

ESTUDO NUMÉRICO DO EFEITO DE DISSIPAÇÃO DE ESTEIRAS DE AERONAVE UTILIZANDO O MÉTODO DO CRESCIMENTO DO RAI DO NÚCLEO MODIFICADO COM TRANSFERÊNCIA DE CALOR MISTA (IMPLEMENTAÇÃO DE DIFERENTES ESQUEMAS DE ADVECÇÃO E EFEITOS DE VENTO LATERAL)

Riquelme Augusto da Silva Machado¹ (IC), Luiz Antonio Alcântara Pereira (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá

Palavras-chave: Descrição lagrangiana. Processamento paralelo. Simulação numérico-computacional. Trajetória de vórtices. Transferência de calor por convecção mista.

Introdução

Com o passar dos anos, o uso do transporte aéreo tem se intensificado, trazendo consigo desafios cada vez maiores no controle de pousos e decolagens. Um dos principais obstáculos em aeroportos congestionados é a gestão do espaçamento entre aeronaves, tanto em pousos quanto em decolagens, pois é necessário aguardar até que os vórtices de esteira se dissipem antes que outra aeronave possa utilizar a pista. De acordo com Zheng e Ash (1996), esses vórtices que desprendem da ponta da asa possuem intensidade proporcional ao tamanho da aeronave e pode se desenvolver por distâncias consideráveis. Observando isso, surge a necessidade de modelar essas estruturas vorticosas, a fim de entender como elas se comportam em diferentes situações.

Este trabalho implementa um método de partículas de temperatura para a análise da dissipação de esteiras de aeronaves nas imediações de uma pista de aeroporto aquecida. Nesta técnica, o campo de vorticidades, gerado a partir dos vórtices de ponta de asa e na camada limite formada a partir do chão do aeroporto, é discretizado e representado por uma nuvem de vórtices discretos de Lamb. O calor gerado a partir da camada limite térmica formada na pista do aeroporto é discretizado e representado por uma nuvem de partículas de temperatura. O método de partículas de temperatura é um método puramente lagrangiano e computacionalmente caro devido a utilização da Lei de Biot Savart para o cálculo do campo de velocidades induzidos pelos vórtices discretos sobre eles mesmos e sobre as partículas de temperatura (Kamemoto, 2004). As forças de flutuação são calculadas pela interação do campo de temperaturas com o campo de vorticidades; esta interação partículas de temperatura-vórtices discretos também é cara computacionalmente (Ogami, 2001), desde que a intensidade de cada vórtice discreto é instantaneamente modificada pela temperatura induzida pelos vórtices discretos. Em trabalho recente, Moraes et al. (2022) demonstrou a importância da geração de camada limite sobre o chão da pista do aeroporto para o cálculo correto

do movimento de convecção das estruturas vorticosas primárias, que se desprendem das pontas de asa de um avião e interagem com o chão.

O presente estudo busca analisar a interação vórtice-vórtice e vórtice-temperatura, diferenciando os métodos de advecção (sendo o método de Euler de primeira ordem, o método de Adams-Bashforth de Segunda ordem e o método de Runge-Kutta de Segunda ordem). O método de partículas de temperatura simula a convecção das duas nuvens de partículas através dos mecanismos de advecção e de difusão. O método de imagens (Katz and Plotkin, 1991) é utilizado para anular a velocidade normal sobre a pista (condição de impenetrabilidade) através de vórtices discretos imagens. De maneira similar, partículas de temperatura imagens são usadas para garantir a condição de temperatura constante sobre a pista. A condição de escorregamento nulo é garantida pela geração de vórtices discretos de Lamb ao longo da pista em cada instante de tempo; e a geração instantânea de partículas de temperatura ao longo da pista do aeroporto é simulada através da Lei de Fourier Modificada.

A principal contribuição deste trabalho é implementar e analisar a eficiência de três esquemas diferentes de advecção para simular a advecção da nuvem de vórtices discretos e da nuvem de partículas de temperatura. Este cálculo necessita do conhecimento do campo de velocidades instantâneo sobre cada partícula através das contribuições do vento lateral (quando houver), da nuvem de vórtices discretos e da nuvem de vórtices discretos imagens. A difusão da vorticidade e do calor é simulada pelo Método do Crescimento do Raio do Núcleo Modificado, uma técnica também computacionalmente cara, porque envolve partição de partículas, e também pelo Método de Avanço Randômico.

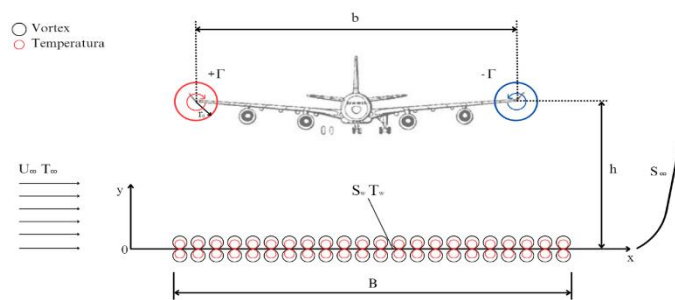
Por fim, os resultados obtidos pelas simulações foram comparados com os resultados experimentais de Liu e Srnsky (1990), e representados graficamente utilizando software Grapher 8. As curvas obtidas mostraram que o método de Runge-Kutta de segunda ordem apresentou o menor erro com relação aos dados experimentais. Além disso, a implementação da paralelização OPEMNP conseguiu acelerar os cálculos e reduzir o tempo de

processamento das simulações.

Metodologia

A figura [1] representa, de forma esquemática, o problema do Aeroporto. De forma ilustrativa, ao centro da imagem tem-se um avião a jato, modelo A340-600, com vórtices sendo gerado em sua asa, para simplificar o descolamento de vórtices durante operações de decolagem e aterrissagem.

Figura [1] – Esquema do problema do Aeroporto.



Fonte: O autor (2024).

Inicialmente, afim de reduzir a complexidade do problema foram assumidas algumas hipóteses simplificadoras, sendo:

H1: O escoamento realiza-se no plano, isto é, escoamento bidimensional. Além disso, o escoamento é realizado no semiplano positivo.

H2: O comportamento reológico do fluido é caracterizado como “fluido newtoniano”.

H3: As propriedades dos fluidos como a massa específica (ρ), o coeficiente de viscosidade cinemática ($\nu = \mu/\rho$), o calor específico a pressão constante (c_p) e o coeficiente de difusividade térmica (α) são assumidos como constante em todo domínio fluido. Entretanto, a massa específica pode variar moderadamente em regiões que houver gradiente de temperatura.

H4: Os efeitos de compressibilidade são desprezados, isto é, o Número de Mach é $Ma < 0,3$.

H5: Os efeitos de turbulência são desprezados, embora as simulações sejam realizadas com número de Reynolds na faixa de $10^4 < Re < 10^5$.

H6: A massa específica (ρ) do fluido apresenta variações moderadas no termo de empuxo na 2ª Equação de Navier-Stokes (aproximação de Boussinesq).

Buscando facilitar a resolução dos cálculos adimensionalizou-se algumas equações adotando-se grandezas representativas. A escala de comprimento

foi definida como (b), a escala de velocidade foi baseada na circulação dos vórtices (Γ/b) e a escala de tempo foi obtida fazendo a relação entre as duas escalas citadas anteriormente (b^2 / Γ).

A partir disso, utilizou-se a Equação do Transporte da Vorticidade (E.T.V), representado pela equação 1 (a aproximação de Boussinesq é assumida), para escoamentos bidimensionais, e pela equação da energia, respectivamente (Moraes et al., 2022):

$$\frac{D\omega}{Dt} = Ri \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{1}{Re} \nabla^2 \omega \quad (1)$$

$$\frac{D\theta}{Dt} = \frac{1}{RePr} \nabla^2 \theta \quad (2)$$

Sendo ω a componente do vetor vorticidade, u o vetor velocidade do fluido, Re o número de Reynolds, Ri o número de Richardson e θ a componente adimensional da temperatura.

A solução da E.T.V é realizada pelo algoritmo chamado “Viscous Splitting Algoritmo”, proposto por Chorin (1973), que permite resolver os problemas de advecção e difusão da vorticidade separadamente, se o incremento de tempo for suficientemente pequeno; após a resolução, os efeitos podem ser somados.

A difusão foi resolvida utilizando o Método de Avanço Randômico proposto por (Lewis, 1991) que é um método estatístico baseado no movimento Browniano de partículas, e também o Método de Crescimento do Raio do Núcleo Modificado. Já a Advecção foi resolvida pelos métodos de Euler, Adams-Bashforth e Runge-Kutta, a fim de obter-se o método que mais se aproxima das curvas experimentais. As equações que representam esses métodos foram apresentadas abaixo, respectivamente.

$$x^{(i)}(t + \Delta t) = x^{(i)}(t) + [u^{(i)}(t)]\Delta t \quad (3)$$

$$x^{(i)}(t + \Delta t) = x^{(i)}(t) + [1.5u^{(i)}(t) - 0.5u^{(i)}(t - \Delta t)]\Delta t \quad (4)$$

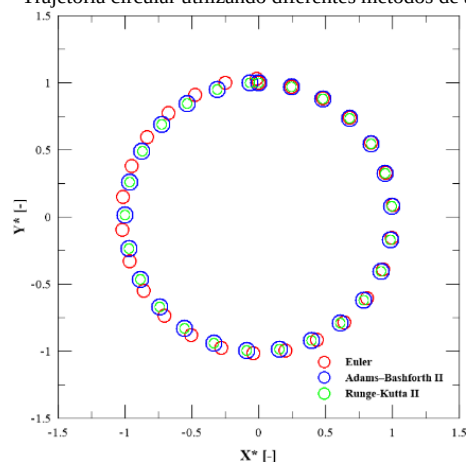
$$x^{(i)}(t + \Delta t) = x^{(i)}(t) + [u^{(i)}(t + 0.5\Delta t)]\Delta t \quad (5)$$

Para calcular o movimento advectivo das partículas é necessário saber as induções de velocidade (vórtice-vórtice, vórtice-vórtice imagem e vórtice-temperatura). Com isso, utilizou-se a Lei de Biot-Savat, com processamento paralelo OPENMP, no cálculo do campo de velocidades.

Resultados e discussão

Inicialmente, buscou-se encontrar o método de advecção com o menor erro, sem que exigisse muito esforço computacional. De acordo com Chapra & Canalle 2008, o método de Runge-Kutta de segunda ordem possui uma acurácia de dados melhor quando comparado ao método de Euler. Visando isso, desenvolveu-se um programa utilizando dois vórtices de forma que um induzia velocidade no outro e ambos realizavam uma trajetória circular. Para promover a advecção dos vórtices utilizou-se 3 métodos: Euler de primeira ordem, Adams-Bashforth de segunda ordem e Runge-Kutta de segunda ordem. O resultado desta simulação é mostrado na Figura [2].

Figura [2] – Trajetória circular utilizando diferentes métodos de advecção.

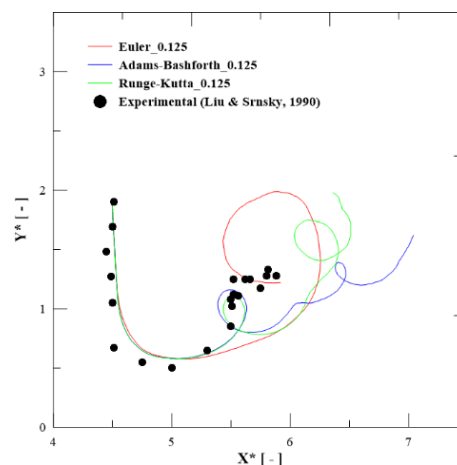


Fonte: O autor (2024).

O erro relativo aos métodos foi calculado a partir de uma estratégia que comparava a trajetória real e a trajetória ideal. O incremento de tempo utilizado foi de 0,05 e o critério de parada era 2 voltas completas de cada vórtice. Como resultados, obtivemos um erro de 2,1767% para o método de Euler, $3,5824 \times 10^{-3}$ para o método de Adams-Bashforth e $5,9005 \times 10^{-5}$ para o método de Runge-Kutta. Dessa forma, o método de Runge-Kutta de segunda ordem foi definido para ser utilizado no problema do Aeroporto.

Além do método de advecção, foi necessário encontrar o incremento de tempo que mais se aproximasse das curvas experimentais de Liu e Srnsky (1990). A Figura [3], representa o problema do Aeroporto com a difusão calculada pelo método de Avanço randômico. Pode-se perceber que um incremento de tempo de 0,125, para o método de RK, é o que mais se aproxima dos dados experimentais. Vale ressaltar que o Método do Crescimento do Raio do Núcleo modificado foi implementado no trabalho, porém será apresentado no relatório final da iniciação científica.

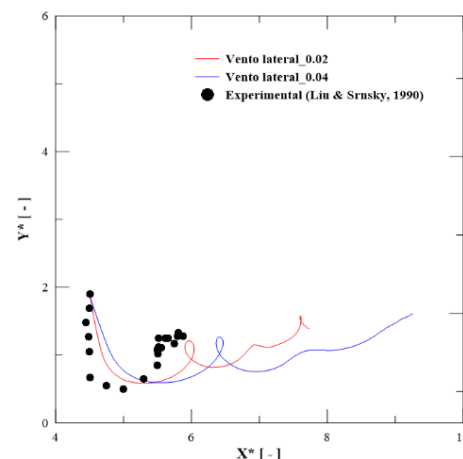
Figura [3] – Problema do Aeroporto para $\Delta t=0,125$.



Fonte: O autor (2024).

Além do gráfico apresentado na Figura [3], foram realizadas outras simulações utilizando incrementos de tempo iguais a 0,05, 0,10, 0,15, 0,20, 0,25 e 0,30, porém os resultados se distanciaram dos dados experimentais. Outra importante análise nesse estudo foi o vento lateral, pois de acordo com Zheng e Ash (1996), o vento cruzado pode fazer com que os vórtices de esteira migrem ou para uma pista paralela ou até mesmo atinja um voo original em uma pista única. A Figura [4] representa o problema do Aeroporto com velocidades adimensionais de vento lateral iguais a 0,02 e 0,04.

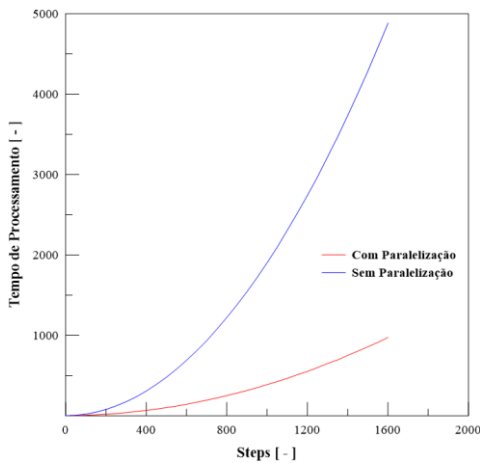
Figura [4] – Problema do Aeroporto com vento lateral.



Fonte: O autor (2024).

Como forma de otimizar os cálculos do campo de velocidades das partículas de vórtice e temperatura, e da difusão, utilizou-se a paralelização OPEMNP. Entretanto, para validar essa metodologia, realizou-se duas simulações, no programa final, sendo uma com paralelização e outra sem paralelização. Os resultados estão representados na Figura [5].

Figura [5] – Problema do Aeroporto com e sem paralização.



Fonte: O autor (2024).

Utilizando a paralelização foram necessárias 16 horas e 4 minutos para finalizar a simulação, já sem a paralelização foram necessárias 79 horas e 30 minutos. Dessa forma, a utilização do OPENMP conseguiu reduzir o tempo de processamento em quase 80%, permitindo assim utilizar avanços cada vez maiores nas simulações. Vale ressaltar que ambas simulações utilizaram um incremento de tempo de 0,125 e um total de avanço de 1650.

Conclusões

Conforme apresentado nos resultados, este trabalho atingiu o resultado principal de encontrar um método de advecção que se aproximasse das curvas experimentais com um menor erro. Além disso, como o método calcula o campo de velocidades duas vezes, desenvolveu-se técnicas para acelerar os cálculos, como a paralelização, que permitia utilizar mais threads durante a simulação. Um ponto importante a se destacado é a proximidade das curvas obtidas com os dados experimentais de Liu e Srnsky (1990). Isso garante que o programa desenvolvido e a física utilizada estão de acordo com a literatura. Como trabalho futuro, podem ser implementados neste programa o estudo da turbulência, que permite analisar as pequenas escalas do escoamento (Bimbato, 2012) e também uma análise dos efeitos da rugosidade do solo no escoamento utilizando o método de Runge-Kutta na advecção dos vórtices e partículas de temperatura. Destaca-se que este trabalho gerou alguns dados para um artigo aceito para publicação no ENCIT 2024 (Chiaradia et al., 2024).

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, ao meu orientador Luiz Antonio Alcântara Pereira, por todo o apoio, orientação e

confiança depositados ao longo deste projeto. Sua expertise e paciência foram fundamentais para o meu desenvolvimento acadêmico e pessoal.

Agradeço também a Fapemig pela oportunidade de participar deste programa e pela bolsa de estudos, que possibilitou a realização desta pesquisa. Sou grato à Universidade Federal de Itajubá pelo suporte e infraestrutura que viabilizaram o andamento deste trabalho.

Por fim, agradeço à minha família e amigos pelo apoio incondicional e incentivo durante todo o processo, e aos meus colegas de laboratório, Tiago Raimundo Chiaradia, Gabriel Ferraz Marcondes de Carvalho e Juliano de Souza Zarinello Júnior, que colaboraram diretamente ou indiretamente para a conclusão deste projeto.

Referências

- Bimbato, A. M., (2012)**, “Estudo de Escoamento Turbulento em Torno de um Corpo Rombado de Superfície Hidraulicamente Lisa ou Rugosa Utilizando o Método de Vórtices Discretos”. Tese de Doutorado, IEM/UNIFEI.
- Chapra, Steven C.; Canale. Raymond P.** Métodos Numéricos para Engenharia, 5ª ed, McGraw Hill, 2008, ISBN: 978-85-86804-87-8.
- Chiaradia, T.R., Marcondes, G.F.M., Zarinello Jr., J.S., Silva Machado, R.A. and Alcântara Pereira, L.A. (2024)**, “Study of Vortex-Temperature Interactions Applied for Aircraft Wake Vortices in Vicinity of Heated Ground Plane: the advection problem solution using different schemes to integrate the particles trajectory” 20th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering November 10th-14th, 2024, Foz do Iguaçu – PR – Brazil.
- Chorin, A.J., (1973)**, “Numerical Study of Slightly Viscous Flow”. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 57, pp.785-796.
- Ferziger, J.H., 1981.** Numerical Methods for Engineering Application. John Wiley & Sons, Inc.
- Kamemoto, K.** On Contribution of Advanced Vortex Element Methods toward Virtual Reality of Unsteady Vortical Flows in the New Generation of CFD. J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. 2004, 26, 368–378.
- Katz, J., Plotkin, A., (1991)**, “Low Speed Aerodynamics: From Wing Theory to Panel Methods”. McGraw Hill, Inc.
- Moraes, P.G., Oliveira, M.A., Bimbato; A.M., Alcântara Pereira, L.A., 2022.** “A Lagrangian Description of Buoyancy Effects on Aircraft Wake Vortices from Wing Tips near a Heated Ground Plane”. Energies. 15, 6995.
- Ogami, Y.** Simulation of Heat-Fluid Motion by the Vortex Method. JSME Int. J. Ser. B Fluids Therm. Eng. 2001, 44, 513–519.
- Zheng, Z.C.; Ash, R.L., (1996)**, “Study of Aircraft Wake Vortex Behavior Near the Ground”, AIAA Journal, v. 34, n° 3, pp. 580-589.