

METODOLOGIA DE ENSAIO EM TÚNEL DE VENTO DE TURBINAS AXIAIS DE EIXO HORIZONTAL

Marianela M. Macias, nelamacmac@gmail.com¹

Rafael C.F. Mendes, rafael.cfmendes@gmail.com¹

Antonio C.P. Brasil Jr., brasiljr@unb.br¹

Taygoara F. Oliveira, taygoara@unb.br¹

¹Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Laboratório de Energia e Ambiente. 70910-900 Brasília. DF. BRASIL

Resumo: Este trabalho apresenta duas metodologias experimentais de ensaios de modelos de turbinas de eixo horizontal. O principal objetivo deste estudo é comparar os experimentos, conduzidos em túneis de vento aberto e fechado, por meio da medida de curvas de desempenho, representadas pelo coeficiente de potências (C_p) e a razão da velocidade de ponta de pá (TSR). O túnel de vento aberto tem uma seção de 2x2 m, com velocidade do escoamento variando entre 0 e 12 m/s. O túnel de vento fechado tem uma seção de teste de 1.2x1.2 m e uma variação da velocidade do ar de 0 a 15 m/s. No ensaio conduzido no túnel de vento aberto foi testada uma turbina eólica de 3 pás, 1 m de diâmetro e 500W. Já no ensaio em túnel fechado foi utilizado um modelo reduzido de turbina hidrocínética com três pás e 0.5 m de diâmetro. Para o cálculo do C_p foram tomadas medidas torque e rotação nas turbinas. Foram empregadas duas metodologias distintas para a medição do torque: a primeira baseada na medição direta na turbina durante os ensaios e outra indireta, por meio da calibração do gerador. O controle da velocidade de rotação do rotor, realizado por um controlador PID em ambos os casos, foi fator chave para sucesso dos ensaios. As curvas de $C_p \times$ TSR são apresentadas para as duas configurações estudadas. Os resultados experimentais reproduziram curvas semelhantes às obtidas por meio de simulações BEM (Blade Element Momentum).

Palavras-chave: Turbina de eixo horizontal, Túnel de vento, Coeficiente de potência, BEM

1. INTRODUÇÃO

A energia é fundamental para a prosperidade global, já que serve de base para o desenvolvimento econômico, social e a redução da pobreza. Desde a revolução industrial vem se observando a contribuição da disponibilidade de energia para o crescimento econômico mundial. Infelizmente esta interdependência está também relacionada com o aumento de impactos ambientais tais como aumento das emissões e uso intensivo de recursos naturais.

Do ponto de vista da produção eólica, o crescimento tem sido muito acelerado, devido à grandes avanços na tecnologia aplicada no desenvolvimento das turbinas. Desde a década de 1980, avanços aerodinâmicos e estruturais vêm fazendo com que a produção de energia elétrica, proveniente da eólica, cresça em torno de 5% ao ano, número esse bastante significativo para o mercado energético (Herbert *et al.*, 2007).

Baseada nos mesmos princípios que a energia eólica, a energia hidrocínética contida em correntes aquáticas (rios, marés ou outros canais de água artificiais) é considerada uma fonte de energia renovável que pode ser muito utilizada para produzir energia elétrica (Khan *et al.*, 2009). De fato, o aproveitamento do fluxo de água em turbinas hidrocínéticas está se tornando uma atraente fonte de energia devido à alta densidade de energia da água corrente, à sua boa previsibilidade e ao baixo impacto ambiental e humano. A tecnologia de turbinas hidrocínéticas está se desenvolvendo de forma rápida com diferentes conceitos e protótipos desenvolvidos em vários países (Kinsey *et al.*, 2011).

As turbinas axiais de eixo horizontal e fluxo livre (eólicas e hidrocínéticas) transformam a energia cinética contida no movimento de uma massa de ar ou água em energia mecânica no eixo que, subsequentemente, através do gerador, é transformada em energia elétrica. A conversão de energia é parametrizada classicamente por:

$$P = \frac{1}{2} \rho A u^3 C_p \quad (1)$$

onde P é a potência mecânica extraída pela turbina [W], ρ é a densidade do fluido [kg/m^3], A é a área do rotor [m^2],

u a velocidade do fluido [m/s], e C_p é o coeficiente de potência, uma medida de eficiência fluido-dinâmica da turbina.

O baixo impacto ambiental é um dos principais fatores que favorecem a aplicação de turbinas de eixo horizontal para conversão de energia, sejam eólicas ou hidrocinéticas. No caso de países em desenvolvimento, com comunidades pequenas e remotas situadas ao longo de rios com águas de corrente a instalação de turbinas hidrocinéticas vem sendo uma solução para produção de eletricidade (Van Els and Brasil Jr, 2015).

O estudo de turbinas hidrocinéticas de eixo horizontal ainda é muito incipiente e grande parte de sua concepção é feita em analogia com as turbinas eólicas. Essa similaridade também é reproduzida em ensaios experimentais em túnel de vento, devido a complexidade e custo de desenvolvimento de bancadas de ensaio adequadas para operação desses rotores. Atualmente, devido ao progresso tecnológico de técnicas computacionais, primeiro é feito um estudo numérico e posteriormente inicia-se a construção de protótipos e análises experimentais.

Os testes em túnel de vento e água de turbinas, tanto eólicas como axiais, tem dado a oportunidade de ter um ambiente livre de fortes anomalias no fluxo, isto é, maior controle sob as condições de entrada. Portanto, têm sido desenvolvidos obtendo dados estruturais e aerodinâmicos representativos de turbinas.

No presente trabalho são apresentadas duas metodologias experimentais para ensaios em túnel de vento de turbinas axiais de eixo horizontal. Na primeira delas, um modelo reduzido de turbina hidrocinética de 0,5 m de diâmetro será ensaiado em um túnel de vento de seção fechada e na segunda, um túnel de vento de seção aberta será utilizada para realizar os testes de uma turbina eólica de 1 m de diâmetro. O objetivo é comparar as duas metodologias de ensaios utilizando diferentes configurações de túneis de vento e de medições de torque, direto e indireto, respectivamente.

2. METODOLOGIA

Como já explicado anteriormente, a metodologia deste trabalho se divide em duas partes, ensaios em túnel de vento aberto e fechado. Em ambos os casos, o principal objetivo dos testes é obter a curva de eficiência da turbina, representada pelo gráfico adimensional $C_p \times TSR$, sendo

$$C_p = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{\omega T}{\frac{1}{2} \rho A U_{\infty}^3}, \quad (2)$$

em que P_{out} é a potência convertida pela turbina, P_{in} é a potência disponível no escoamento, ω é a velocidade de rotação da turbina, T é o torque, ρ a massa específica do ar, A a área do rotor e U_{∞} a velocidade do escoamento livre, e

$$TSR = \frac{\omega R}{U_{\infty}}, \quad (3)$$

onde R é o raio do rotor.

Ambos ensaios foram realizados mantendo a velocidade do escoamento constante e variando a velocidade de rotação da turbina por meio do controlador PID e a técnica de modulação de carga PWM. Durante os ensaios experimentais foram medidas as magnitudes de T , ω e U_{∞} para o levantamento das curvas de desempenho $C_p \times TSR$, como visto nas Eq. (2) e (3). A principal diferença entre as metodologias utilizadas reside em nas medidas de torque. Nos ensaios em túnel de vento fechado o torque foi medido diretamente utilizando uma célula de carga. Por outro lado, nos ensaios em túnel aberto, o gerador da turbina foi calibrado tomando medidas de torque para diferentes rotações da turbina, sendo este processo anterior aos testes da turbina no túnel de vento. No que segue serão apresentadas de forma detalhada ambas as metodologias.

2.1 Túnel de vento fechado

A seguir são apresentados os ensaios experimentais realizados no túnel de vento fechado para o levantamento das curvas de $C_p \times TSR$ do modelo reduzido de turbina hidrocinética de 0,5 m de diâmetro.

Os ensaios experimentais foram realizados no túnel de vento fechado do Laboratório de Energia e Ambiente da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília (UnB). A seção de testes tem dimensões de 1,2 m de altura, 1,2 m de largura e 2 m de comprimento. O ventilador está situado na saída do túnel e é acionado por um motor elétrico modelo WEG W22 de 10 HP, sugando o ar desde a entrada do túnel até a saída, e a sua velocidade é controlada por meio do inversor CFW-09 Vectrue Inverter 10A 3CV. O fator de redução da área do bocal para a seção de testes é de 3,4:1,2. A velocidade do fluxo ar no interior do túnel pode variar entre 0 e 20 m/s. A intensidade de turbulência está em volta de 1% e camada limite no interior da seção de testes, onde a turbina é posicionada, é de 8×10^{-3} m. Na Fig. 1 pode-se ver o túnel de vento utilizado neste trabalho.

O túnel de vento foi caracterizado medindo o perfil de velocidades em uma seção localizada entre a entrada da seção de teste e o modelo reduzido e estimando a intensidade de turbulência no ponto médio da dita seção, para conhecer a uniformidade do fluxo que será escoado pela turbina. Para medir o perfil de velocidades foi usado um tubo de Pitot conectado a um manômetro de coluna inclinada de resolução 0,05 mm e fundo de escala 12,5 mmH₂O. O perfil de velocidades foi caracterizado para duas velocidades médias do escoamento, 8,8 m/s e 12,9 m/s. Na Figura 3 apresentam-se os perfis de velocidades na linha central da seção de testes para as ditas velocidades.

A estimativa da intensidade de turbulência foi realizada a partir das medidas feitas com um anemômetro de fio quente de ponta esférica, sistema miniCTA da DANTEC DYNAMICS, conectado a um osciloscópio. Foram realizadas medidas

da intensidade de turbulência para várias velocidades de escoamento no ponto médio da seção do testes no interior do túnel de vento. Na Figura 4 são apresentadas as medidas de intensidade de turbulência realizadas.

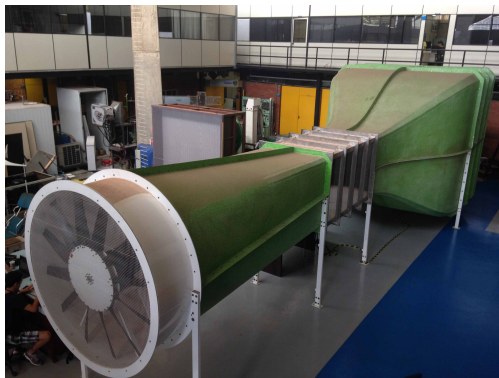


Figura 1: Túnel de vento do Laboratório de Energia e Ambiente da Faculdade de Tecnologia da UnB.



Figura 2: Modelo reduzido no interior do túnel de vento.

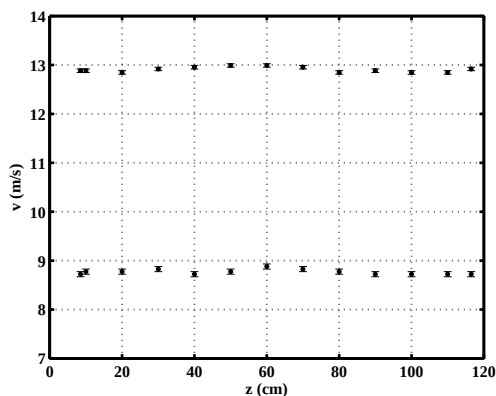


Figura 3: Perfil de velocidade na linha central para as velocidades média de 8,8 m/s e 12,9 m/s.

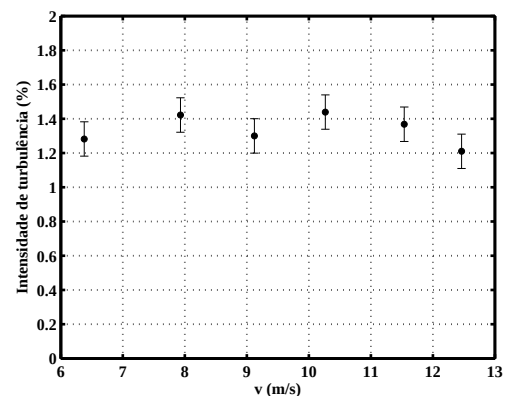


Figura 4: Intensidade de turbulência para diferentes velocidades do escoamento.

A turbina colocada no interior do túnel de vento é um modelo reduzido de turbina hidrocinética de eixo horizontal e três pás. Os perfis usados nas pás são do tipo NACA 65(3)618. As pás foram usinadas a partir de uma placa de resina de poliuretano e epoxi em uma máquina CNC de três eixos. Na Figura 2 pode ser observado o modelo reduzido no interior do túnel de vento. O modelo é localizado no interior da seção de testes a 1,2m da entrada da mesma, e seu eixo de rotação está situado aproximadamente no meio da seção de teste, a 583 mm da superfície inferior do túnel.

O rotor da turbina é acoplado diretamente ao eixo de um motor elétrico DC de imã permanente (Electro-Craft 110W). O motor é usado como freio eletromagnético e nos permite controlar a velocidade de rotação da turbina mediante uma modulação de carga PWM e um sistema de controle PID, como foi explicado anteriormente. O motor é colocado em balanço para poder medir diretamente o torque a partir de uma célula de carga, e é apoiado sobre dois rolamentos esféricos posicionados no topo da estrutura que suporta o sistema da turbina.

O torque do modelo é medido diretamente por meio de uma célula de carga tomada de uma balança digital de precisão 0.1 g, e foi calibrada usando um sistemas de pesos conhecidos. A célula de carga registra a força vertical que um braço conectado ao gerador exerce sobre ela. A transmissão da força entre o freio e a balança é feita a través do braço metálico, como pode ser observado na Fig. 5.

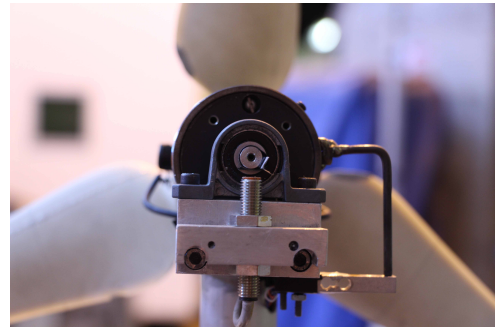
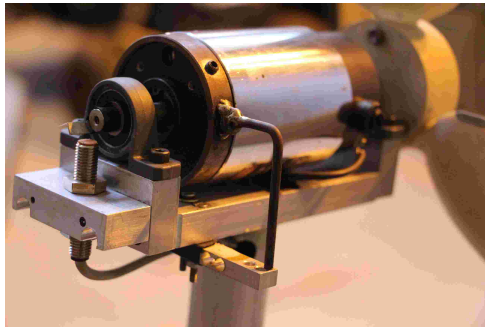


Figura 5: Detalhe da célula de carga e o braço metálico e do sensor de proximidade indutivo

O torque é calculado como o produto da força medida na célula de carga vezes a distância do ponto onde é aplicado a força até o eixo do sistema, 54,3 mm. Os dados de força medidos pela célula de carga durante os ensaios no túnel de vento foram amplificados usando o amplificador HX711 e coletados através de um computador conectado ao microcontrolador ARDUINO. O erro obtido na medida de torque depende da faixa de velocidade de operação da turbina. Existe uma faixa de velocidade, correspondente ao estol e pós-estol aerodinâmico nas pás, em que a performance da turbina fica instável e apresenta vibrações estruturais. Nestes casos, o erro obtido na medida de torque está em volta de 7%, para as faixas de rotação de normal desempenho o erro é aproximadamente 2%.

O intuito do controle da velocidade da turbina é conseguir uma performance estável em várias faixas de rotação para o levantamento da curva de $C_p \times TSR$. Durante os ensaios a velocidade do escoamento foi mantida constante e igual a 12 m/s e a velocidade de rotação da turbina foi variada tomando os valores de torque para cada ponto de funcionamento onde a velocidade foi estabilizada.

Neste caso, a velocidade de rotação da turbina foi medida a partir de um sensor indutivo de proximidade BHS LM8, fixado na parte traseira da estrutura que suporta a turbina. O sensor de proximidade detecta peças metálicas sem que o contato físico exista, sendo assim, uma pequena chapa metálica foi fixada ao eixo na sua parte traseira. Os pulsos por revolução detectados pelo sensor são contados usando o microcontrolador ARDUINO, obtendo assim o valor da velocidade de rotação em revoluções por minuto (rpm). O erro na medida de velocidade é aproximadamente 1%. O sensor de rotação pode ser visto na Fig. 5.

A variação do giro da turbina foi regulada por meio de um sistema de modulação que realiza a variação da carga aplicada ao gerador. Esse sistema é formado por um circuito com uma resistência fixa e um transistor para controlar a abertura e fechamento do circuito, controlando assim o momento em que a resistência é conectada ao gerador. Por meio do ajuste do tempo de modulação do sistema, é possível obter um valor de resistência resultante médio equivalente a uma resistência fixa, sobre a qual se tem controle. Para isto, foi usada a técnica de modulação PWM (*Pulse Width Modulation*), que controla o tempo que a onda permanece em sua amplitude máxima pela porcentagem do tempo de trabalho (*Duty Cycle*). O PWM é criado pelo microcontrolador ARDUINO.

O tempo de modulação do PWM é regulado por um sistema de controle automático PID da velocidade. O sistema calcula a diferença entre a velocidade de rotação real da turbina e uma velocidade predeterminada (setpoint), esta diferença é chamada de erro. A partir do erro da velocidade o valor do controlador PID é calculado e usado para regular o tempo de modulação do PWM, aumentando ou diminuindo a carga para atingir a velocidade requerida. Segundo o valor do PID, o PWM tomará um valor ou outro regulando a carga conectada ao gerador e assim a velocidade de rotação da turbina. Fisicamente, o transistor é o componente encarregado de abrir e fechar o circuito no tempo de modulação estabelecido. Na Figura 6 apresentam-se o diagrama de blocos que representa o controle de velocidade.

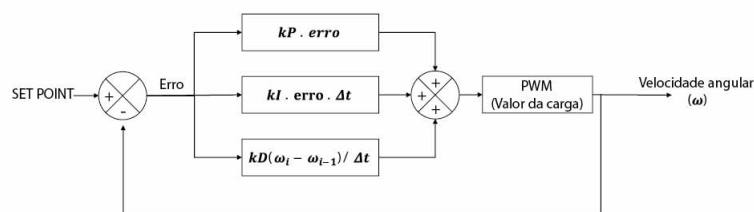


Figura 6: Diagrama de blocos do sistema de controle da velocidade PID.

Por último ressaltar, que nos ensaios de túnel de vento fechado é importante avaliar a necessidade da aplicação de um fator de correção de bloqueio devido aos efeitos das paredes do túnel de vento sobre o fluido. Segundo Ryi *et al.* (2015); Chen and Liou (2011) se a razão do bloqueio, definida como o cociente entre a área do disco que representa o rotor e a área da seção de testes do túnel, é maior que 10%, os efeitos de parede não devem ser ignorados. Sendo assim, será necessário aplicar correção de bloqueio nos dados obtidos dos ensaios no túnel de vento. Neste caso, $BR = 13,6\%$ e portanto correções de bloqueio foram aplicadas. O método utilizado foi o apresentado por Bahaj *et al.* (2007) para corrigir o efeito de parede na expansão da esteira.

2.2 Túnel de vento aberto

Um túnel de vento aberto é caracterizado quando o escoamento de ar é feito de maneira livre, sem nenhuma parede realizando bloqueio lateral ao longo do caminho. Esse tipo de túnel foi utilizado nesse trabalho com a intenção de eliminar efeitos de parede presentes em túneis de vento tradicionais e com isso deixar o experimento mais próximo do funcionamento em campo desse tipo de turbina. O túnel utilizado é formado por quatro ventiladores, de 3 hp, ligados em paralelo e com seção transversal de 4 m^2 . Para melhores resultados experimentais a turbulência do túnel de vento deve ser minimizada e o perfil de velocidade na seção de testes deve ser o mais constante possível. Sendo assim, algumas estruturas (telas) são utilizadas para diminuir os efeitos da turbulência no escoamento do túnel. A Figura 7 apresenta todos os elementos que compõem o túnel.

Como se trata de um túnel aberto, a seção de testes não é bem definida, portanto a medição dos perfis de velocidade se faz necessária para o conhecer do escoamento a jusante do túnel e assim se determinar um local apropriado para o ensaio da turbina eólica. A metodologia de medição foi baseada no sistema de pitometria, em que o tubo de Pitot é posicionado em um conjunto de pontos referenciados por um sistema de coordenadas cartesianas de três dimensões. O tubo de Pitot foi ligado a um manômetro diferencial com resolução de $0,05\text{ mmH}_2\text{O}$ e fundo de escala de $12,5\text{ mmH}_2\text{O}$. A Figura 8 é a representação espacial dos perfis de velocidade, sendo que a parede com os ventiladores está localizada na posição $y=0$.

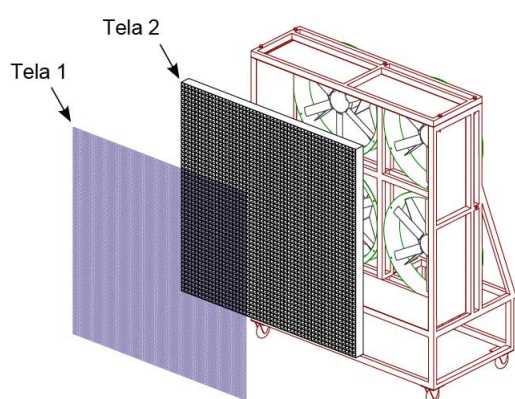


Figura 7: Elementos do túnel de vento aberto: Suporte, ventiladores e telas.

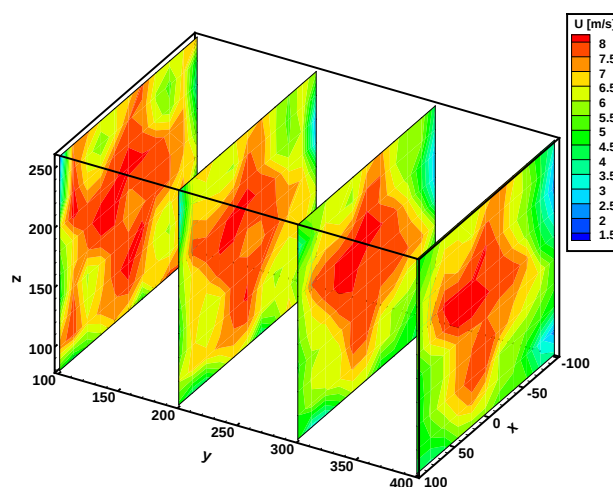


Figura 8: Distribuição dos perfis de velocidade no espaço a jusante do túnel de vento.

Para os ensaios em túnel de vento aberto utilizou-se uma turbina eólica de pequeno porte da marca InstaBreeze modelo i-500 mostrada na Fig. 9 juntamente com a montagem experimental. A Tabela 1 apresenta as especificações da turbina fornecidas pelo fabricante.

Durante este ensaio, foram realizadas medidas de velocidade de rotação da turbina, corrente e tensão. A medida do torque, necessária para o cálculo do C_p foi obtida de maneira indireta utilizando curvas de calibração do gerador da turbina. Portanto, neste caso, em primeiro lugar, foi realizada a calibração do gerador e depois os ensaios da turbina no túnel de vento aberto.

Tabela 1: Tabela de especificações da turbina utilizada no ensaio em túnel aberto.

Potência nominal	400 W
Potência máxima	600 W
Mínima velocidade do escoamento	3 m/s
Máxima velocidade do escoamento	45 m/s
Número de pás	3
Diâmetro	102 cm
Gerador	Imãs permanentes de corrente alternada



Figura 9: **Montagem experimental da turbina no túnel de vento aberto.**

A calibração do gerador foi realizada da mesma forma que um ensaio de eficiência, tendo como intuito simular seu comportamento para várias condições de operação. O eixo do gerador foi excitado com uma potência mecânica conhecida e depois a potência elétrica produzida foi medida. Neste trabalho, utilizou-se um motor para acionamento mecânico do gerador. O motor elétrico foi montado entre rolamentos de forma que possa girar livremente ao redor do próprio eixo (montagem em balanço). Um braço mecânico foi fixado na carcaça do motor, de forma que a força necessária para manter o motor parado (sem girar) é aplicada por este braço. Dessa forma, foi possível determinar o torque mecânico (força aplicada multiplicada pelo comprimento do braço), a menos do torque necessário para vencer os atritos nos rolamentos. Da mesma forma que na metodologia de túnel fechado, o instrumento utilizado para medir o torque foi uma célula de carga de resolução 0,1 g.

Durante o ensaio de calibração, uma carga resistiva foi conectada ao motor e um sistema de modulação foi utilizado para variar dita carga. O intuito é fazer o motor funcionar como freio eletromagnético, variando a velocidade de rotação, e portanto, simulando diferentes condições de operação. O sistema para controle da carga foi o mesmo que o utilizado durante os ensaios em túnel fechado, um circuito elétrico com uma resistência fixa e um transistor que permita a abertura e feche do circuito. A modulação do transistor foi feita mediante a técnica de modulação PWM. Neste caso, o circuito elétrico foi conectado a uma ponte retificadora, para transformar a corrente alternada em contínua. Finalmente, foram obtidos os valores de eficiência do gerador para cada porcentagem de carga aplicada e velocidade de rotação. Os valores de eficiência foram obtidos a partir dos valores de potência mecânica e elétrica calculados a partir dos dados de torque, velocidade de rotação, tensão e corrente medidos.

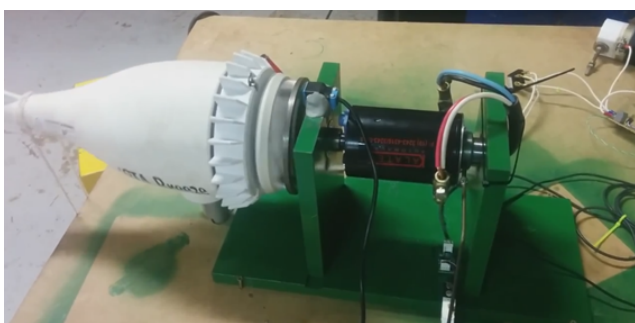


Figura 10: **Bancada de calibração do gerador elétrico.**

Após a calibração do gerador foram realizados os ensaios em túnel de vento para a velocidade de escoamento de 5 m/s. Durante os testes foram medidas velocidade de rotação, tensão e corrente. Com estes dados, a potência elétrica foi calculada e o rendimento do gerador foi identificado utilizando a velocidade de rotação, valor da curva e curvas de calibração do gerador. Após conhecida a eficiência do gerador a energia mecânica foi calculada e portanto, o valor do coeficiente de potência para a velocidade de rotação definida em cada caso.

Da mesma forma que nos ensaios de túnel de vento fechado, a velocidade de rotação da turbina foi variada e controlada por um controlador PID permitindo a estabilidade para várias faixas de rotação da turbina.

2.3 Cálculo numérico - metodologia BEM

Nesta seção serão descritas as simulações numéricas realizadas utilizando o software livre Qblade baseado na metodologia BEM, para ambas as turbinas.

As simulações que empregam a metodologia BEM usam como parâmetros de entrada as informações geométricas das pás, tais como cordas, ângulos de torção e raios, e o perfil aerodinâmico. Neste tipo de simulações, o primeiro passo, é gerar as informações sobre o perfil aerodinâmico, as curvas polares, devido à necessidade dos códigos BEM de conhecer os coeficientes de sustentação e arrasto, C_L e C_D . O software Qblade faz interface com o código XFOIL para ter acesso às informações do aerofólio. No XFOIL foram geradas as curvas polares, para um intervalo de ângulos de ataque de -5 a 30° . Posteriormente, essas curvas foram extrapoladas para um intervalo de -180 a 180° diretamente pelo Qblade.

Um fator fundamental na obtenção de previsões válidas de desempenho em turbinas hidrodinâmicas pelo método BEM é o uso de curvas polares correspondentes a números de Reynolds locais no ponto de projeto da turbina (Monteiro *et al.*, 2013). O número de Reynolds local calculado para o modelo reduzido de turbina hidrocínética com 0,5 m de diâmetro, utilizando ar como fluido escoando e condições de operação de 12 m/s e 2000 rpm foi 8×10^4 . No caso da turbina eólica de 1m de diâmetro operando a 5 m/s e 1000 rpm o número de Reynolds local calculado foi 6×10^4 .

Nas simulações o fator Ncrit que proporciona um critério de transição segundo o estado do túnel de vento, foi escolhido como Ncrit=5 para o modelo reduzido de turbina em túnel fechado devido às interferências do túnel de vento sobre o modelo e Ncrit=9 para a turbina eólica operando no túnel de vento aberto. Para o caso do modelo reduzido de turbina hidrocínética, foi forçada a transição do escoamento do regime laminar para o turbulento, tal e como foi realizado nos ensaios experimentais no túnel de vento. Dita transição foi localizada em 20 % da corda no lado de sucção das pás, causando melhorias consideráveis no desempenho. Foi adotado este procedimento devido às características de performance do aerofólio em baixo número de Reynolds. Por a turbina ensaiada em túnel fechado ser um modelo em escala reduzida de uma turbina hidrocínética, o perfil aerodinâmico utilizado foi escolhido para seu protótipo e portanto, próprio para operar com altos número de Reynolds (Campagnolo, 2013, Bottasso *et al.*, 2014). No caso da turbina eólica de pequeno porte não foi necessário forçar a transição na camada limite devido a que esta é uma turbina comercial e o perfil aerodinâmico foi escolhido para operar com números de Reynolds similares aos ensaiados.

A partir do software Qblade foram levantadas as curvas de desempenho C_p vs λ para as duas turbinas. A velocidade de escoamento foi mantida constante durante as simulações, sendo 5 m/s para o caso da turbina eólica de 1m de diâmetro e 12 m/s para o modelo de turbina hidrocínética de 0,5 m de diâmetro. Em ambas as simulações, foram consideradas as correções de Prandtl de ponta de pá.

Os resultados obtidos nas simulações BEM serão apresentados na seção **RESULTADOS** e comparados com as curvas experimentais para validação das metodologias.

3. RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos ao longo deste trabalho. Para a metodologia em túnel de vento aberto o primeiro resultado obtido foram as curvas de calibração do gerador da turbina que podem ser observadas na Fig. 11. Cada curva do gráfico representa a eficiência (η) do gerador para determinada carga em função da velocidade angular (ω) em RPM. Os pontos do gráfico foram obtidos através dos ensaios experimentais. Já as curvas foram obtidas utilizando um ajuste no conjunto de dados para cada carga. A função escolhida para o ajuste foi equação logarítmica do tipo

$$\eta = a \ln(\omega) + b. \quad (4)$$

Observa-se como a aproximação utilizada é satisfatória para os fins do presente trabalho, desde que as curvas ajustadas para cada carga resistiva mantiveram-se fora das barras de erros das curvas vizinhas. A partir destas curvas de calibração, mostradas na Fig. 11, é possível obter o valor do rendimento para qualquer carga aplicada na turbina ensaiada.

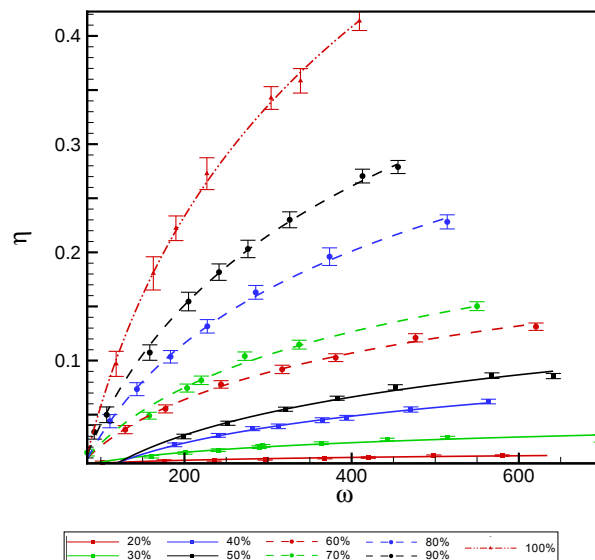


Figura 11: Curvas de eficiência do gerador utilizando uma porcentagem diferente da carga

No caso do túnel de vento fechado, os primeiros ensaios não ocorreram como esperado segundo as simulações tendo que realizar algumas ações para modificar os resultados obtidos nos testes no túnel, tais como a adição de "*transition strips*" e as correções de bloqueio. Os "*transition strips*", foram colocados no lado de sucção das pás em 20 % da corda para forçar a transição do escoamento do regime laminar para o turbulento, tal e como foi feito na simulação BEM. Na Figura 12 apresentam-se as curvas de desempenho para o modelo reduzido de turbina hidrocínética em túnel fechado para a velocidade de escoamento constante de 12 m/s antes e depois da adição dos "*transition strips*". Observa-se como após induzir a transição do regime do escoamento na camada limite a melhoria no desempenho da turbina é significativa, aumentando o valor do C_p . Percebe-se também como a nova curva apresenta uma maior abertura atingindo maiores valores de TSR . Por outro lado, pode-se ver como a parte da curva correspondente ao pós-estol não apresenta mudanças significativas para ambas configurações devido à redução da sustentação nas pás pelas condições do escoamento.

Mesmo assim, a curva de eficiência obtida até momento no túnel fechado não apresentava um comportamento próximo à simulação BEM. Portanto, foi aplicada a correção de bloqueio calculada pelo método de Bahaj *et al.* (2007) para eliminar os efeitos do confinamento criados pelas paredes do túnel sobre os dados obtidos durante os ensaios. Na Figura 13 são apresentadas as curvas de $C_p \times TRS$ antes e depois de aplicar as correções de bloqueio.

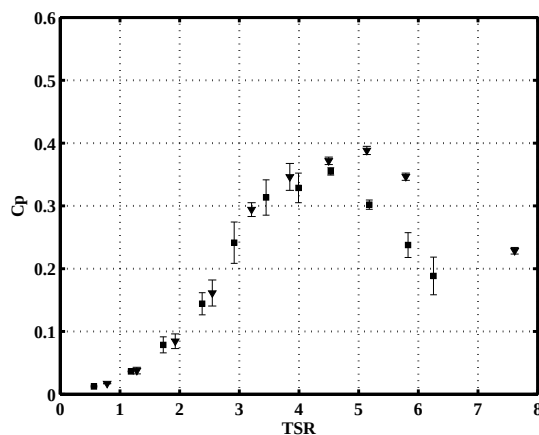


Figura 12: Curva adimensional $C_p \times TRS$ obtida no túnel de vento fechado com e sem strips.

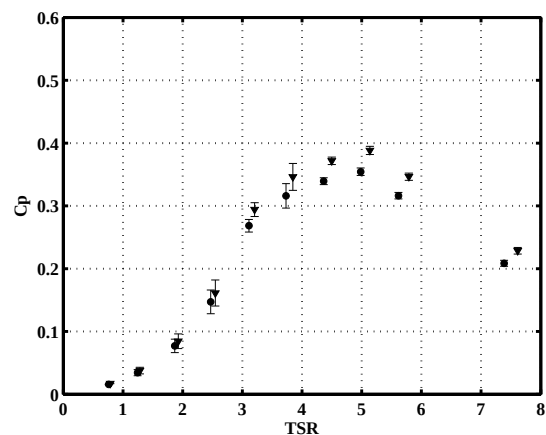


Figura 13: Curva adimensional $C_p \times TRS$ obtida no túnel de vento fechado com correção de bloqueio.

Na Figura 14 são apresentadas as curvas de eficiência $C_p \times TRS$, numérica e experimental, para o modelo reduzido de turbina hidrocínética ensaiada no túnel de vento de seção fechada. Os resultados apresentados correspondem ao ensaio com velocidade de escoamento constante e igual a 12 m/s. Percebe-se como ambas as curvas são similares tendo como coeficiente de potência máximo $C_p = 0,33$. Na Figura 15 são observados os resultados obtidos para a turbina eólica, numérico e experimental, para a velocidade do escoamento de 5 m/s. Pode ser visto como ambas curvas apresentam comportamentos similares, tanto nas regiões pré como pós-estol, e o valor máximo de coeficiente de potência ocorre aproximadamente para o valor de $TSR = 5,6$.

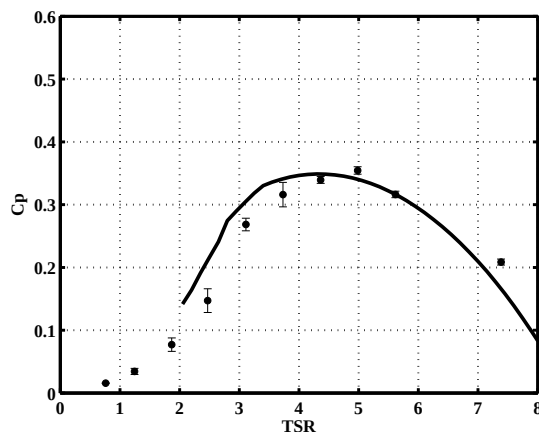


Figura 14: Curva adimensional $C_p \times TSR$ obtida no túnel de vento fechado.

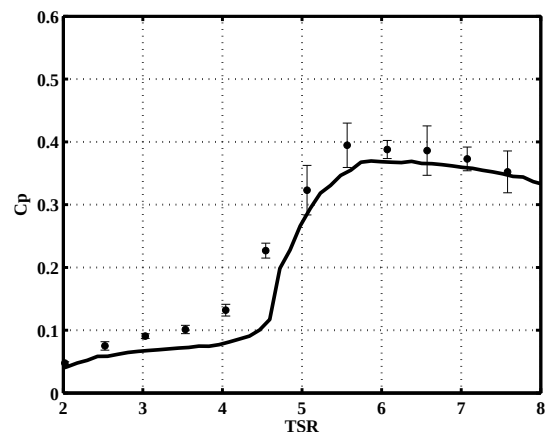


Figura 15: Curva adimensional $C_p \times TSR$ obtida no túnel de vento aberto.

Os erros obtidos na medida de coeficiente de potência estão diretamente relacionados às medidas de torque realizadas pela célula de carga. Em ambos casos estes erros variam segundo a faixa de rotação, observa-se como os maiores erros se produzem no intervalo corresponde ao começo de perda de sustentação nas pás, o estol. Durante os ensaios ambos sistemas apresentaram vibrações significativas para as faixas de velocidades correspondentes aos valores de TSR do dito intervalo, e é por isso o aumento considerável do erro nas medidas de torque para ditos pontos de operação.

Como foi comentado anteriormente, as Figuras 14 e 15 apresentam os resultados para os ensaios realizados em túnel de vento fechado e aberto, respectivamente, juntamente com curvas numéricas obtidas pela metodologia BEM. Em ambos os casos, as metodologias aplicadas conseguiram reproduzir os resultados obtidos no cálculo numérico. Sendo assim, é possível afirmar, após as comparações das curvas numéricas e experimentais, que os dois métodos de medição de torque utilizados proporcionam resultados confiáveis.

4. CONCLUSÕES

A finalidade do presente trabalho foi realizar ensaios experimentais em duas configurações de túnel de vento utilizando metodologias de medição de torque diferentes. É possível concluir que ambas metodologias apresentadas neste trabalho são robustas e confiáveis devido a reprodutibilidade dos resultados numéricos. Sendo assim, a escolha entre um túnel de vento aberto ou fechado fica restrita ao tamanho da turbina. Ressaltando que um aspecto importante nos estudos em túnel fechado é fator de bloqueio, sendo que para $BR > 10\%$ é necessário aplicar correções de bloqueio.

Em relação a metodologia de medição do torque, também é possível afirmar a confiabilidade de resultados em ambos os casos. Porém, é importante destacar o esforço e o tempo aplicado durante o trabalho de medição de torque indireto. Esta metodologia exige uma calibração do gerador de difícil execução anterior aos testes em túnel. Por outro lado, a medição direta fornece imediatamente o valor do torque nos ensaios da turbina.

Tendo como fim o levantamento das curvas de $C_p \times TSR$, é preciso obter dados de velocidade de rotação e torque para vários pontos de funcionamento. Portanto, um fator fundamental, em ambos ensaios, foi o controle da velocidade de rotação das turbinas para conseguir uma performance estável em várias faixas de rotação. Cabe ressaltar, como mesmo controlando a velocidade de rotação das turbinas, ambas apresentaram um comportamento mais complicado a partir do começo do estol aerodinâmico apresentando vibrações significativas que refletiram nos erros apresentados para os coeficientes de potência.

Tanto nas simulações computacionais como nos ensaios em túnel de vento, a adição de "transition strips" foi chave para atingir os resultados esperados. Esta medida teve que ser tomada neste caso devido ao perfil aerodinâmico utilizado e ao baixo número de Reynolds, não sendo necessário para o caso da turbina eólica mesmo operando com número de Reynolds semelhante. Isto porque o aerofólio do modelo reduzido foi escolhido no projeto de uma máquina hidrodinâmica de dimensões e números de Reynolds muito maiores.

5. REFERÊNCIAS

- Bahaj, A., Molland, A., Chaplin, J. and Batten, W., 2007. "Power and thrust measurements of marine current turbines under various hydrodynamic flow conditions in a cavitation tunnel and a towing tank". *Renewable Energy*, Vol. 32, No. 3, pp. 407 – 426. ISSN 0960-1481.
- Bottasso, C.L., Campagnolo, F. and Petrovic, V., 2014. "Wind tunnel testing of scaled wind turbine models: Beyond aerodynamics". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 127, pp. 11 – 28. ISSN 0167-6105.
- Campagnolo, F., 2013. *WIND TUNNEL TESTING OF SCALED WIND TURBINE MODELS: AERODYNAMICS AND BEYOND*. Ph.D. thesis, POLITECNICO DI MILANO.

- Chen, T. and Liou, L., 2011. "Blockage corrections in wind tunnel tests of small horizontal-axis wind turbines". *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 35, No. 3, pp. 565 – 569. ISSN 0894-1777.
- Els, R.H.V. and Jr, A.C.P.B., 2015. "The brazilian experience with hydrokinetic turbines". *Energy Procedia*, Vol. 75, pp. 259 – 264. ISSN 1876-6102. Clean, Efficient and Affordable Energy for a Sustainable Future: The 7th International Conference on Applied Energy (ICAE2015).
- Herbert, G.J., Iniyar, S., Sreevalsan, E. and Rajapandian, S., 2007. "A review of wind energy technologies". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 11, No. 6, pp. 1117 – 1145. ISSN 1364-0321.
- Khan, M., Bhuyan, G., Iqbal, M. and Quaicoe, J., 2009. "Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review". *Applied Energy*, Vol. 86, No. 10, pp. 1823 – 1835. ISSN 0306-2619.
- Kinsey, T., Dumas, G., Lalande, G., Ruel, J., Méhut, A., Viarouge, P., Lemay, J. and Jean, Y., 2011. "Prototype testing of a hydrokinetic turbine based on oscillating hydrofoils". *Renewable Energy*, Vol. 36, No. 6, pp. 1710 – 1718. ISSN 0960-1481.
- Monteiro, J.P., Silvestre, M.R., Piggott, H. and André, J.C., 2013. "Wind tunnel testing of a horizontal axis wind turbine rotor and comparison with simulations from two blade element momentum codes". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 123, Part A, pp. 99 – 106. ISSN 0167-6105.
- Ryi, J., Rhee, W., Hwang, U.C. and Choi, J.S., 2015. "Blockage effect correction for a scaled wind turbine rotor by using wind tunnel test data". *Renewable Energy*, Vol. 79, pp. 227 – 235. ISSN 0960-1481.

WIND TUNNEL TEST METHODOLOGY FOR HORIZONTAL AXIS TURBINES

Marianela M. Macias, nelamacmac@gmail.com¹

Rafael C.F. Mendes, rafael.cfmendes@gmail.com¹

Antonio C.P. Brasil Jr., brasiljr@unb.br¹

Taygoara F. Oliveira, taygoara@unb.br¹

¹Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Laboratório de Energia e Ambiente. 70910-900 Brasília. DF. BRASIL

Abstract : This work presents two test methodologies for scale models horizontal axis turbines. The main goal is to compare the experiments, carried out in open and closed wind tunnel, measuring the turbines performance curves, represented by power coefficient (C_p) as a function of tip speed ratio (TSR). The open wind tunnel has a 2x2 m test section and the air velocity can vary between 0 and 12 m/s. The close wind tunnel has a 1.2x1.2 m test section and the air can vary between 0 and 15 m/s. The open wind tunnel tests were conduct for a 3 blades wind turbine with 1 meter diameter and 500 W. And the closed test were conduct for a 3 blades model of a hydrokinetic turbine with 0.5 meter diameter. For the C_p computation, torque and rotation velocity were measured. It was used two distinct methodologies to measure the torque: direct, using torque sensor, and indirect measuring, given by generator calibration curves. The rotation velocity rotor control, realized by a PID, was a key to tests success. The $C_p \times$ TSR curves are present for both configured. The experimental results reproduce similar curves compared to BEM (Blade Element Momentum) results.

Keywords: Horizontal axis turbine, Wind tunnel, Power coefficient, BEM