

Simulação do desempenho aerodinâmico de ventiladores axiais: Modelagem matemática e resultados preliminares – EVR2021-0037

Gabriel L. Podgajetsky ^{1,*}, Marcelo L. C. de Oliveira ², Adriano F. Ronzoni ³, Christian J. L. Hermes ¹

¹ POLO Labs, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil

² Departamento de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil

³ Nidec Global Appliance, Joinville, SC, Brasil

* Autor para correspondência, gabriel.longen@polo.ufsc.br

Resumo

Neste trabalho é apresentado um modelo matemático baseado na teoria de elementos de pá que faz uso das características do aerofólio para simular o desempenho aerodinâmico de ventiladores axiais. Os resultados para uma condição de escoamento livre são apresentados e discutidos. O modelo foi validado comparando as suas curvas características com as obtidas experimentalmente através de um túnel de vento aberto. Verificou-se que o modelo é capaz de prever o torque no eixo e a vazão volumétrica dentro de uma margem de 20% na faixa compreendida entre o ponto de escoamento livre e o início da região de estol.

Palavras-chave: ventilador axial, simulação, curvas características, teoria de elementos de pá, aerodinâmica

Introdução

Ventiladores axiais de baixa pressão são largamente utilizados em unidades condensadoras e evaporadoras para refrigeração doméstica e comercial. No caso das condensadoras, a potência consumida pelo ventilador afeta diretamente o consumo de energia do produto. Nas evaporadoras, por sua vez, o consumo de potência por parte do ventilador tem um efeito duplo, já que afeta tanto o consumo de energia como a carga térmica do refrigerador. Logo, o aperfeiçoamento do sistema de refrigeração passa pelo desenvolvimento de ventiladores axiais mais eficientes, capazes de fornecer a vazão requerida com a menor potência de eixo possível.

Em geral, o desenvolvimento de ventiladores axiais é realizado experimentalmente, a partir de tentativa-e-erro, através de ensaios normalizados em túnel de vento. Tais ensaios fornecem as curvas características de desempenho do ventilador, que expressam a pressão estática e a eficiência total em função da vazão volumétrica para diferentes velocidades de eixo (rotações) em um diagrama *log-log* (ASHRAE 41.2, 1987). Recentemente, o aprimoramento das técnicas da dinâmica dos fluidos computacional (do inglês, CFD – *computational fluid dynamics*) tem permitido um melhor entendimento dos fenômenos associados ao escoamento de ar sobre as pás do ventilador, tais como formação e descolamento da camada limite, bem como vazamentos e fluxo reverso nas extremidades da pá. Entretanto, tais modelos apresentam grande custo computacional e, conseqüentemente, longo tempo de computação, o que inviabiliza seu uso não só para analisar a sensibilidade das variáveis de interesse em relação a um parâmetro específico de projeto (e.g., ângulo de *pitch*, perfil do aerofólio, raio da pá) mas principalmente para um exercício de otimização, que requer a simulação de milhares de combinações de condições geométricas e operacionais (Beiler e Carolus, 1999).

Em contraponto, modelos baseados nos princípios fundamentais da aerodinâmica podem ser empregados para se obter um entendimento matemático das relações de causa

e consequência entre as variáveis de interesse e os parâmetros de projeto, além de consistirem numa maneira rápida e eficaz de se obter as curvas características de desempenho. Entretanto, tais modelos são escassos na literatura aberta, mais voltada à simulação de turbinas eólicas (Schubel e Crossley, 2012) e propulsores (Wallis, 1961).

Dessa maneira, no presente trabalho é proposta uma estratégia para a simulação de ventiladores axiais embasada no tripé formado pela teoria de elementos de pá (Houghton e Carpenter, 2003), nas características aerodinâmicas do aerofólio (Glauert, 1983) e na solução do escoamento do ar na vizinhança do rotor (Castegnaro, 2017). Resultados preliminares são apresentados e comparados com evidências experimentais obtidas em um túnel de vento.

Modelo de Simulação

Essencialmente, o modelo apresentado neste trabalho consiste em uma adaptação da metodologia para análise de hélices aeronáuticas proposta por Houghton e Carpenter (2003). Trata-se de um modelo não linear baseado no balanço de forças em cada elemento da pá, discretizada ao longo do raio de acordo com a teoria de elementos de pá (do inglês, BET – *blade element theory*). Assim, é possível prever os efeitos dos parâmetros geométricos da pá bem como da sua velocidade angular sobre o fluxo de ar deslocado, permitindo a obtenção das curvas características do ventilador.

Os efeitos do ventilador sobre o escoamento axial podem ser descritos através de um balanço de forças, segundo o qual a força imposta pelo ventilador ao escoamento axial, F , por unidade de área de seção transversal, S , é composta por duas parcelas: a diferença de pressão estática entre a entrada e a saída do ventilador, Δp , e a pressão dinâmica na saída do ventilador, $\rho V_a^2 / 2$. Assim, velocidade axial V_a perpendicular ao plano de rotação do ventilador é dada por:

$$V_a = \sqrt{\frac{2}{\rho} \left(\frac{F}{S} - \Delta p \right)} \quad (1)$$

Para o escoamento tangencial, o torque no elemento, δT , é obtido através do seguinte balanço de quantidade de movimento:

$$\frac{\delta T}{r} = \rho \delta Q 2b \Omega r \quad (2)$$

onde r é o raio do elemento de pá, δQ é a vazão volumétrica, Ω é a velocidade angular da pá e $2b\Omega$ indica a variação da velocidade angular do escoamento, sendo b o coeficiente adimensional de indutância da pá (Houghton e Carpenter, 2003). Tomando como referencial a pá do ventilador, como ilustra a Fig. 1, verifica-se que a velocidade resultante, V_r , que tem ângulo ϕ em relação ao plano de rotação, pode ser expressa em função das componentes axial e tangencial. A Fig. 1 permite observar ainda que o escoamento incide sobre o perfil da pá com um ângulo de ataque $\alpha = \theta - \phi$, enquanto o elemento de pá possui um ângulo de inclinação θ (também chamado de ângulo de *pitch*) e uma corda c medida de uma extremidade a outra do perfil. O ângulo ϕ é dado por:

$$\phi = \arctg \left[\frac{V_a}{\Omega r(1-b)} \right] \quad (3)$$

Assim, a velocidade relativa é calculada por:

$$V_r = \frac{V_a}{\sin \phi} \quad (4)$$

As forças de sustentação e arrasto são então dadas por:

$$\frac{\delta L}{c N_p \delta r} = \frac{1}{2} \rho V_r^2 C_l \quad (5)$$

$$\frac{\delta D}{c N_p \delta r} = \frac{1}{2} \rho V_r^2 C_d \quad (6)$$

onde C_l é o coeficiente de sustentação, C_d é o coeficiente de arrasto e N_p é o número de pás. Realizando a composição de forças nas direções axial e tangencial, obtém-se:

$$\frac{\delta F}{c N_p \delta r} = \frac{1}{2} \rho V_r^2 (C_l \cos \phi - C_d \sin \phi) \quad (7)$$

$$\frac{\delta T/r}{c N_p \delta r} = \frac{1}{2} \rho V_r^2 (C_l \sin \phi + C_d \cos \phi) \quad (8)$$

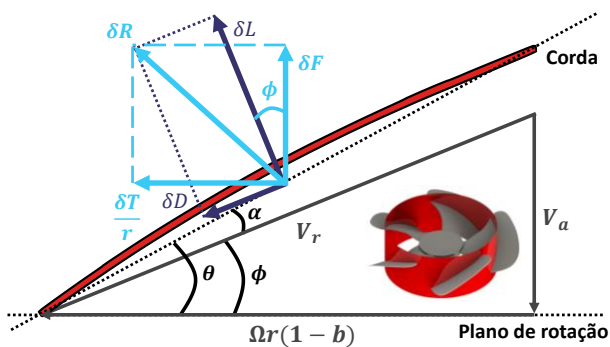


Figura 1: Principais parâmetros usados pela BET

O desempenho do perfil da pá é descrito através do modelo XFOIL, escrito por Drela (1989). Através da geometria de seção da pá do ventilador, o XFOIL prevê os coeficientes de arrasto e sustentação em função do ângulo de ataque e do número de Reynolds, calculado como $Re = V_r c / \nu$, onde ν é a viscosidade cinemática do ar. Como o XFOIL não fornece resultados contínuos em todo o domínio, foi realizada uma regressão polinomial multivariável para preencher as lacunas. Os resultados para C_l para um dos perfis discretizados da pá são mostrados na Fig. 2. Verifica-se, contudo que, em geral, as regiões interpoladas são pouco utilizadas para o cálculo da solução.

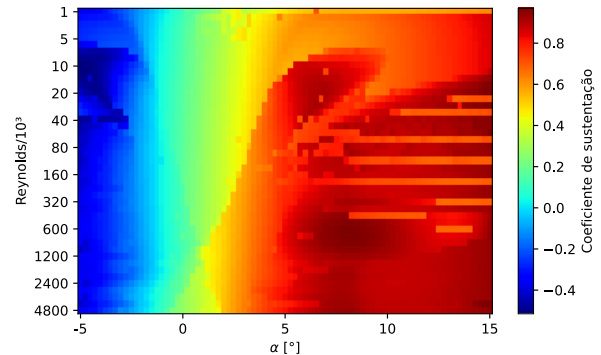


Figura 2: Coeficientes de sustentação de um perfil de pá

Algoritmo de Solução

São dados de entrada do modelo a diferença de pressão estática, a geometria do ventilador e a velocidade angular, enquanto os dados de saída são a vazão axial e o torque necessário para movimentar a pá, com o qual é possível determinar a potência de eixo. Uma vez que o modelo se baseia na solução iterativa das equações anteriores em cada um dos elementos discretos da pá na direção radial, o processo de simulação do ventilador como um todo depende da integração dos resultados ao longo do raio. O processo de solução se inicia no raio exterior, onde o empuxo é maior e, portanto, menos propenso à divergência. Inicialmente, são arbitrados os valores de V_a e b , a partir dos quais é possível obter o número de Reynolds e o valor de α . Com esses dados consulta-se a tabela gerada pelo XFOIL, a fim de determinar os valores dos coeficientes de sustentação e arrasto. Com as equações (7) e (8), chega-se então aos valores de empuxo gerado e torque consumido, que possibilitam a correção de V_a e b respectivamente através das equações (1) e (2). Caso a diferença entre os valores calculados e os da iteração imediatamente anterior esteja dentro da tolerância tem-se a convergência da solução e o modelo avança para o próximo elemento de pá, localizado em um segmento de raio mais interno. Caso contrário, os valores da solução são sub-relaxados. O algoritmo, esquematizado na Fig. 3, é encerrado quando todos os elementos da pá forem processados. Para os raios mais internos, é possível que o empuxo gerado seja menor que a força resultante devido à diferença de pressão estática imposta, configurando uma vazão negativa (refluxo). Neste caso, uma vez que a velocidade do escoamento nesses elementos tem valor absoluto pequeno, o elemento foi desprezado no cômputo da vazão total do ventilador. Nota-se que a presença (indesejada) de refluxo pode ser um

importante critério de projeto. Tal hipótese carece de verificação.

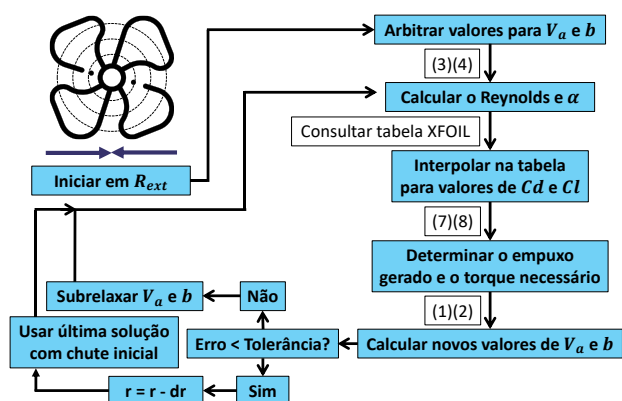


Figura 3: Fluxo de informação do algoritmo de solução

Resultados Preliminares

Como exercício inicial escolheu-se simular um ventilador de 5 pás com 254 mm de diâmetro e pressão máxima de 100 Pa. O perfil da pá foi obtido via CAD em 4 raios diferentes. Tais resultados foram processados através do XFOIL, que forneceu os coeficientes aerodinâmicos implementados na forma de 4 tabelas de dados. A pá foi discretizada em 80 elementos, visto que um maior refino de malha não levou à alteração significativa nos resultados.

O primeiro ponto analisado foi a descarga livre do ventilador, em que não há diferença de pressão estática. Na Fig. 4, estão ilustrados α e ϕ . Percebe-se que o primeiro oscila entre -1° e $1,5^\circ$, ainda assim permitindo a obtenção de sustentação positiva no aerofólio de cada elemento de pá devido ao seu arqueamento (*camber*). Como $\phi = \theta - \alpha$, e o ângulo de ataque é pequeno, ϕ segue o comportamento de θ , que se aproxima de zero para os raios iniciais, mantendo-se praticamente constante em 30° para os raios mais externos. Notam-se algumas descontinuidades que se devem à variação discreta do perfil ao longo do raio, o que requer a troca de tabela de coeficientes aerodinâmicos.

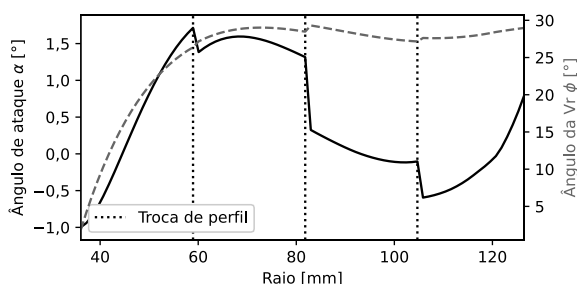


Figura 4: Ângulos do escoamento em função do raio

A Fig. 5 apresenta a variação dos coeficientes aerodinâmicos ao longo do raio. Pode-se verificar que o coeficiente de sustentação apresenta valores próximos de zero para os raios iniciais. Isso se deve ao comportamento do perfil mais interno, pouco arqueado, para um ângulo de ataque de -1° , que leva a um limiar de perda de sustentação dada a baixa eficiência aerodinâmica, que se reflete numa baixa eficiência de bombeamento. A Fig. 6 ilustra as

potências de bombeamento axial e de eixo no elemento, onde se observa que ambas crescem exponencialmente com o raio, com valores maiores na região da ponta da pá.

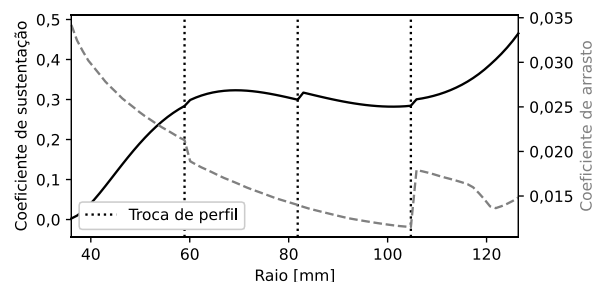


Figura 5: Coeficientes aerodinâmicos ao longo do raio

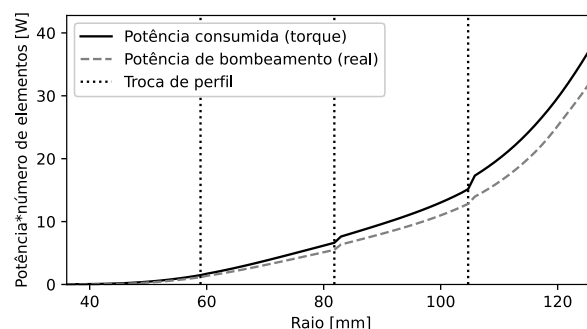


Figura 6: Potências de eixo e de bombeamento axial ao longo do raio

A fim de validar os resultados obtidos, realizou-se uma comparação entre o modelo descrito e dados experimentais obtidos em túnel de vento. Foram comparados os resultados de vazão e torque da pá dados a pressão estática e a velocidade angular da pá. Na Fig. 7 é possível observar que o modelo prevê uma vazão $\sim 20\%$ maior no ponto de descarga livre. Tal diferença pode ser explicada pelo fato de o modelo não considerar algumas não idealidades, como recirculação na ponta da pá, escoamento radial e a influência de uma pá sobre e outra.

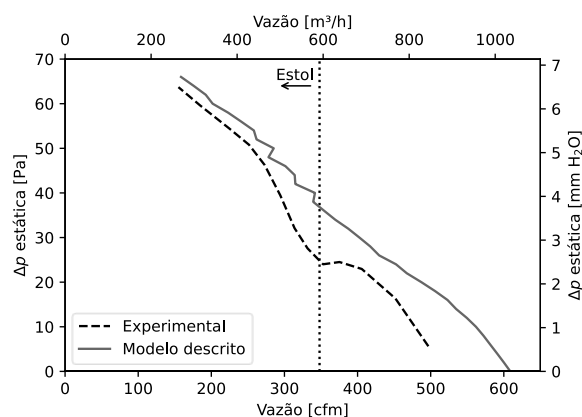


Figura 7: Diferença de pressão em função da vazão

A curva de torque em função da vazão é mostrada na Fig. 8. Na faixa compreendida entre a descarga livre e o ponto de estol, onde há descolamento da camada limite, verifica-se que o modelo apresenta desempenho razoável, com erros

inferiores a 20%. Na região entre o estol e o ponto de máxima pressão estática, o modelo prevê uma queda acentuada no torque, o que não se verifica nos experimentos. Isso se deve ao fato do escoamento nos elementos com refluxo, próximos ao raio inferior, ter sido negligenciado. Verifica-se que, embora tal aproximação não afete consideravelmente a vazão, seu efeito sobre o torque é substancial.

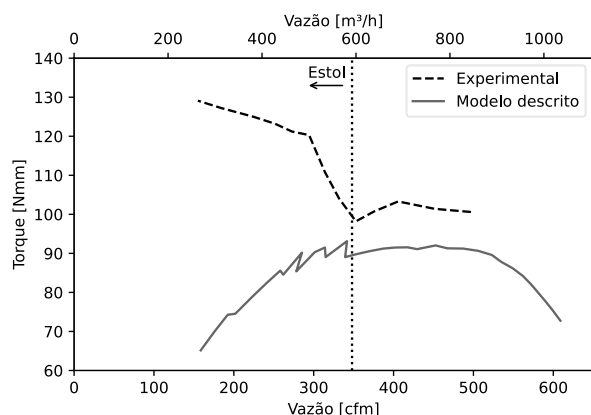


Figura 8: Torque no eixo em função da vazão

Considerações Finais

Neste artigo foram apresentados resultados preliminares de um modelo para a simulação das curvas características de ventiladores axiais com base em parâmetros geométricos de pá. A estratégia de modelagem consistiu em uma abordagem semi-analítica, fundamentada na teoria de elementos de pá, na teoria de aerofólios e no escoamento de ar na vizinhança, dando origem a um conjunto de equações algébricas não-linear para cada elemento de pá ao longo do raio. O sistema de equações foi resolvido iterativamente para cada elemento, partindo-se do raio mais externo para o mais interno, a fim de se obter os parâmetros globais do ventilador, como vazão deslocada e torque no rotor. Uma comparação entre as previsões do modelo e dados experimentais para a vazão e torque apontou erros da ordem de 20% para a região situada entre a descarga livre e o início do estol.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado sob os auspícios do programa Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia (CNPq 404023/2019-3, FAPESC 2019TR0846). Os autores agradecem o suporte financeiro da Nidec/Embraco e da Embrapii através do projeto No. PPOL-1710.0012.

Referências

- ASHRAE 41.2 (1987) Standard methods for laboratory airflow measurement, American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, USA
- Beiler, M. G., Carolus, T. H. (1999) Computation and measurement of the flow in axial flow fans with skewed blades, ASME J. of Turbomachinery, Vol. 121, pp. 59-66.
- Castegnaro, S. (2017) An aerodynamic method to design low-speed axial fans with imposed diameter and rotor

speed, Ph.D. thesis, Università degli Studi di Padova, Italy

- Drela, M. (1989) An analysis and design system for low reynolds number airfoils, Conf. Low Reynolds Number Airfoil Aerodynamics, University of Notre Dame, USA
- Glauert, H. (1983) The elements of aerofoil and airscrew theory, 2nd ed., Cambridge University Press
- Houghton, E. L., Carpenter, P. W. (2003) Aerodynamics for engineering students, 5th ed., Butterworth-Heinemann
- Schubel, P. J., Crossley, R. J., (2012) Wind turbine blade design, Energies, Vol. 5, pp. 3425-3449
- Wallis, R. A. (1961) Axial flow fans: design and practice, Academic Press

Aviso de responsabilidade

Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído neste documento.

Nomenclatura

Romano

b	Coefficiente de indutância [-]
C_d	Coefficiente de arrasto [-]
C_l	Coefficiente de sustentação [-]
D	Força de arrasto [N]
F	Força de empuxo [N]
L	Força de sustentação [N]
N_p	Número de pás do ventilador [-]
p	Pressão estática [Pa]
Q	Vazão volumétrica [m³]
r	Raio [m]
S	Área de seção transversal [m²]
T	Torque na pá do ventilador [Nm]
V_a	Velocidade axial do escoamento [m/s]
V_r	Velocidade resultante do escoamento [m/s]

Grego

α	Ângulo de ataque da pá [rad]
θ	Ângulo de inclinação da pá [rad]
ρ	Densidade do ar [kg/m³]
ϕ	Ângulo do escoamento resultante [rad]
Ω	Velocidade angular da pá [rad/s]