha família que tanto contribuiu para o meu crescimento pessoal e intelectual.

AGRADECIMENTOS

Chegar à etapa final do curso com o sentimento de que o dever está sendo bem cumprido é algo extremamente gratificante e chegar até aqui sozinha não seria possível. Portanto, aproveito este trabalho de tamanha importância para agradecer a todos que estavam e estão ao meu lado.

Primeiramente, gostaria de agradecer à Deus, poderoso criador que me deu forças para lutar pelos meus sonhos e concretizá-los realidade. Ao meu anjinho, Ivan, que está olhando e cuidando de mim em cada passo e que me ensinou a ser uma pessoa muito melhor. À minha mãe, Tânia, por sempre me motivar e não me deixar desistir, mostrando-me sempre o melhor caminho a ser seguido, pelo colo de mãe e pela paciência durante esses anos de graduação. Ao meu querido pai, Lourival, por todo o cuidado e preocupação com o meu desenvolvimento, buscando me dar a melhor educação possível, se privando e sacrificando em prol do meu crescimento intelectual. Aos meus irmãos, André Victor, Tâmara e Manuella, por todo o carinho, puxões de orelha e distrações tantas vezes necessárias. Aos meus avós, André e Isilene, com suas broncas pelas olheiras e por faltar os almoços em família. Aos meus padrinhos, José Alves e Adriane, por serem os melhores padrinhos do mundo, invejados por todos os meus amigos, onde sei que sempre terei amparo. Ao meu afilhado, Robson Henrique, que nasceu e junto com ele trouxe uma alegria inexplicável. Aos meus primos, pela felicidade de fazer parte de uma família tão maravilhosa e, principalmente, à minha priminha, Camile, que trouxe muitos risos e a inocência de criança à minha casa durante o período que conviveu conosco. À minha tia, não de sangue, mas de coração, Luzinete Carvalho que acreditou no meu potencial quando eu ainda era apenas uma menina.

À minha melhor amiga, Barbara, pelas noites perdidas com cálculos gigantes, pelos diversos trabalhos feitos juntas, pelos ensinamentos e, principalmente, pela companhia maravilhosa nesses anos. Ao meu ex-professor, Marcello Toledo, amigo com quem aprendi muito e cujo a amizade levarei pro resto da vida. À minha amiga Yasmim, por todas as risadas e choros compartilhados. À minha amiga Daniela Lima por todas as disciplinas e fofocas compartilhadas. Ao meu grande amigo Breno Prince que voltou da Itália e trouxe junto uma alegria contagiante. Ao meu amigo Danilo Oliveira pela grande ajuda com a parte experimental deste trabalho. Às minhas meninas pelos encontros sempre divertidíssimos. Aos amigos verdadeiros que fiz na Universidade, que compartilharam do sofrimento e também dos bons momentos e pela união onde um sempre tentava ajudar o outro nas dificuldades acadêmicas. E aos amigos que fiz por toda a vida, que puderam me trazer muitos momentos de alegria, sendo a válvula de escape desta turbulenta vida de uma estudante de engenharia.

Gostaria também de fazer um agradecimento especial aos meus mestres que dedicaram seu tempo para passar parte de seus conhecimentos. Principalmente ao meu orientador, Augusto Brasil, pela sua dedicação à sua inquieta orientanda. Ao meu co-orientador, Luciano Noletto, pelas aulas exclusivas para a conclusão deste trabalho. À mais que professora, Vitória Ferrari, pelo carinho maternal com que sempre tentava me colocar pra cima em todas as situações, me passando boas lições pra vida. À minha professora e amiga Cristina Abreu pelas horas de conversa e companhia. À professora Thais Maia pelo astral inigualável e pelas terapias gratuitas e aos professores que me deram a confiança de projetos e monitorias em que aprendi muito - acadêmica e socialmente - Josiane Aguiar, Ricardo Fragelli e Vanessa Castro.

Meu muito obrigada por me ajudarem a concretizar não só um trabalho, mas o sonho de me tornar uma Engenheira de Energia.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas graças a Deus, não sou o que era antes.”

(Marthin Luther King)

RESUMO

O Brasil tem um grande potencial hídrico e mesmo a maior parte de sua produção de energia elétrica sendo hidráulica, uma grande parcela desses recursos não são utilizados. Na região da Amazônia, onde está concentrada a maior parte de toda essa água, existem locais em que não tem interligação ao SIN. A proposta deste trabalho é a utilização da turbina Indalma para a geração de energia elétrica nesses pequenos municípios. Fez-se então o estudo da eficiência dessa turbina com o dimensionamento de três formatos de difusores: cilíndrico, tronco-cônico e cilíndrico/tronco-cônico. Avaliando a influência do difusor na eficiência da turbina Indalma instalada no laboratório de TermoFluidos da Faculdade UnB Gama. Dessa forma se obteve o melhor difusor para a turbina hidráulica estudada, resultando em maior eficiência. Com essa otimização a turbina se torna mais atraente, sendo uma forma de incentivo ao seu uso.

Palavras-chave: Turbina Hidráulica. Difusor. Eficiência.

ABSTRACT

Brazil has a large hydro potential and even most of their electric production being hydraulic a great amount of this resource are not used. In the Amazon region, where is concentrated the largest part of that water, exist sites not connected to the SIN. The purpose of this study is the use of the Indalma turbine to generate electricity in these small cities. The efficiency of this turbine was made with three diffusers formats: cylindrical, conical frustum, and cylindrical/conical frustum. Evaluating the diffuser influence in the Indalma turbine that is installed in the ThermalFluid Lab on the the Faculty Gama. Thereby obtained the best diffuser to the hydraulic turbine in study that result in a higher efficiency. With this optimization, the turbine becomes more attractive, and stimulate its use.

Keywords: Hydraulic turbine. Diffuser. Efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Matriz de geração elétrica mundial (MME, 2013).

Figura 2. Matriz de geração elétrica brasileira (MME, 2013).

Figura 3. Disponibilidade hídrica estimada para o país (ANA, 2013).

Figura 4. Proporcionalidades na geração da matriz elétrica brasileira (ANEEL, 2014).

Figura 5. UHEs, PCHs e CGH's do Brasil (ANEEL/SIGEL, 2014)

Figura 6. SIN Horizonte 2014 (ONS, 2014).

Figura 7. Campo de aplicação de turbinas hidráulicas (HENN, 2006).

Figura 8. Turbina Indalma: a) Vista Lateral; b) Vista Frontal (TIAGO FILHO et al, 2006).

Figura 9. Arranjo típico de uma turina Francis de eixo vertical (COSTA, 2003).

Figura 10. Visualização do rotor: a) com difusor; b) sem difusor. (COELHO, 2006).

Figura 11. Disposição da saída de água da turbina.

Figura 12. Difusores: a) cilíndrico; b) tronco-cônico; c) cilíndrico/tronco-cônico.

Figura 13. Vista isométrica dos difusores projetados em CATIA: a) cilíndrico; b) tronco-cônico; c) cilíndrico/tronco-cônico.

Figura 14. Fotografia dos difusores construídos: a) tronco-cônico; b) cilíndrico/tronco-cônico.

Figura 15. Bancada localizada no laboratório de TermoFluidos da Faculdade UnB Gama (OLIVEIRA, 2014).

Figura 16. Vertedor Triangular com $\alpha = 90^\circ$ (MACINTYRE, 1983).

Figura 17. Medidores de pressão: a) analógico; b) de coluna d'água.

Figura 18. Freio dinamométrico de Prony.

Figura 19. Gráfico Eficiência x Rotação comparativo dos difusores tronco-cônico com linhas de tendência.

Figura 20. Gráfico Melhor eficiência x Difusor tronco-cônico.

Figura 21. Gráfico Eficiência x Rotação comparativo dos difusores cilíndrico/tronco-cônicos com linhas de tendência.

Figura 22. Gráfico Melhor eficiência x Difusor cilíndrico/tronco-cônico com erro em 10°.

Figura 23. Gráfico Melhor eficiência x Difusor cilíndrico/tronco-cônico.

Figura 24. Gráfico Eficiência x Rotação comparativo sem difusor e difusores cilíndrico/tronco-cônicos de 0 e 15° com linhas de tendência.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Eficiências com a utilização de difusores cilíndrico/tronco-cônico e seus respectivos erros.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Classificação de turbina quanto a trajetória da água. (MME, 2008).

LISTA DE SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEM	Balanço Energético Nacional
CGH	Centrais Geradoras Hidrelétricas
EOL	Centrais Geradoras Eólicoelétricas
MME	Ministério de Minas e Energia
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
ONU	Organização das Nações Unidas
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia
SIGEL	Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico
SIN	Sistema Interligado Nacional
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UFV	Usina Fotovoltaica
UHE	Usinas Hidrelétricas
UTE	Usinas Termelétricas
UTN	Usinas Termonucleares

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. MOTIVAÇÃO	14
1.1.1 Energia Hídrica no Brasil.....	14
1.1.2 Eficiência Energética.....	17
1.2. OBJETIVOS.....	18
1.2.1 Objetivo Geral	18
1.2.2 Objetivos Específicos	18
2. ESTADO DA ARTE	19
2.1. TIPOS DE TURBINAS	19
2.2. TURBINA INDALMA	20
2.3. DIFUSOR DE UMA TURBINA HIDRÁULICA	21
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	23
3.1. EFICIÊNCIA DE UMA TURBINA HIDRÁULICA	23
3.2. INFLUÊNCIA DO DIFUSOR NA EFICIÊNCIA DE UMA TURBINA HIDRÁULICA	25
4 MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1. CONTRUÇÃO DOS DIFUSORES	28
4.2. ENSAIO EM BANCADA.....	30
4.2.1 Medição de Vazão.....	33
4.2.2 Medição de Pressão.....	34
4.2.3 Medição de Potência de Saída	34
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
7 RECOMENDAÇÕES.....	43
Bibliografia.....	44

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado a motivação para o estudo, considerando aspectos relativos à matriz energética brasileira, energia hídrica no Brasil e eficiência energética, seguido do objeto de estudo e finalizando com os objetivos do trabalho, geral e específicos.

1.1. MOTIVAÇÃO

A motivação do presente trabalho é buscar obter maior eficiência de uma turbina hidráulica de forma a incentivar o uso de Pequenas Centrais Hidrelétricas em áreas isoladas de eletricidade.

1.1.1 Energia Hídrica no Brasil

Como pode ser visto na Fig. (1) abaixo, o cenário mundial na geração de energia elétrica é apenas 20% renovável, ficando atrás do Brasil no fator sustentabilidade.

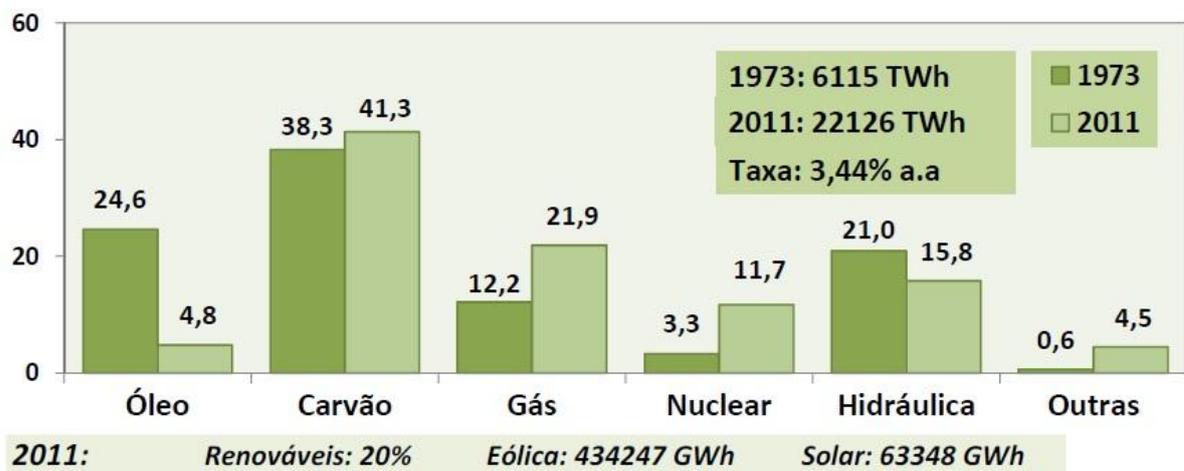


Figura 1. Matriz de geração elétrica mundial (MME, 2013).

A origem da matriz de geração elétrica brasileira é predominantemente renovável, sendo a geração hidrúlica responsável por maior parte de seu fornecimento elétrico (MME/EPE, 2013), como mostrado na Fig. (2) a seguir.

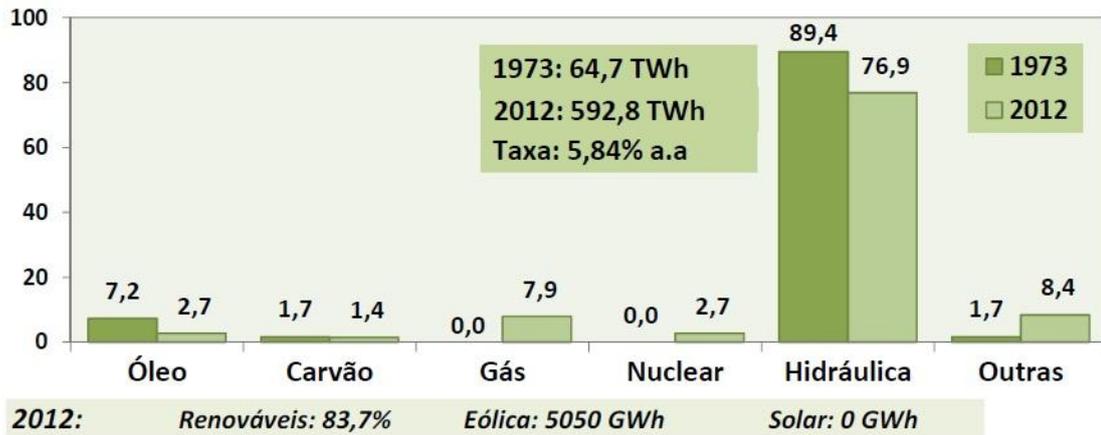


Figura 2. Matriz de geração elétrica brasileira (MME, 2013).

Em uma perspectiva mundial, o Brasil apresenta uma situação tranquila quanto aos recursos hídricos, sua disponibilidade hídrica se mostra satisfatória quando comparado aos valores fornecidos pela ONU referentes aos outros países. Entretanto, estes recursos não são bem distribuídos geograficamente no país, tendo uma concentração de cerca de 80% destes na região hidrográfica da Amazônia, onde há menor população. (ANA, 2013)

A discrepância entre a disponibilidade hídrica no Brasil pode ser melhor vista na Fig. (3) abaixo, mostrando a disponibilidade hídrica em cada região hidrográfica.

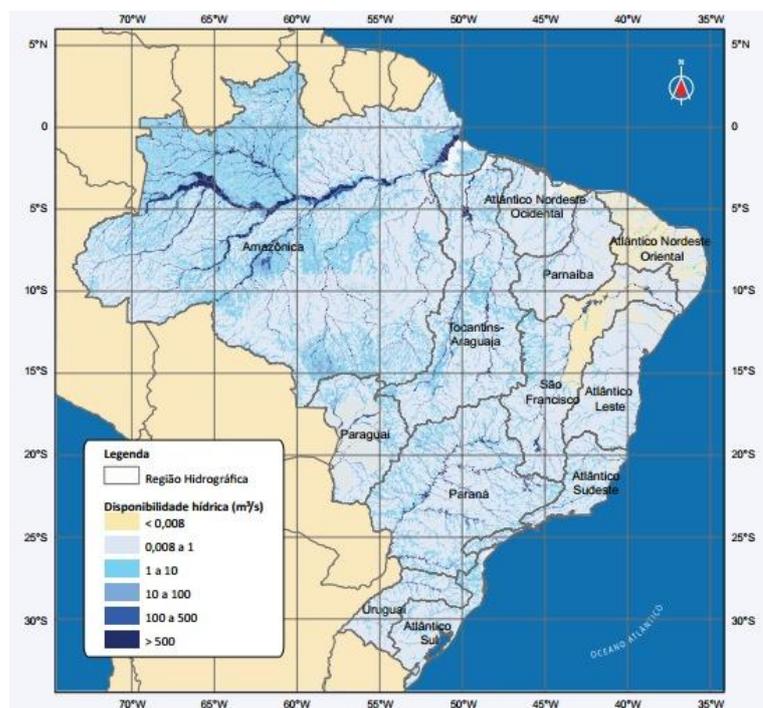


Figura 3. Disponibilidade hídrica estimada para o país (ANA, 2013).

Na Figura (4) a seguir, pode-se ter uma boa referência da origem da energia elétrica no país, onde as UHE's dominam o cenário elétrico brasileiro.

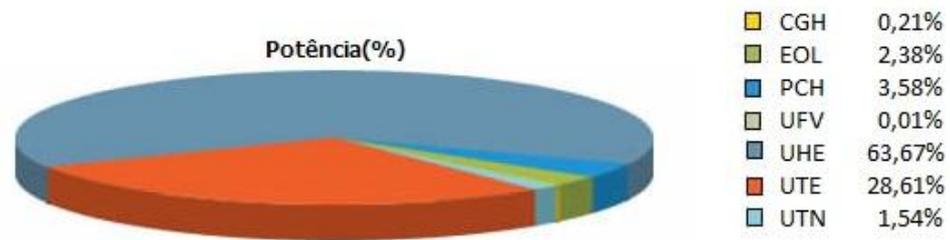


Figura 4. Proporcionalidades na geração da matriz elétrica brasileira (ANEEL, 2014).

Conforme visto na Fig. (4) acima, a energia hídrica é o grande potencial energético brasileiro, sendo responsável por cerca de 67,46% da geração de energia elétrica no país. Sendo que 63,67% são de UHE's, 3,58% são de PCH's e os outros 0,21% são de CGH's.

Mesmo a região hidrográfica da Amazônia mostrando grande disponibilidade hídrica, boa parte com vazão maior que 500 m³/s, não há concentração quantitativa de geração de eletricidade nesta região, conforme visto na Fig. (5) abaixo:

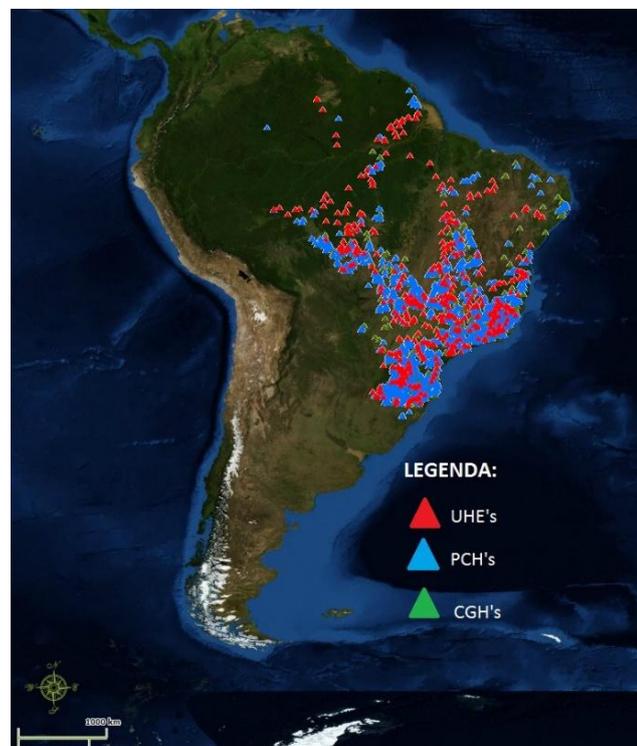


Figura 5. UHEs, PCHs e CGH's do Brasil (ANEEL/SIGEL, 2014).

Na Figura (6) abaixo, há a representação do Sistema Interligado Nacional no mapa do Brasil, onde as linhas contínuas simbolizam as linhas de transmissão existentes e as tracejadas simbolizam as linhas de transmissão futuras.

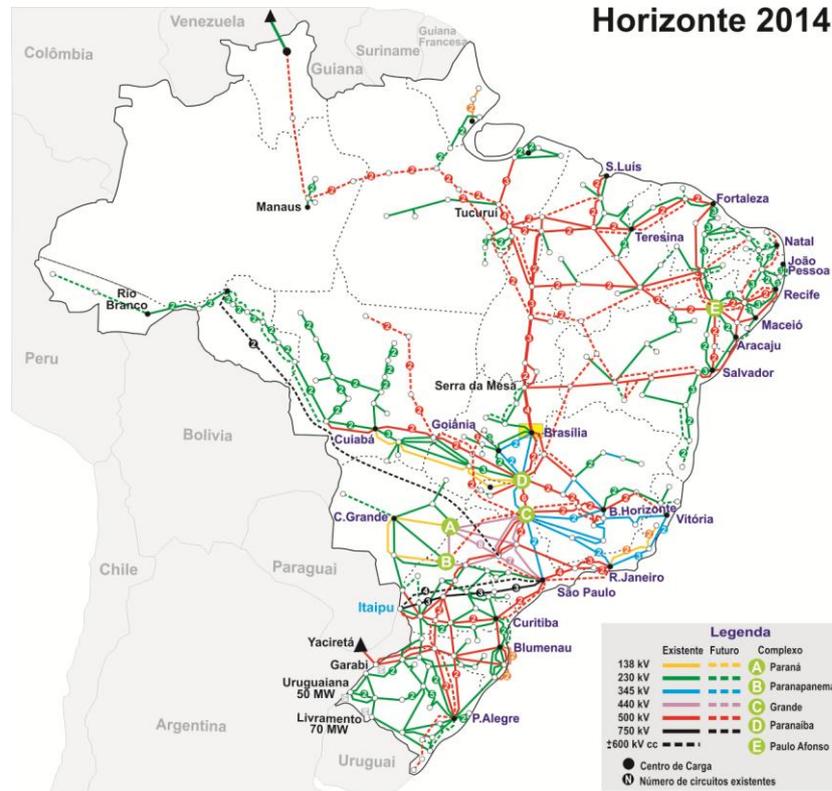


Figura 6. SIN Horizonte 2014 (ONS, 2014).

Para o abastecimento de energia elétrica em municípios em que não há disponibilidade de eletricidade fornecida pelo SIN, há a alternativa da criação de PCH's, sendo a turbina apresentada neste trabalho uma alternativa para esse tipo de geração.

1.1.2 Eficiência Energética

De acordo com a primeira lei da termodinâmica, eficiência energética é a razão entre a energia que o sistema entrega e a energia que é entregue ao sistema, ou seja, a razão entre a energia de saída e a energia de entrada (MARTINS, 1999).

Este tema tem tomado cada vez mais espaço nos debates de políticas mundiais de energia e meio ambiente (MENKES, 2004). E assim, os países tem se preocupado cada vez mais com essa questão. No Brasil, existem políticas para o incentivo do aumento de eficiência nos produtos, onde o principal é o Programa Nacional de Conservação de Energia (PROCEL).

O PROCEL tem como objetivo a redução do desperdício de energia elétrica tanto na produção, quanto no consumo, fazendo uma otimização da utilização da energia e reduzindo os impactos ambientais (MENKES, 2004).

Então, conforme foi visto, uma forma de aumentar a eficiência de um sistema é elevando a energia de saída dele sem alterar sua energia de entrada. Este trabalho propõe esse aumento da energia de saída para uma turbina hidráulica, tipo Indalma fazendo o uso de difusor para recuperação de pressão de saída, de forma a aumentar sua eficiência.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a variação da eficiência de uma turbina hidráulica tipo Indalma aplicando difusores no tubo de sucção da turbina de forma a responder à seguinte pergunta: Qual a melhor configuração de tubo de sucção que garanta melhor eficiência para a turbina hidráulica Indalma?

1.2.2 Objetivos Específicos

- Dimensionar os difusores com diferentes angulações;
- Desenhar em CAD os difusores utilizando o *software* CATIA;
- Construir os difusores desenhados;
- Realizar ensaios de bancada na turbina Indalma para as diversas configurações de tubos de sucção;
- Analisar comparativamente as eficiências com aplicação de difusores.

2. ESTADO DA ARTE

Neste capítulo é apresentado o estado da arte sobre turbinas hidráulicas, turbinas do tipo Indalma e a influência de difusores no tubo de sucção.

2.1. TIPOS DE TURBINAS

Turbinas são máquinas de fluxo motrizes que transformam energia de fluido em trabalho mecânico, com a passagem do fluido pela máquina. (HENN, 2006)

Existem dois tipos de turbinas: as de ação e as de reação. As de reação (ex: Francis e Kaplan) são as que o trabalho mecânico é obtido através da transformação de energia cinética e da pressão da água do escoamento através do rotor em energia mecânica, enquanto que as de ação (ex: Pelton) transformam apenas energia cinética, lançada na forma de um ou mais jatos de água ao rotor na condição de pressão atmosférica. (SCHREIBER, 1980)

As turbinas também podem ser classificadas quanto a trajetória do fluido no rotor conforme mostra o Quadro (1) a seguir:

Quadro 1. Classificação de turbina quanto a trajetória da água. (MME, 2008).

Classificação	Trajetoária da água	Turbina
Radial	Quando o fluxo d'água que passa pelas pás do rotor se efetua na direção radial	Francis
Axial	Quando o fluxo d'água que passa pelas pás do rotor toma a direção do eixo da máquina	Hélice, Kaplan
Tangencial	Quando a água incide nas pás na direção tangencial ao rotor	Pelton

Exemplos de tipos de turbinas hidráulicas são: Bulbo, Francis, Kaplan e Pelton. Essas turbinas são adaptadas para o funcionamento em usinas com determinada faixa de vazão e altura de queda. (ANEEL, 2008)

A Figura (7) apresenta os diversos tipos de turbinas hidráulicas e seu campo de aplicação considerando a altura de queda, a vazão e a potência de cada modelo. Com esta figura há maior facilidade na escolha de uma turbina para determinado local que já contenha tais características.

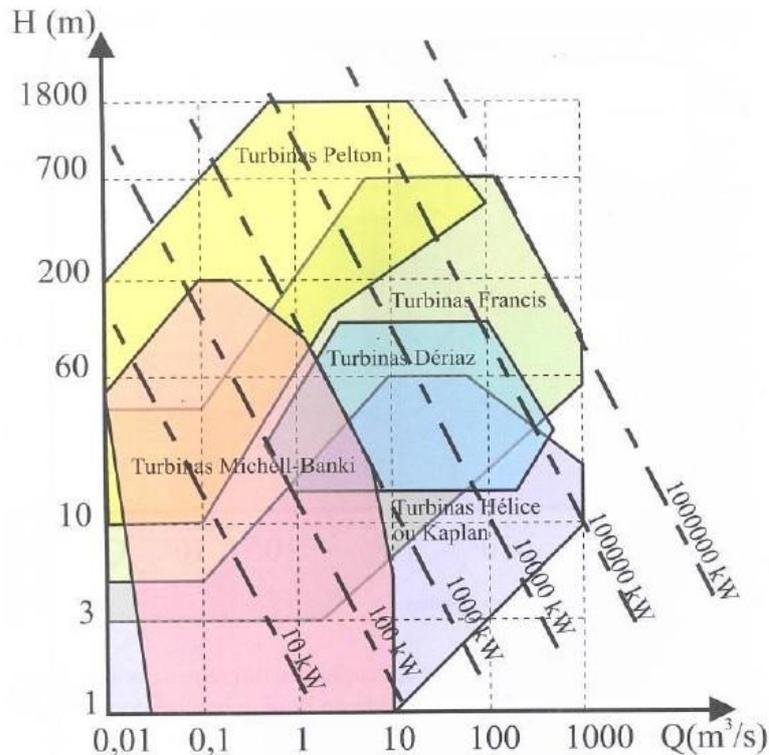


Figura 7. Campo de aplicação de turbinas hidráulicas (HENN, 2006).

De acordo com a figura acima, diferentes tipos de turbinas podem ser utilizados para o mesmo campo de aplicação. Logo, alguns outros parâmetros devem ser considerados na escolha da turbina, tais como: aspectos econômicos, custos de manutenção, riscos de cavitação, etc. (HENN, 2006)

2.2. TURBINA INDALMA

A turbina Indalma é uma turbina de reação não convencional fabricada pela empresa Indalma em Santarém, no estado do Pará. Seu rotor tem uma geometria diferente dos que geralmente são utilizados, podendo ser classificado como centrípeto-axial, e sua caixa espiral não possui sistema de regulação, além de possuir uma secção triangular (TIAGO FILHO *et al*, 2006). Esta turbina pode ser considerada uma alternativa viável para que seja implantada energia em comunidades isoladas (INDALMA, 2007).

A Figura (8) apresenta as vistas lateral e frontal da turbina hidráulica do tipo Indalma:

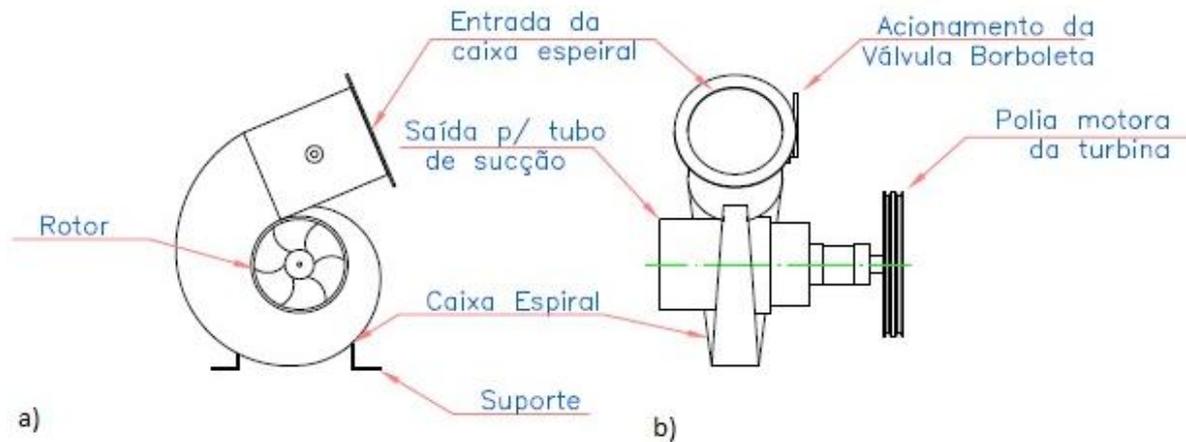


Figura 8. Turbina Indalma: a) Vista Lateral; b) Vista Frontal (TIAGO FILHO *et al*, 2006).

A turbina Indalma é uma junção de turbinas tipo Michel-Blank e Francis. Segundo o fabricante, a inovação está no desenho das pás e na entrada de água da turbina (SEPÚLVEDA *et al*, 2008).

2.3. DIFUSOR DE UMA TURBINA HIDRÁULICA

O difusor é uma parte fixa da turbina que conduz a água da saída do rotor até o nível jusante com a função de recuperar a altura entre a saída da roda e o nível do canal de fuga, restaurando parte da energia cinética que corresponde à velocidade residual da água na saída da roda. (SOARES JÚNIOR, 2013)

Esses dutos expandidos reduzem a velocidade do escoamento e assim, aumentam a pressão estática. Ao passar pelo difusor e sua velocidade ser diminuída, o escoamento converte uma quantidade de energia cinética em energia potencial de pressão. (COELHO *et al*, 2006)

É evidente a importância do uso de um difusor ao se considerar que a energia da água que deixa o rotor seria perdida sem o auxílio deste. Em alguns projetos, essa energia pode chegar a cerca de 50% da energia total disponível em alguns projetos. Contudo, com a utilização do difusor vedado ao ar por completo, há a formação de um vácuo parcial por conta da alta velocidade da água. Com essa

baixa pressão, a queda de pressão nas pás do rotor tende a aumentar, aumentando assim a eficiência global da turbina. (COSTA, 2003)

Na Figura (9) abaixo, é possível visualizar o tubo de sucção em um arranjo de uma turbina Francis de eixo vertical.

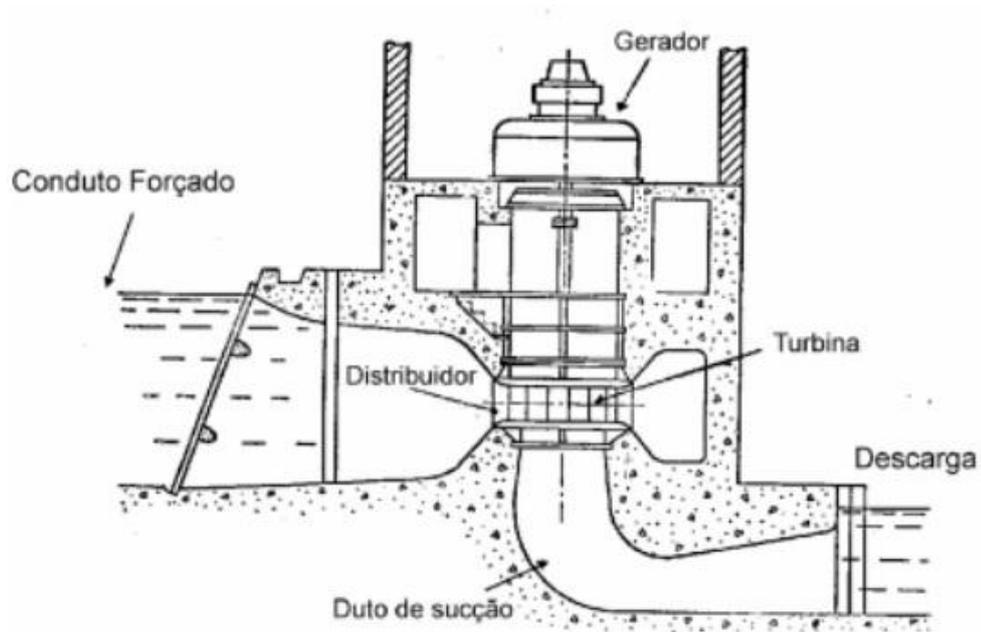


Figura 9. Arranjo típico de uma turina Francis de eixo vertical (COSTA, 2003).

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Para melhor analisar os dados adquiridos experimentalmente é preciso um referencial teórico, para que assim seja possível chegar aos resultados deste trabalho. Neste capítulo é apresentado o estudo da eficiência de uma turbina hidráulica e a influência do difusor nesta eficiência.

3.1. EFICIÊNCIA DE UMA TURBINA HIDRÁULICA

De acordo com a primeira lei da termodinâmica (HENN, 2006), entende-se que:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Energia que o} \\ \text{sistema recebe} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Energia que o} \\ \text{sistema entrega} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Variação de energia} \\ \text{total do sistema} \end{array} \right]$$

Assim sendo, a eficiência do sistema pode ser definida como:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Eficiência do} \\ \text{sistema} \end{array} \right] = \frac{\left[\begin{array}{c} \text{Energia que o} \\ \text{sistema entrega} \end{array} \right]}{\left[\begin{array}{c} \text{Energia que o} \\ \text{sistema recebe} \end{array} \right]}$$

Dessa maneira, a eficiência da turbina hidráulica pode ser definida pela Eq. (1) abaixo:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (1)$$

Onde,

P_{out} = potência de saída;

P_{in} = potência de entrada.

Para definir a energia que o sistema entrega e a energia que o sistema recebe é preciso fazer uma análise das energias de entrada e saída de uma turbina hidráulica.

A potência de entrada, por se tratar da energia entregue pelo fluido à turbina, é chamada de energia hidráulica e esta pode ser definida pela Eq. (2) abaixo, conforme a NBR 228 (ABNT, 1990):

$$P_{in} = \gamma \cdot Q \cdot H \quad (2)$$

Onde,

γ = peso específico da água;

Q = vazão volumétrica;

H = altura de queda líquida.

A altura de queda líquida pode ser determinada pela equação de Bernoulli, conforme a Eq. (3) abaixo:

$$H = \left(z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} \right) \quad (3)$$

Onde,

z_1 = nível na entrada da turbina;

z_2 = nível na saída da turbina;

P_1 = pressão na entrada da turbina;

P_2 = pressão na saída da turbina;

v_1 = velocidade na entrada da turbina;

v_2 = velocidade na saída da turbina;

γ = peso específico da água;

g = aceleração da gravidade;

A energia que o sistema entrega, potência de saída, é a potência de eixo na saída da turbina. Esta pode ser definida pela Eq. (4) abaixo:

$$P_{out} = \omega \cdot \tau \quad (4)$$

Onde,

ω = rotação;

τ = torque;

Dessa maneira, a eficiência da turbina pode ser rescrita conforme a Eq. (5) abaixo, onde as potências de entrada e de saída foram substituídas na Eq. (1) deste trabalho:

$$\eta = \frac{\omega \cdot \tau}{\gamma \cdot Q \cdot H} \quad (5)$$

3.2. INFLUÊNCIA DO DIFUSOR NA EFICIÊNCIA DE UMA TURBINA HIDRÁULICA

Para melhor entendimento de toda a formulação teórica da eficiência, foram montadas duas situações, uma com o difusor e outra sem, conforme mostra a Fig. (10), assim como foi feito por COELHO (2006).

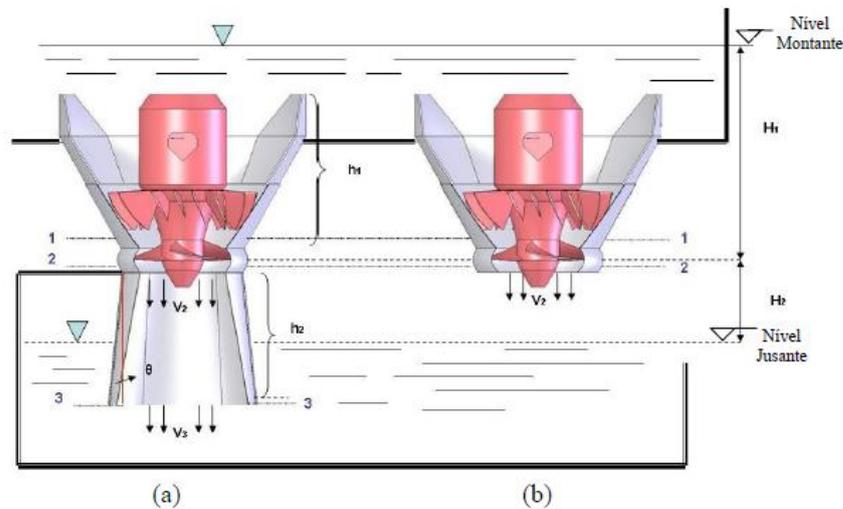


Figura 10. Visualização do rotor: a) com difusor; b) sem difusor. (COELHO, 2006).

Com referência ao nível de jusante, a energia específica antes do rotor, utilizando o teorema da conservação de energia, é dada por:

$$E_1 = \frac{p_a}{\rho} + gH_1 + gH_2 - gh_1 \quad (6)$$

Onde,

p_a = pressão atmosférica;

ρ = massa específica da água;

g = aceleração da gravidade;

H_1 = altura de queda referente ao montante;

H_2 = altura de queda referente ao jusante;

h_1 = perda de carga na passagem do escoamento, da tomada d'água ao início do difusor.

Fazendo esta mesma análise para a saída do rotor, tem-se que:

$$E_2 = \frac{p_2}{\rho} + gH_2 + \frac{v_2^2}{2} \quad (7)$$

Onde,

$$\frac{v_2^2}{2} = \text{energia cinética específica na saída do rotor.}$$

Assim sendo, a energia utilizada pelo rotor, obtida a partir da variação entre as energias E_1 e E_2 , é dada por:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{p_a}{\rho} - \frac{p_2}{\rho} + gH_1 - \frac{v_2^2}{2} - gh_1 \quad (8)$$

Fazendo uma primeira análise sem o difusor, Fig. (10b), nota-se que a pressão na saída do rotor, p_2 , é igual à pressão atmosférica, mesma pressão na entrada do rotor. Dessa forma, a diferença entre essas pressões é igual a zero. Então, a Eq. (8) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\Delta E_I = gH_1 - \frac{v_2^2}{2} - gh_1 \quad (9)$$

Analisando agora a turbina com o difusor, Fig. (10a), tem-se que a pressão na saída do rotor é diferente da pressão atmosférica. Utilizando o teorema de conservação de energia entre os pontos 2 e 3 na figura, tem-se que:

$$\frac{p_2}{\rho} = \frac{p_a}{\rho} - gH_2 - \frac{v_2^2}{2} + \left(gh_2 + \frac{v_3^2}{2} \right) \quad (10)$$

Onde,

h_2 = perda de carga no difusor.

Reescrevendo a Eq. (8), substituindo $\frac{p_2}{\rho}$ conforme a Eq. (10), tem-se:

$$\Delta E_{II} = (gH_1 + gH_2) - g \left(\frac{v_3^2}{2g} + h_1 + h_2 \right) \quad (11)$$

Para melhor visualizar as interferências do difusor a Eq. (11) pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$\Delta E_{II} = \boxed{gH_1 - \frac{v_2^2}{2} - gh_1} + gH_2 + \frac{v_2^2}{2} - g\left(\frac{v_3^2}{2g} + h_2\right) \quad (12)$$

Onde a parte da Eq. (12) em destaque no interior do retângulo é a energia utilizada pelo rotor sem o difusor, ΔE_I , e o restante da equação é a energia adicionada pelo uso do difusor.

Comparando a energia sem e com difusor, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- Pode-se usar, com o difusor, a queda H_2 para o aumento da potência disponível na turbina;
- Há uma recuperação de parte da energia cinética com o difusor, $v_3 < v_2$. Sendo que quanto menor v_3 , maior será essa recuperação;
- Como está se levando em conta mais uma perda com a utilização do difusor, h_2 , a escolha deste deve tentar minimizar esta perda.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos utilizados no trabalho desde a construção dos difusores até os ensaios em bancada. Para tanto, é necessário mostrar a disposição que se encontra a saída de água da turbina localizada no laboratório de TermoFluidos da Faculdade UnB Gama onde foram encaixados os difusores para teste, conforme representa a Fig. (11) abaixo:

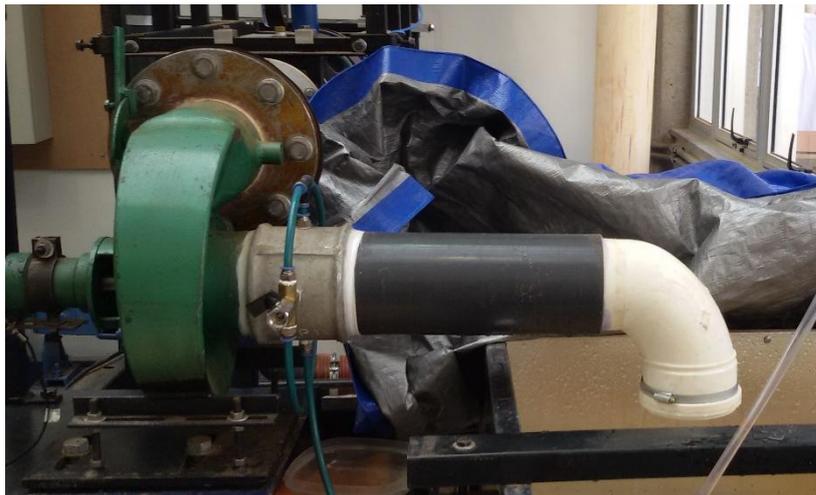


Figura 11. Disposição da saída de água da turbina.

Com a Figura (11) acima apresentada, há maior facilidade no entendimento da utilização dos difusores na turbina, tendo em vista a localização do encaixe destes.

4.1. CONTRUÇÃO DOS DIFUSORES

Os difusores foram estabelecidos em 3 (três) diferentes formatos: cilíndrico, tronco-cônico e cilíndrico/tronco-cônico, conforme mostra a Fig. (12). Onde se tem 1 (uma) unidade do cilíndrico, representando o difusor de 0° , 4 (quatro) unidades do tronco-cônico, com ângulos¹ 5° , 10° , 15° e 20° , e 5 (cinco) unidades do cilíndrico/tronco-cônico, com ângulos² -5° , 5° , 10° , 15° e 20° .

¹ Ângulos estes entre a linha pontilhada e a superfície tronco-cônica, de acordo com a Fig. (12b).

² Ângulos estes entre a linha pontilhada e a superfície tronco-cônica, de acordo com a Fig. (12c).

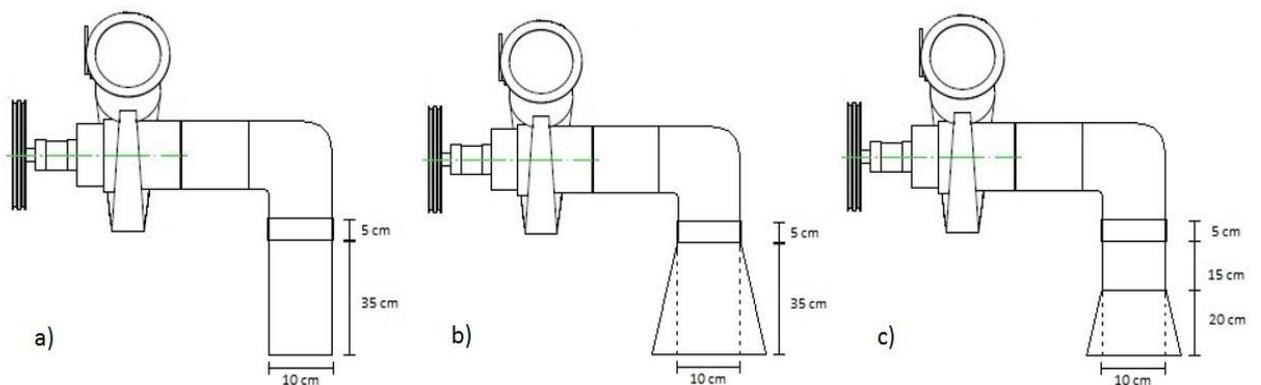


Figura 12. Difusores: a) cilíndrico; b) tronco-cônico; c) cilíndrico/tronco-cônico.

Primeiramente, os difusores foram projetados no programa CATIA, trazendo maior confiabilidade na hora de construí-los. Na Figura (13) abaixo tem-se as vistas isométricas dos difusores projetados, sendo um exemplo de cada formato.

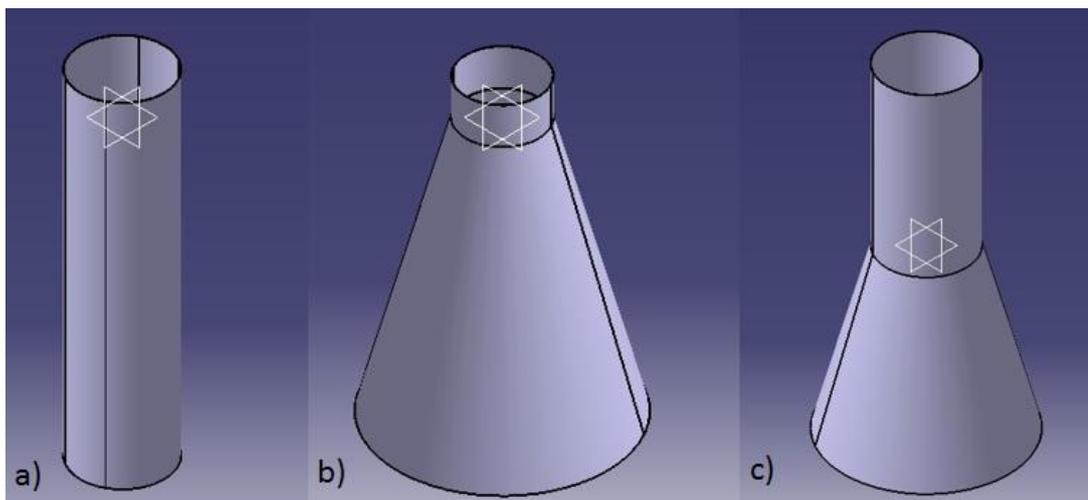


Figura 13. Vista isométrica dos difusores projetados em CATIA: a) cilíndrico; b) tronco-cônico; c) cilíndrico/tronco-cônico.

Com os difusores projetados, partiu-se então para a confecção de moldes em cartolina, tendo em vista que haveria grande dificuldade de desenhar as projeções destes diretamente no material apropriado.

Com os moldes finalizados, partiu-se para a real construção dos difusores com os seguintes materiais utilizados:

1. Tubo em PVC 100mm;
2. Chapa lisa galvanizada nº 26;
3. Rebite pop 4.0x16
4. Cola de silicone 280g FLEXITE incolor.

Para o difusor cilíndrico utilizou-se apenas o tubo de PVC, facilitando sua construção. Na construção dos difusores tronco-cônicos utilizou-se 5cm de tubo de PVC, para encaixe na saída da turbina, e a chapa lisa galvanizada. Nos difusores cilíndrico/tronco-cônicos utilizou-se 20cm de tubo de PVC, sendo 5cm destes para encaixe na saída da turbina, e a chapa lisa galvanizada. Na Figura (14) abaixo tem-se as fotografias dos difusores construídos, sendo um exemplo de cada formato.



Figura 14. Fotografia dos difusores construídos: a) tronco-cônico; b) cilíndrico/tronco-cônico.

Com os difusores prontos que se pôde partir para os ensaios na bancada instalada no laboratório de TermoFluidos da Faculdade UnB Gama, onde realizou-se o teste da turbina sem difusor e se repetiu utilizando os 10 (dez) difusores diferentes.

4.2. ENSAIO EM BANCADA

Os ensaios experimentais deste trabalho realizaram-se no laboratório de TermoFluidos localizado na Faculdade UnB Gama. Neste laboratório se encontra a bancada mostrada na Fig (15) a seguir:

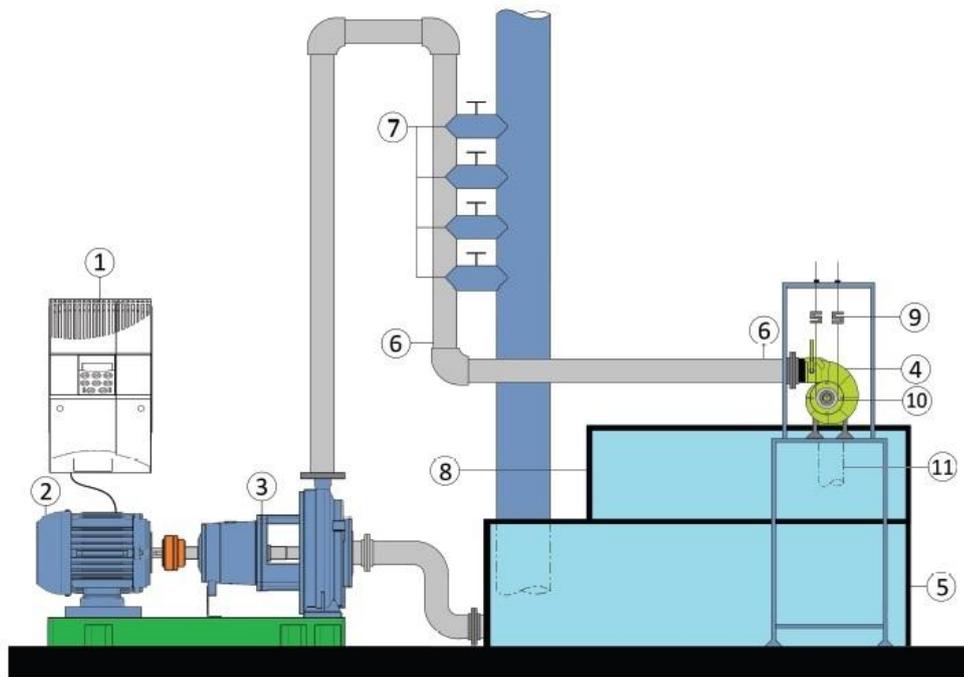


Figura 15. Bancada localizada no laboratório de TermoFluidos da Faculdade UnB Gama (OLIVEIRA, 2014).

Sendo:

1. Inversor de frequência WEG CFW09;
2. Motor WEG de 60Hz trifásico, 1750rpm e 25cv;
3. Bomba Hidráulica KSB ETAN100-250, $Q = 184,4\text{m}^3/\text{h}$, $H = 21,3\text{mca}$;
4. Turbina Indalma com diâmetro de entrada e de saída de 4”;
5. Reservatório com capacidade de 1.000l;
6. Medidores de pressão;
7. Válvulas manuais para regulação auxiliar de pressão;
8. Vertedor triangular;
9. Células de carga marca *Portable Eletronic Scale*, modelo H1765, 40kg;
10. Freio de Prony;

11. Saída da turbina onde se conecta os difusores.

Com a bancada mostrada acima, fez-se 11 (onze) testes diferentes, sendo estes os seguintes:

1. Sem difusor;
2. Com difusor cilíndrico (representando 0°);
3. Com difusor tronco-cônico de 5° ;
4. Com difusor tronco-cônico de 10° ;
5. Com difusor tronco-cônico de 15° ;
6. Com difusor tronco-cônico de 20° ;
7. Com difusor cilíndrico/tronco-cônico de -5° ;
8. Com difusor cilíndrico/tronco-cônico de 5° ;
9. Com difusor cilíndrico/tronco-cônico de 10° ;
10. Com difusor cilíndrico/tronco-cônico de 15° ;
11. Com difusor cilíndrico/tronco-cônico de 20° ;

Para cada ensaio dos 11 (onze) mostrados acima, variou-se a rotação de eixo, utilizando o freio de Prony e a rotação do inversor de frequência variando a vazão. Para tanto, as etapas abaixo foram seguidas:

1. Anotou-se os dados de altura do vertedor (para vazão) e raio do eixo (para torque);
2. Ligou-se o inversor de frequência na função P002, ajustando-o a pelo menos 950 rpm para inicialização do bombeamento;
3. Observou-se a presença de bolhas de ar no escoamento, eliminando-as caso houvesse;
4. Ajustou-se o inversor de frequência para uma rotação que garanta aproximadamente 4mca de altura de queda a montante da turbina;

5. Garantiu-se a estabilização dos equipamentos;
6. Anotou-se os valores de altura do vertedor, pressão à jusante da turbina, rotação do eixo e tensões aplicadas no freio de Prony conectado ao eixo;
7. Tracionava-se manualmente o freio de Prony para aumentar a carga, juntamente com o ajuste do inversor de frequência para reduzir a rotação em valores de 100rpm aproximadamente e garantir os 4mca de altura de queda;
8. Repetiu-se as etapas de 5 a 7 quantas vezes foram necessárias.

As eficiências foram calculadas a partir dos dados acima medidos.

4.2.1 Medição de Vazão

A vazão volumétrica foi determinada pelo método do vertedor triangular, mostrado na Fig. (16), conforme a NBR 13403 (ABNT, 1995).

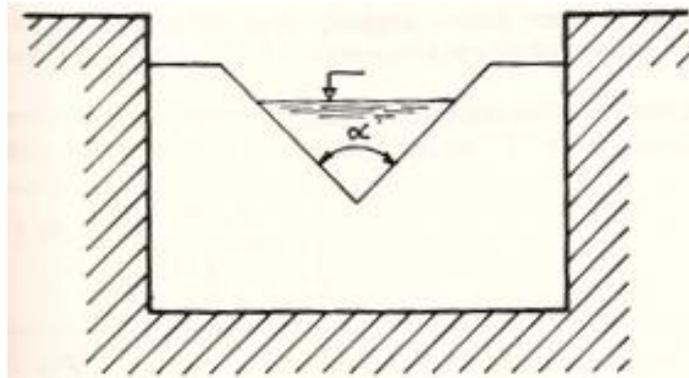


Figura 16. Vertedor Triangular com $\alpha = 90^\circ$ (MACINTYRE, 1983).

De acordo com MACINTYRE (1983), a vazão a partir deste método pode ser equacionada conforme a Eq. (13) a seguir:

$$Q = 1,4 \cdot h^{5/2} \quad (13)$$

Onde,

h = altura do vértice do triângulo ao nível d'água do vertedor;

4.2.2 Medição de Pressão

Para se determinar os dados de altura de queda livre, utilizou-se apenas a medição de diferença de pressão a montante e a jusante da turbina, tendo em vista que na Eq. (3) os fatores $v_1 \cong v_2$ e $z_1 \cong z_2$. Para tanto, foram utilizados manômetros: digital³, analógico e de coluna d'água, conforme mostra a Fig. (17) abaixo:



Figura 17. Medidores de pressão: a) analógico; b) de coluna d'água.

4.2.3 Medição de Potência de Saída

Para determinação da potência de saída foram medidos torque, raio e rotação.

O torque pode ser determinado através do freio dinamométrico de Prony, um dos dispositivos mais antigos e mais simples de se utilizar (MACINTYRE, 1983), conforme mostra a Fig. (18):

³ Manômetro digital com programação em arduino UNO com visualização na tela do computador.



Figura 18. Freio dinamométrico de Prony.

De acordo com OLIVEIRA (2014), o modelo utilizado na Fig. (18) acima é capaz de determinar o torque a partir da Eq. (14) abaixo:

$$\tau = r (F_1 - F_2) \quad (14)$$

Onde,

r = raio da aplicação da força no eixo;

F_1 = força na célula de carga 1;

F_2 = força na célula de carga 2.

Para medição da rotação foi utilizado um tacômetro de contato digital da marca minipa, modelo MDT-2245B, onde se obteve o valor da rotação do eixo em rpm.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No gráfico mostrado na Fig. (19) a seguir é possível visualizar a variação da eficiência com a rotação para cada ângulo dos difusores tronco-cônicos e suas respectivas linhas de tendência.

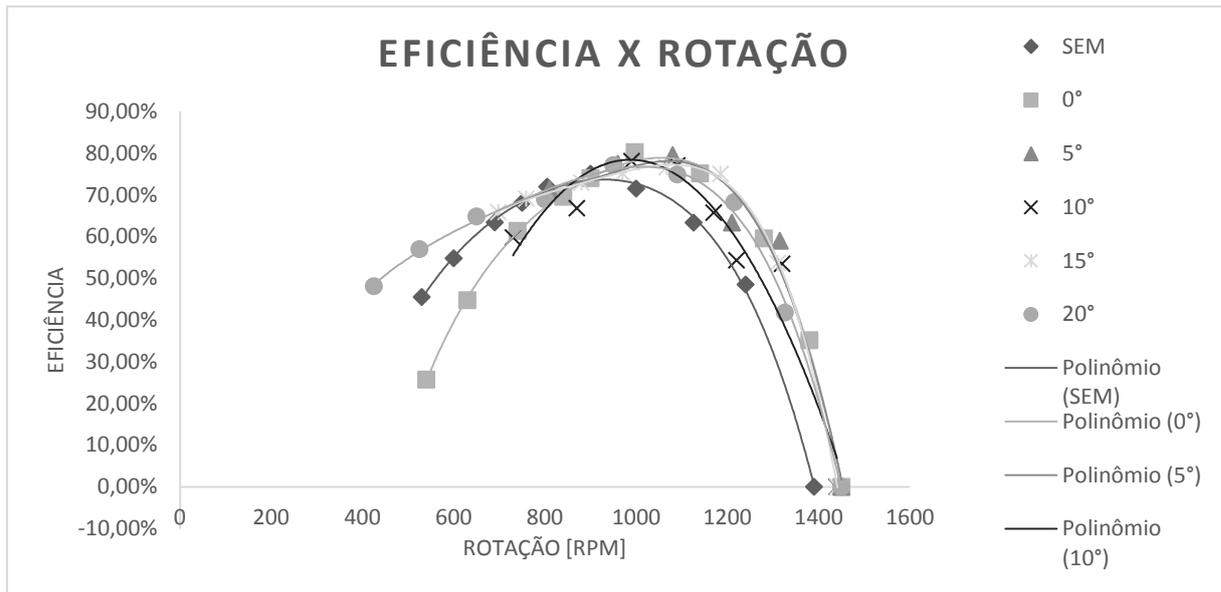


Figura 19. Gráfico Eficiência x Rotação comparativo dos difusores tronco-cônicos com linhas de tendência.

Para melhor análise de resultados da Fig. (19) fez-se um gráfico com a maior eficiência de cada difusor tronco-cônico, conforme mostra a Fig. (20) abaixo:

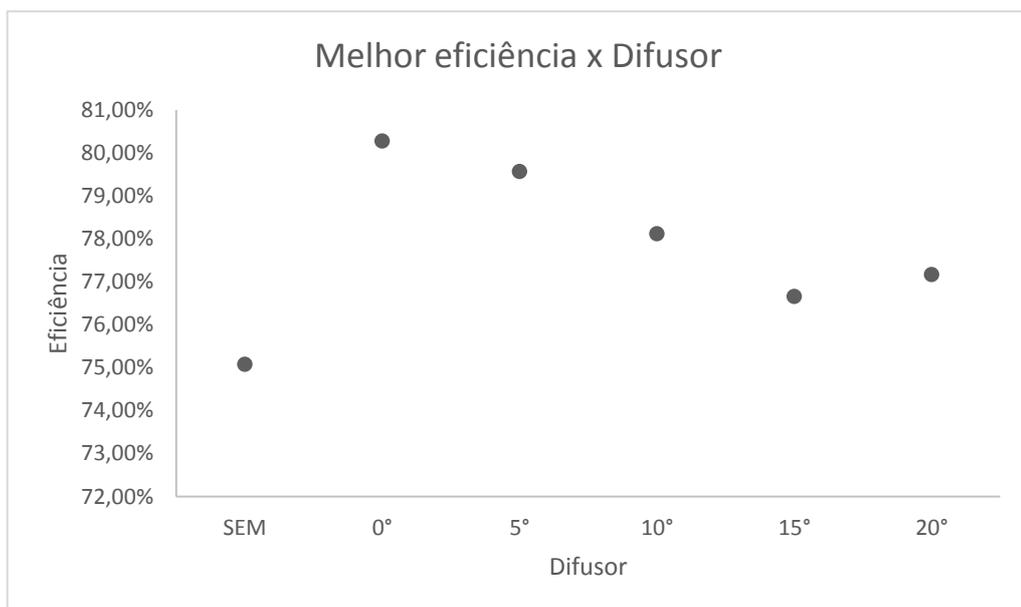


Figura 20. Gráfico Melhor eficiência x Difusor tronco-cônico.

No gráfico mostrado na Fig. (20) acima é possível ver que o aumento do ângulo do difusor tronco-cônico resultou em efeito contrário ao esperado, com eficiências menores do que a do difusor cilíndrico, ou difusor de 0° . Isso se deve ao fato da turbulência no tubo de sucção se propagar para a saída da turbina. O aumento do ângulo de difusor, nesse caso, promove a propagação dessa turbulência e o descolamento da camada limite.

Portanto a disposição do tubo de sucção à saída da turbina, conforme mostrado na Fig. (11), influencia substancialmente os resultados. Conseqüentemente a posição do difusor deve garantir a não propagação da turbulência.

O gráfico mostrado na Fig. (21) apresenta resultados de dois ensaios realizados, possibilitando visualizar a variação da eficiência com a rotação para cada ângulo dos difusores cilíndrico/tronco-cônicos e suas respectivas linhas de tendência.

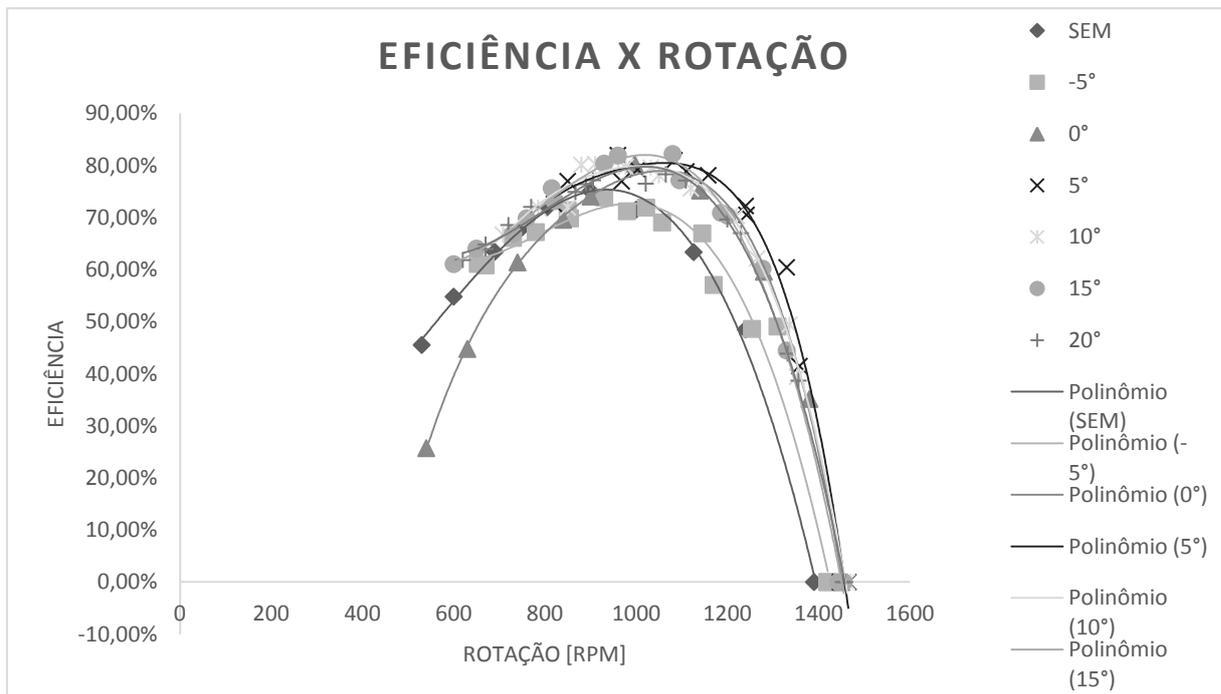


Figura 21. Gráfico Eficiência x Rotação comparativo dos difusores cilíndrico/tronco-cônicos com linhas de tendência.

Para melhor análise de resultados da Fig. (21) fez-se dois gráficos com a melhor eficiência de cada difusor tronco-cônico, sendo eles: do primeiro ensaio, mostrado na Fig. (22), e do segundo ensaio, mostrado na Fig. (23).

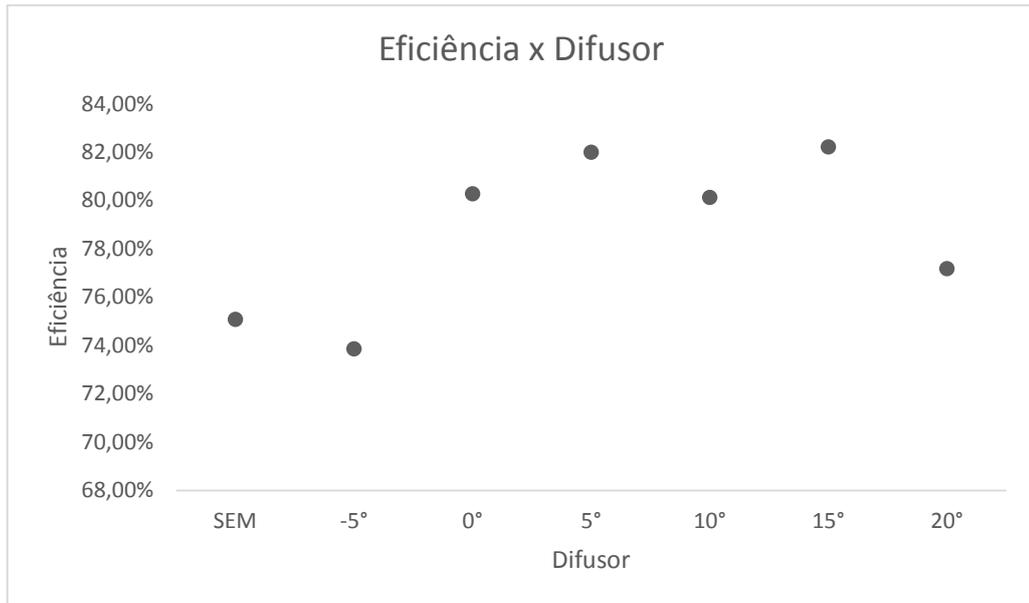


Figura 22. Gráfico Melhor eficiência x Difusor cilíndrico/tronco-cônico com erro em 10°.

O gráfico mostrado na Fig. (22) acima apresenta o aumento da eficiência com o aumento do ângulo de difusor desde -5° até 15°, a não ser pela menor eficiência apresentada no difusor de 10°. Este valor menor que o esperado foi resultado de dificuldades encontradas na realização dos ensaios em bancada, onde alguns fatores acabaram influenciando nos resultados experimentais.

O freio de Prony utilizado para aumento de carga aquecia o eixo, perdendo consequentemente a eficiência de freio. O resfriamento do eixo com água aumentava a eficiência do Prony, mas em questões de segundos o freio voltava a aquecer. Essa era uma das dificuldades nas medições, onde uma pequena demora para visualização dos diferentes equipamentos acabava acarretando em uma variação nos resultados, como mostra a medição com o difusor de 10°, apresentado na Fig. (22). Vale lembrar que mesmo o difusor de 10° tendo apresentado este resultado ele está dentro do erro esperado.

O resultado melhor executado minimizando os problemas citados acima, é apresentado na Figura (23), onde os resultados se mostram mais próximos ao esperado, mesmo não tendo grande variação quando comparados aos resultados da Fig. (22).

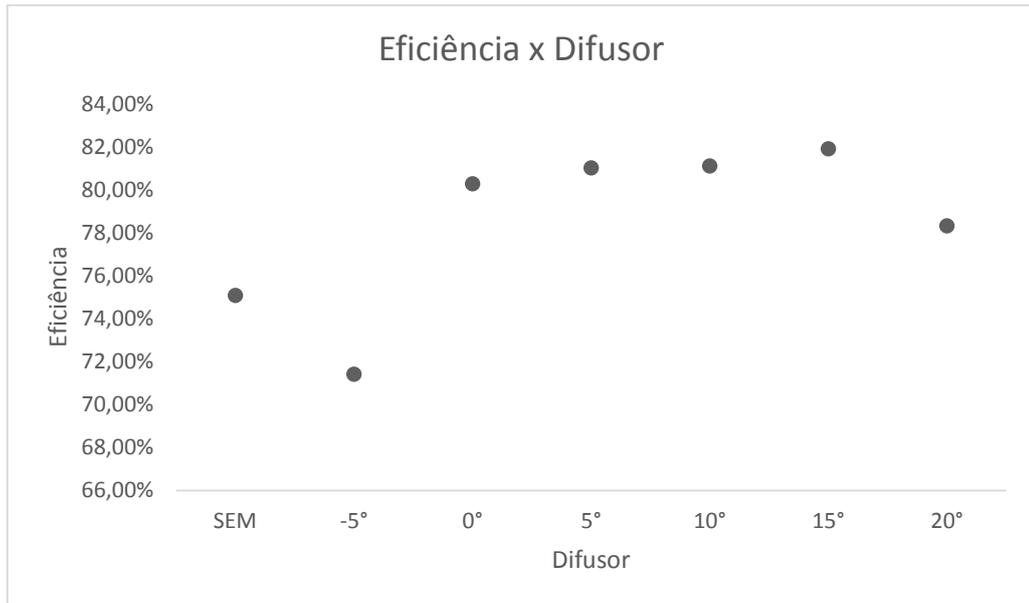


Figura 23. Gráfico Melhor eficiência x Difusor cilíndrico/tronco-cônico.

O gráfico apresentado acima mostra melhor o aumento das eficiências com o aumento do ângulo do difusor entre -5° e 15° . Como esperado, esse aumento de eficiência se deve pela redução de velocidade na saída do difusor e recuperação de pressão.

Como a turbina Indalma tem características pouco conhecidas, decidiu-se ampliar o estudo exagerando o ângulo de difusor pra -5° , com o objetivo de confirmar a diminuição de eficiência comparativamente ao ângulo de 0° . O resultado para a utilização do difusor de -5° foi confirmado com a redução da eficiência com valor mais baixo inclusive que a eficiência sem difusor. Isso se deve a um aumento de velocidade no tubo de sucção não havendo recuperação de pressão.

A partir de 15° o aumento da angulação do difusor resulta na diminuição da eficiência, como é possível ver no difusor de 20° mostrado na Fig. (23). Esse fato ocorre pelo descolamento da camada limite junto à parede do difusor, não permitindo a recuperação de pressão.

O melhor difusor apresentado no gráfico da Fig. (23) foi o de 15° . A Figura (24) abaixo apresenta um gráfico Eficiência x Rotação comparando as eficiências sem difusor e com os difusores de 0° e 15° .

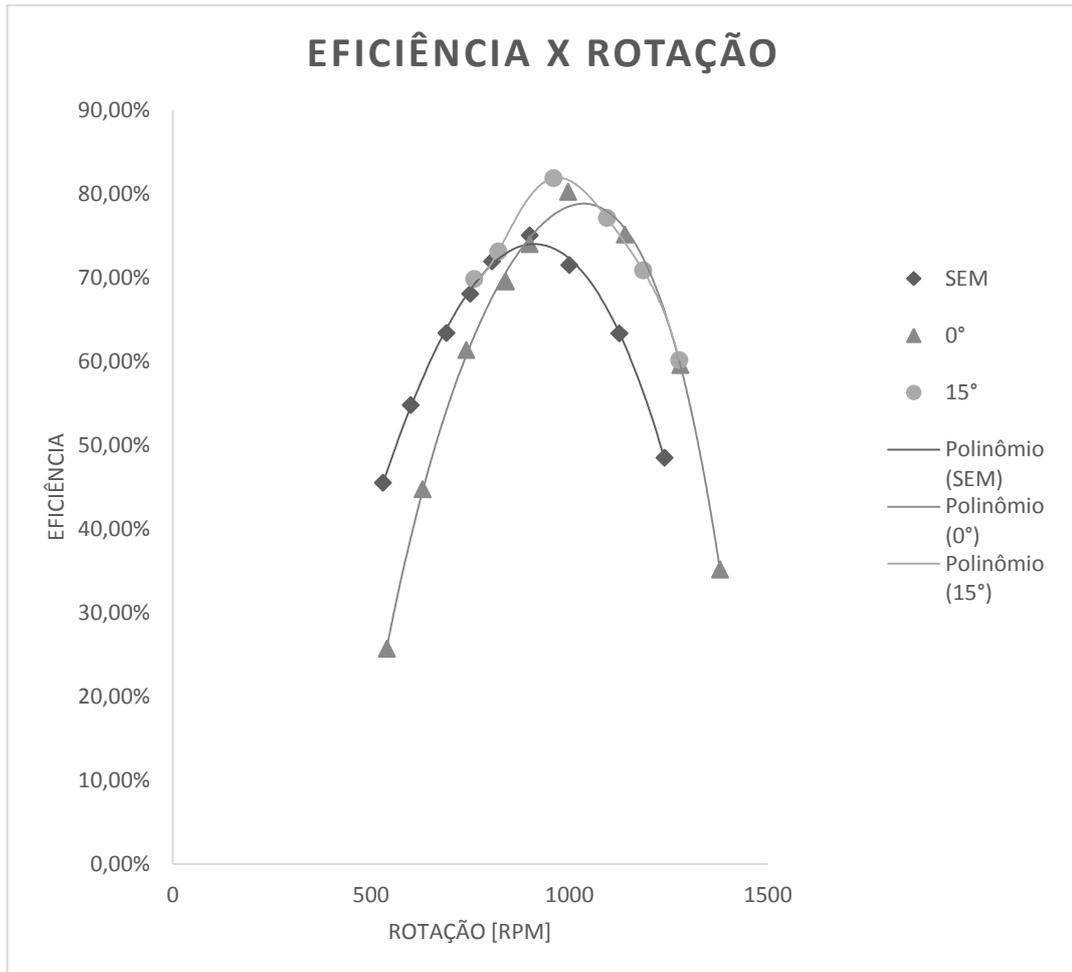


Figura 24. Gráfico Eficiência x Rotação comparativo sem difusor e difusores cilíndrico/tronco-cônicos de 0° e 15° com linhas de tendência.

Então, para a turbina Indalma estudada, o melhor difusor é o cilíndrico/tronco-cônico de 15°. Seu aumento de eficiência foi de aproximadamente 2% se comparado com o difusor de 0° e 7% se comparado com eficiência da turbina sem a utilização de difusor.

Na Tabela (1) a seguir é possível ver os valores das melhores eficiências dos dois ensaios realizados na turbina Indalma com a utilização dos difusores cilíndrico/tronco-cônico e seus respectivos erros calculados⁴ de acordo com OLIVEIRA (2014) que realizou testes na mesma bancada, com mesma turbina e mesmos equipamentos.

Tabela 1. Eficiências com a utilização de difusores cilíndrico/tronco-cônico e seus respectivos erros.

⁴ Considerou-se o pior caso, com erro igual a 6%.

DIFUSOR	Eficiência ± erro	
	Ensaio 1	Ensaio 2
SEM	(75,08 ± 4,5)%	(75,08 ± 4,5)%
-5°	(73,86 ± 4,43)%	(71,41 ± 4,28)%
0°	(80,28 ± 4,82)%	(80,28 ± 4,82)%
5°	(82,00 ± 4,92)%	(81,02 ± 4,86)%
10°	(80,13 ± 4,81)%	(81,11 ± 4,87)%
15°	(82,22 ± 4,93)%	(81,91 ± 4,91)%
20°	(77,18 ± 4,63)%	(78,32 ± 4,7)%

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o presente trabalho avaliou-se a influência do uso do difusor na eficiência de uma turbina hidráulica tipo Indalma através de ensaios experimentais com diferentes difusores construídos em 3 (três) diferentes formatos, cilíndrico, tronco-cônico e cilíndrico/tronco-cônico, além do ensaio sem a presença destes.

Os objetivos foram alcançados, tanto o geral quanto os específicos, onde se construiu 10 (dez) difusores diferentes, fez-se 11 (onze) testes e avaliou-se o melhor modelo dentre estes.

Com os resultados adquiridos foi possível ver que difusores em formato tronco-cônico não se mostram eficientes nesse tipo de turbina, o aumento do ângulo desse modelo de difusor resultou em efeito contrário ao esperado, com eficiências menores do que a do difusor cilíndrico, ou difusor de 0° . Isso se deve ao fato da turbulência no tubo de sucção se propagar para a saída da turbina e causar o descolamento da camada limite.

Para a turbina Indalma estudada, o difusor que se mostrou mais adequado foi o cilíndrico/tronco-cônico de 15° . Seu aumento de eficiência foi de aproximadamente 2% se comparado com o difusor de 0° e 7% se comparado com eficiência da turbina sem a utilização de difusor. Esse aumento de eficiência se deve à diminuição de velocidade e à recuperação de pressão.

O resultado com o difusor cilíndrico/tronco-cônico de -5° se mostrou contrário aos de 5° , 10° e 15° , por aumentar a velocidade e não ter a recuperação de pressão. Além disso, foi possível visualizar que a partir de uma certa angulação a eficiência volta a diminuir por conta do descolamento da camada limite, como aconteceu com o difusor de 20° .

Mostrando uma forma de geração de energia mais eficiente, com a utilização de um difusor, a transformação de energia através de PCH's se torna mais atraente, incentivando o uso de uma fonte renovável para áreas isoladas de energia elétrica.

Esse trabalho foi de grande crescimento na formação acadêmica de um engenheiro de energia, onde possibilitou a oportunidade de trabalhar com a otimização de um sistema, com a prática de conteúdos vistos em disciplinas específicas do curso de engenharia de energia e o funcionamento de uma mini hidrelétrica.

7 RECOMENDAÇÕES

Fica como recomendação alguns estudos que seriam interessantes à turbina Indalma instalada no laboratório de TermoFluidos da Faculdade UnB Gama, sendo eles:

- Simulação numérica com os difusores estudados neste trabalho, considerando a disposição da saída d'água da turbina;
- Estudo com difusores em material acrílico para possibilitar a visualização do comportamento do fluido na passagem por ele;
- Testes com tubo de sucção, semelhante ao da Fig. (9) deste trabalho, onde é esperado que se tenha melhores resultados.

Bibliografia

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

ABNT. NBR 228 – Turbinas Hidráulicas – Ensaio de Campo. Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1990.

Agência Nacional de Águas. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil. Brasília: ANA, 2013.

Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas de Energia Elétrica do Brasil. 3ª ed. Brasília: ANEEL, 2008.

Agência Nacional de Energia Elétrica. Banco de Informações de Geração, <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>, acesso em 12 de maio de 2014.

Agência Nacional de Energia Elétrica. Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico (SIGEL), <http://sigel.aneel.gov.br/sigel.html>, acesso em 12 de maio de 2014.

BARROS, E. V. A Matriz Energética Mundial e a Competitividade das Nações: Bases de uma nova Geopolítica. ENGEVISTA, v. 9, n. 1, p. 47-56, junho, 2007.

BASSETTI, B. L. Estudo e Projeto Básico de Uma Pequena Central Hidrelétrica. Vitória: UFES, 2008.

BUENO, J. A Matriz Energética Brasileira: Situação Atual e Perspectivas. Agosto, 2013.

CAIXETA, L. R; AMORIM, L. C. Modelagem, Fabricação e Caracterização de um Modelo Reduzido Funcional de Microturbina Francis. Brasília: UnB, 2014.

COELHO, J. G. Estudo Numérico de Tubos de Sucção de Turbinas Hidráulicas Tipo Bulbo. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas. Brasília: UnB, 2006.

COELHO, J. G; BRASIL JUNIOR, A. C. P; NOLETO, L. Escoamento Turbulento em Difusores Cônicos: Simulações Transientes. Anais da 5ª Escola de Primavera de Transição e Turbulência. Rio de Janeiro: EPTT, 2006.

Confederação Nacional de Indústria. Matriz Energética: Cenários, Oportunidades e Desafios. Brasília: CNI, 2007.

COSTA, A. S. Turbinas Hidráulicas e Conduitos Forçados. Março, 2003.

HENN, E. A. L. Máquinas de Fluido. 2ª ed. Santa Maria: UFSM, 2006.

INDALMA. Apresentação no 2º Seminário do Monitoramento dos Projetos-Pilotos com Energias Renováveis para Atendimento de Comunidades Isoladas. Brasília: MME, 2007.

MACINTYRE, A. J. Máquinas Motrizes Hidráulicas. Rio de Janeiro: Guanabara, 1983.

MARTINS, M. P. S. Inovação Tecnológica e Eficiência Energética. Rio de Janeiro: UFRJ, 1999.

MENKES, M. Eficiência Energética, Políticas Públicas e Sustentabilidade. Brasília: UnB, 2004.

Ministério de Minas e Energia. Energia no Mundo: Matrizes Energéticas e Elétricas Indicadores. Brasília: MME, 2013.

Ministério de Minas e Energia. Pequenos Aproveitamentos Hidroelétricos: Soluções Energéticas para a Amazônia. 1ª ed. Brasília: MME, 2008.

Ministério de Minas e Energia. Resenha Energética Brasileira. Brasília: MME, 2009.

Ministério de Minas e Energia; Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional. Brasília: MME/EPE, 2013.

MIRANDA, R. L. Regulação Técnica para se obter melhor Eficiência na Motorização de Pequenas Centrais Hidrelétricas no Brasil. Salvador: UNIFACS, 2009.

OLIVEIRA, D. S. Avaliação Experimental em Modelo Reduzido de uma Turbina Hidráulica. Brasília: Faculdade UnB Gama, 2014. [*in press*]

Operador Nacional do Sistema Elétrico. Sistema de Transmissão Horizonte – 2014, http://www.ons.org.br/conheca_sistema/mapas_sin.aspx, acesso em 14 de maio de 2014.

RAMAGE, J. Hydroelectricity. In: BOYLE, G. (Ed.). Renewable energy: power for a sustainable future. Oxford: Oxford University Press, 1996.

SANTOS, C. G. Dimensionamento e Simulação Computacional de um Rotor Hidráulico do Tipo Francis. Horizontina: FAHOR, 2012.

SCHREIBER, G. P. Usinas Hidroelétricas. 1ª ed. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 1980.

SEPÚLVEDA, S; WILKINSON, J; TIBURCIO, B; HERRERA; S. Série Desenvolvimento Rural Sustentável: Agroenergia e Desenvolvimento de Comunidades Rurais Isoladas. Brasília: IICA, 2008.

SOARES JÚNIOR, R. L. Projeto Conceitual de uma Turbina Hidráulica a ser Utilizada na Usina Hidrelétrica Externa de Henry Borden. Rio de Janeiro: UFRJ, 2013.

SOUZA, L. M. O. Geração Hidráulica em Velocidade Ajustável Utilizando Máquinas de Dupla Alimentação: Vantagens Ambientais e Operacionais. Rio de Janeiro: UFRJ, 2005.

TIAGO FILHO, G. L; LEMOS, H; NOGUEIRA, F. J. H. Estudo para energização de comunidade isolada na Amazônia - Projeto microcentral Canaã. Campinas: Encontro de Energia no meio Rural, 2006.

VENTURA FILHO, A. O Brasil no contexto Energético Mundial. São Paulo: NAIPPE/USP, 2009. Vol. 6.