

MODELAMENTO ANALÍTICO E NUMÉRICO DE ROTOR EM DUTO PARA OPERAÇÃO EM REGIME SUBSÔNICO

Christian A. Vieira, Kamal A. R. Ismail

UNICAMP/Faculdade de Engenharia Mecânica – Depto. de Eng. Térmica e de Fluidos,
Cidade Universitária “Zeferino Vaz” – Campinas – SP – CEP 13083-970,
cav@fem.unicamp.br

Resumo- A utilização de propulsores por pás rotativas (rotor) em ambiente aberto é amplamente difundida na aviação. Os propulsores por pás rotativas acondicionados em dutos refletem o desenvolvimento daqueles utilizados em ambiente aberto, possuindo desempenho superior, bem como menor nível de ruído em comparação com os anteriores; no entanto, a difusão de dados referentes ao assunto na literatura é restrita. No presente trabalho, são apresentados resultados preliminares de cálculo para projeto, utilizando-se inicialmente uma análise unidimensional, para obtenção de expressões referentes ao coeficiente de empuxo dos dois tipos de propulsores analisados (em duto e em ambiente aberto) e, em seguida, uma análise bidimensional, utilizando-se o método dos painéis para modelamento do sistema (pás do rotor, obstrução central e paredes do duto), associado a resultados empíricos para equacionar o campo de escoamento a jusante do rotor. O sistema de equações obtido apresentou um Número de Graus de Liberdade igual ao número de painéis utilizado na discretização do conjunto, indicando a necessidade de se trabalhar com métodos estatísticos.

Palavras-chave: Rotor-em-duto, coeficiente de empuxo, método dos painéis, modelamento numérico.

Área do Conhecimento: III- ENGENHARIAS

Introdução

A utilização de propulsores por pás rotativas (rotor) em ambiente aberto é amplamente difundida na aviação: em aviões militares para treinamento, aviões de pequeno e médio porte, na aviação civil, para transporte de passageiros e aviões de grande porte para transporte de cargas.

Os propulsores por pás rotativas acondicionados em dutos são o desenvolvimento daqueles utilizados em ambiente aberto, possuindo desempenho superior, bem como menor nível de ruído em comparação com os anteriores; no entanto, a difusão de dados referentes ao assunto na literatura é restrita (PATTERSON). Na construção de um rotor em duto, deve-se considerar como parâmetros de projeto, a geometria da seção transversal da parede, quando se faz um corte no duto, ao longo da direção de escoamento, o número de pás do rotor, o posicionamento do rotor no interior do duto, comprimento do duto.

Rotores em duto tem um desempenho superior ao de rotores em ambiente aberto, assim como, apresentam menor nível de ruído.

Em ambientes alagados, com lâmina d'água relativamente pequena, o transporte com veículos motorizados se torna um sério problema, tanto para barcos com motores submersos, como para veículos tracionados por rodas. No Brasil, ambientes com estas características podem ser encontrados na região Amazônica, assim como,

na região do Pantanal Matogrossense. Uma solução para o problema seria a utilização de hidrobarcos (embarcações movidas a propulsores por pás rotativas, suspensos): a utilização de rotores em dutos, nestes casos, além de possibilitar um aumento de eficiência, resultaria em melhores condições de segurança para os usuários da embarcação.

Outra aplicação deste tipo de propulsor seria como ventilador axial para emprego na indústria ou como propulsor para túneis de vento.

Todo o trabalho é baseado em um modelamento de fluido incompressível e invíscido.

Neste trabalho é apresentado, em uma primeira etapa de desenvolvimento: modelamento unidimensional para rotores em ambiente aberto e para rotores em duto, baseado nos princípios de conservação de massa, energia e momento, obtendo-se parâmetros de similaridade para fins de comparação de desempenho entre os dois tipos de propulsores tratados (STEPNIEWSKI, KÜCHEMANN).

A etapa seguinte trata do equacionamento bidimensional, baseado no método dos painéis, onde a geometria do sistema é equacionada e o sistema obtido é discretizado através de uma distribuição de linhas de vorticidade concentrada. O campo de velocidades é obtido por aplicação direta da lei de Biot-Savart (MORAN). Solução analítica para velocidade induzida é possível em algumas condições particulares. A solução completa dos sistemas de equações diferenciais e

algébricas obtidos implica na utilização de métodos numéricos e estatísticos (ARORA, FLANNERY et. ali STEPNIOWSKI).

Metodologia

O modelamento unidimensional para rotor em ambiente aberto foi baseado no sistema de referência da (Figura 1), a seguir. Trata-se de um disco rotor que fornece empuxo ao fluido e, a partir do sistema apresentado, desenvolve-se o princípio de conservação de energia (equação de Bernoulli) e momento (ação e reação) baseados em entrada e saída de um volume de controle devidamente posicionados em torno do disco propulsor.

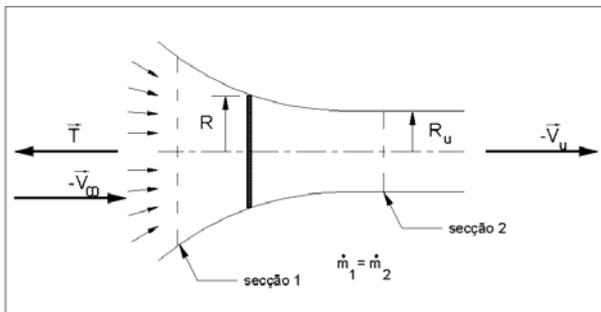


Figura 1- Sistema de Referência para Rotor em Ambiente Aberto.

Aplicando-se a Equação de Bernoulli ao sistema da (Figura 1), obtém-se a variação de pressão do fluido devido à passagem pelo rotor, dada pela (Equação 1):

$$\Delta p = \rho v_u \left(V_\infty + \frac{v_u}{2} \right) \quad (1)$$

Conseqüentemente, o empuxo desenvolvido pelo rotor de raio R, será dado pela (Equação 2):

$$T = \pi R^2 \rho \left(V_\infty + \frac{v_u}{2} \right) v_u \quad (2)$$

Adimensionalizando-se a (Equação 2), obtém-se o coeficiente de empuxo, dado pela (Equação 3), a seguir (KÜCHEMANN):

$$\bar{c}_T = 2 \left(1 + \frac{v_u}{2V_\infty} \right) \left(\frac{v_u}{V_\infty} \right) \quad (3)$$

Para o caso do rotor em duto, o sistema de referência é apresentado na (Figura 2). Aplicando-se a Equação de Bernoulli para o referido sistema, associada à conservação de massa e inserindo-se o empuxo fornecido pelo disco propulsor, obtém-se a expressão para o coeficiente de empuxo,

apresentado pela (Equação 4), a seguir (KÜCHEMANN):

$$\bar{c}_T = 2 \left(1 + \delta + \frac{v_u}{2V_\infty} \right) \left(\frac{v_u}{V_\infty} \right) \quad (4)$$

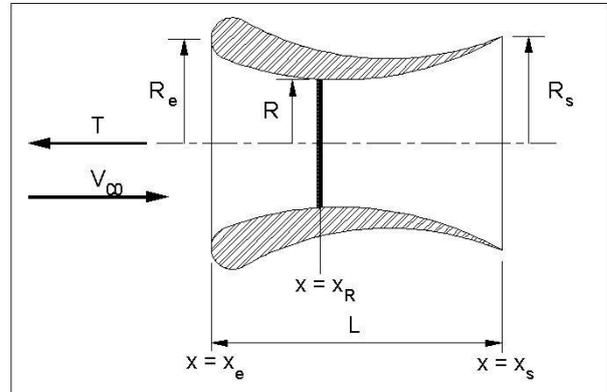


Figura 2- Sistema de Referência para Rotor em Duto.

Comparando-se a equação (4) com a equação (3), observa-se a presença do fator δ no primeiro termo: trata-se de um acréscimo relativo de velocidade proporcionado pela presença do duto, responsável pelo direcionamento do fluido a jusante do disco propulsor.

Implementando-se um modelamento bidimensional, a fim de se obterem resultados mais detalhados sobre o desempenho dos propulsores em estudo, optou-se pela utilização do método dos painéis.

Para o caso de um rotor, os painéis posicionados sobre as pás do mesmo dão origem a espiras retangulares helicoidais de vorticidade, que devem acompanhar as linhas de corrente do sistema apresentado na (Figura 3). A aplicação direta da Lei de Biot-Savart para determinação do campo de velocidade induzida não permite a obtenção de solução analítica.

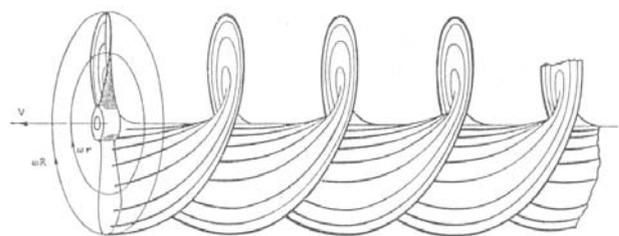


Figura 3 – Linhas de corrente para pás rotativas.

Ao sistema apresentado na (Figura 3), deve-se acrescentar um conjunto de anéis de vorticidade relacionado à obstrução central do propulsor, conforme descrito anteriormente, bem como para modelamento das paredes do duto.

O campo de velocidade induzida por uma linha de vorticidade de intensidade Γ e' dado pela (Equação 5), a seguir:

$$\vec{V}_{ind} = \frac{\Gamma}{4\pi} \oint \frac{d\vec{l} \times d\vec{r}}{r^3} \quad (5)$$

Em função da geometria do sistema, optou-se pela utilização de um sistema de coordenadas cilíndricas fixo sobre o rotor. A partir dos vínculos formados pelo campo de escoamento, as componentes do vetor resultante da (Equação 5) são parametrizadas em função de uma única coordenada, permitindo a simplificação da solução pela obtenção de um sistema de equações diferenciais ordinárias. A determinação do conjunto de vorticidades é determinada pela condição de paralelismo das linhas de escoamento às superfícies sólidas do sistema e resulta no conjunto de (Equações 6), a seguir, onde o índice i está relacionado ao i -ésimo painel do sistema, o índice j está relacionado ao j -ésimo ponto de cálculo e o índice K está relacionado à componente do vetor sendo calculado (r , z ou Θ).

$$[P_{i,j}]_K \cdot [\Gamma_i] = [V_i]_K \quad (6)$$

Resultados

Com relação ao modelamento unidimensional, os resultados para coeficiente de empuxo são resumidos na (Figura 4), a seguir, onde se pode observar o desempenho superior dos rotores em duto, em comparação com os rotores em ambiente aberto.

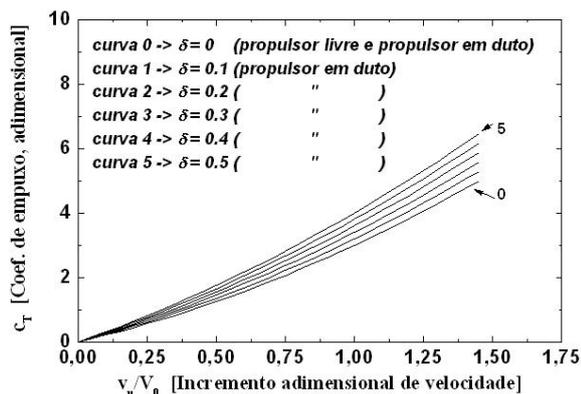


Figura 4 – Coeficiente de empuxo em função do incremento de velocidade do jato e da relação com a velocidade do escoamento longe do propulsor.

Para o caso do modelamento bidimensional, foram implementadas rotinas para desenho dos contornos das superfícies sólidas do sistema, bem como, para mapeamento das posições das linhas de vorticidade e dos pontos de cálculo onde se impõe a condição de paralelismo do campo de

escoamento à superfície (basicamente, a definição de um conjunto de aerofólios finos, onde a linha de vorticidade é posicionada a 1/4 da corda e a velocidade induzida é calculada em 3/4 da corda. O resultado de um destes mapas é exemplificado na (Figura 5).

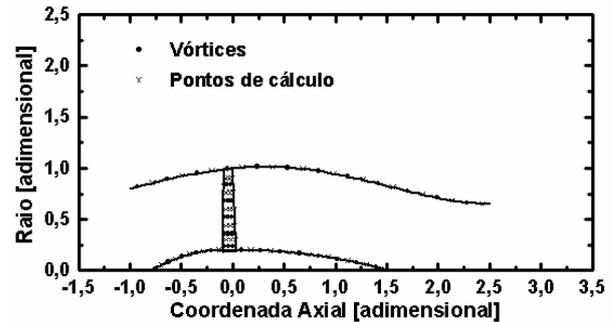


Figura 5 – Mapeamento de vórtices e pontos de cálculo de velocidade induzida para um rotor em duto hipotético.

O perfil do fator multiplicativo da vorticidade (integrando de uma das componentes da (Equação 5) é apresentado na (Figura 6): observa-se a presença de um pico proeminente, acompanhado de oscilações de intensidade decrescente.

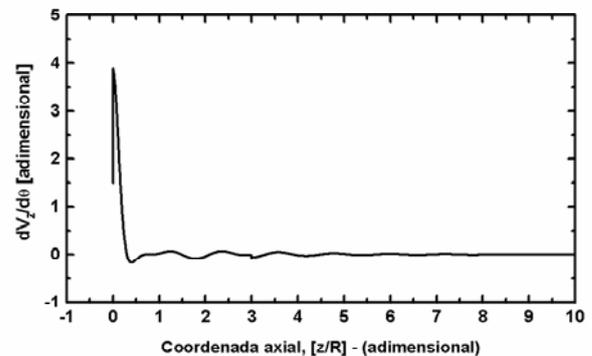


Figura 6 – Função a ser integrada para determinação do campo de vorticidades do sistema.

Discussão

Ainda, com relação aos métodos unidimensionais de análise, a utilização das equações de conservação permitiram uma análise qualitativa das diferenças dos propulsores em estudo. Uma análise mais detalhada permitiu, também, a determinação de parâmetros geométricos do rotor em duto, como relações entre raio de entrada e raio de saída do duto.

Para o caso das análises bidimensionais, deve-se considerar que os vínculos entre as coordenadas são restritos, ou seja, a condição de paralelismo do campo de escoamento às superfícies sólidas leva ao vínculo entre as

componentes radial e angular da velocidade sobre as pás do rotor, e ao vínculo entre as componentes radial e axial da velocidade sobre as demais superfícies do sistema (paredes do duto e da obstrução interna do propulsor). Desta forma, o sistema apresenta um número de graus de liberdade igual ao número de painéis. A solução deste sistema requer o uso de métodos estatísticos. Com relação à (Figura 6), o pico proeminente observado, torna-se um problema para a convergência de métodos convencionais de solução de equações diferenciais ordinárias, dando origem à utilização de métodos mais robustos.

Conclusão

O desenvolvimento da primeira etapa do projeto se deu de forma satisfatória, permitindo a obtenção de resultados em concordância com a literatura pesquisada e demonstrando vantagens no uso de um rotor em duto em relação a um rotor em ambiente aberto, conforme esperado. O modelamento implementado nesta etapa ficou restrito à solução de problemas em uma dimensão.

Para a segunda etapa do projeto, procedeu-se com a implementação de modelamento bidimensional, com menções a um modelamento tridimensional. Fez-se um estudo visando a solução numérica do problema utilizando-se o método dos painéis, com base na Lei de Biot-Savart para obtenção das equações diferenciais relacionadas às componentes de velocidade induzida no campo de escoamento, devido às vorticidades concentradas. Em função das características do sistema modelado, o problema deu origem a dois conjuntos de linhas de vórtices concentrados: anéis de vórtices e espiras retangulares helicoidais, originadas a partir da rotação das pás (BAIRSTOW). Apenas para a parcela correspondente ao segmento radial sobre as pás do rotor, foi possível obter solução analítica. Para os demais, recorreu-se a integração numérica e, devido às características do sistema (vide (Figura 6)), houve problemas de convergência, acarretando a necessidade de utilização de método mais robustos e/ou de princípios estatísticos, como o Método de Monte Carlo.

Antes de se resolverem as equações diferenciais, fez-se o modelamento das superfícies envolvidas no sistema do propulsor: (1) obstruções centrais, a montante e a jusante do rotor, responsáveis, em um modelo real, pela acomodação do motor e/ou mecanismos e, em parte, pelo direcionamento do fluido da entrada do propulsor (caso haja o duto) ao rotor e deste para a saída; (2) parede do duto (quando existir) e (3) pás do rotor. Para esta última, admitiu-se a

aproximação de aerofólio fino, plano, porém com rotação sobre o eixo transversal ao campo de escoamento, na direção radial e com a possibilidade de variação da corda em função do raio.

Alcançado-se o desenvolvimento previsto, ter-se-á uma importante ferramenta para projeto de rotores (para operação em duto ou em ambiente aberto), visando desenvolvimento de sistemas de propulsão em suas diversas aplicações conforme objetivo principal proposto, bem como, um modelo para desenvolvimento de ancoradores e estabilizadores de chamas, do tipo "swirler", para aplicações combustão e energia.

Referências

- ARORA, J.S. Efeito da corrente elétrica de baixa intensidade em feridas cutâneas de ratos. 2006. 121f. Dissertação (Mestrado em Bioengenharia) – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, Universidade do Vale do Paraíba, 2006.
- BAIRSTOW, L. Applied Aerodynamics. **Longmans, Gree and Co.**, 2. ed. London, UK, 804p., 1939.
- BEER, J.M. and CHIGIER, N.A. Combustion Aerodynamics. **Applied Science**, 2. ed. London, UK, 1972.
- FOX, R.W., McDONALD, A.T.. Introduction to Fluid Mechanics. **John Wiley & Sons**. 5. ed. NY, USA, 762p.
- KÜCHEMANN, D. and WEBER, J.. Aerodynamics of Propulsion. **McGraw-Hill**, NY, USA, 1953.
- MORAN, J.. An Introduction to theoretical and Computational Aerodynamics. **Dover**, NY, USA, 464p., 2003.
- PATTERSON, G.N.. Ducted Fans: Design for High Efficiency. **Australian Council for Aeronautics**, Report ACA-7, 27p., July, 1944.
- PRESS, W.H., FLANNERY, B.P., TEUKOLSKY, S.A. and VETTERLING, W.T.. Numerical Recipes in Pascal – the Art of Scientific Computing. **Cambridge University**, NY, USA, 759p., 1994.
- SCHLICHTING, H.. Boundary Layer Theory. **McGraw-Hill**, London, UK, 1979.
- STEPNIIEWSKI, W. Z.. Rotary Wings Aerodynamics. **Dover**, NY, USA, 1984.