

## ESTUDO NUMÉRICO DO EFEITO DE DISSIPAÇÃO DE ESTEIRAS DE AERONAVE UTILIZANDO O MÉTODO DO CRESCIMENTO DO RAI DO NÚCLEO MODIFICADO COM TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO MISTA (IMPLEMENTAÇÃO DA DIFUSÃO DE CALOR VIA MÉTODO DO CRESCIMENTO DO RAI DO NÚCLEO MODIFICADO)

Juliano de Souza Zarinello Júnior, Luiz Antônio Alcântara Pereira

Universidade Federal de Itajubá

**Palavras-chave:** Aeroporto. Difusão. Simulação fluidodinâmica.

### Introdução

A pesquisa tem como tema a implementação do método do crescimento do raio do núcleo modificado (MCRNM) para o caso de um avião cujos vórtices se desprenderam das asas, além disso, contém a implementação do MCRNM para partículas de temperatura.

Ademais, o estudo tem o objetivo da complementação de um outro estudo computacional Lagrangeano já feito sobre o caso de desprendimento de vórtices em ponta de asa de avião, trazendo mais complexidade e realidade devido aos métodos adicionados.

Por fim, a importância deste trabalho é voltada para a segurança em aeroportos, onde possui grande fluxo de aeronaves. Os vórtices desprendidos interagem com as aeronaves na vizinhança

### Metodologia

O primeiro caso a ser programado foi de um par de vórtices que rotacionavam entre si devido suas intensidades serem iguais. O programa finalizava apenas quando os vórtices alcançavam uma volta de  $360^\circ$ . Este estudo serviu para familiarização com o primeiro método de advecção utilizado, o método de Euler (o método de difusão não foi aplicado neste primeiro caso). A esquematização pode ser vista na figura abaixo:

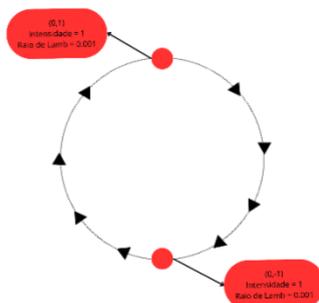


Figura 1 – Esquema do programa rodado

Em seguida começou o trabalho no caso do aeroporto que consistia em criar uma nuvem de vórtices

em cada ponta de asa do avião. Para garantir a impenetrabilidade foi utilizado o método das imagens (Katz and Plotkin, 1991), que consiste em criar uma esteira de vórtices nas coordenadas definidas como chão e espelhar esta esteira e os vórtices na ordenada negativa do plano. Este método anula o vetor normal de velocidade dos vórtices, garantido esta condição de contorno.

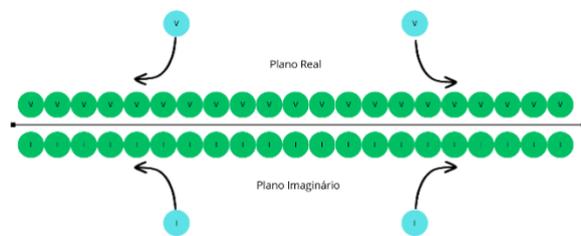


Figura 2 - Esquemática do método das imagens

A geração de vorticidade se dá gerando uma nuvem de vórtices discretos, que representam as estruturas vorticosas primárias, distribuídas randomicamente dentro de um raio máximo definido no programa. Para poupar processamento os dados são espelhados para a outra ponta da asa do avião com intensidade trocada. Em seguida é resolvido um sistema linear a fim de se determinar a intensidade dos vórtices, levando em consideração a conservação global. É nesta etapa que garantimos o escorregamento nulo (vetor tangente igual a zero).

Para o método de advecção, utilizamos uma chave de seleção que alterna entre três métodos: Euler, Adams-Bashford e Runge-Kutta. Vale ressaltar que o caso foi adimensionalizado para simplificação das equações e maior facilidade de comparação com o caso real. É necessário também calcular a interação vórtice-vórtice para a advecção que fica responsável pela equação de Biot-Savart (KATZ & PLOTKIN, 2001). A turbulência pode ser acrescentada com o aumento da viscosidade do

fluido (ficando maior que a viscosidade normal deste mesmo fluido), simbolizando a agitação e transferência de energia das grandes estruturas turbulentas para as menores, ocorrendo dissipação (BIMBATO, 2012).

Também para o método de difusão foi feito uma chave de seleção contendo: método do crescimento do raio do núcleo (MCRN), avanço randômico e MCRNM. O avanço randômico é um método probabilístico baseado no modelo Browniano que gera valores responsáveis por reger o deslocamento radial e angular de partículas em relação ao ponto em que se encontram. MCRN é um método apresentado por Leonard (1980) que cresce o raio do núcleo da partícula, entretanto foi questionado por Greengard (1985) devido ao método apresentar inconsistências em relação aos dados experimentais. Por fim, o método foi retomado por Rossi (1996) com o chamado MCRNM em que além de crescer o raio do núcleo também ocorria a partição em partículas-filho.

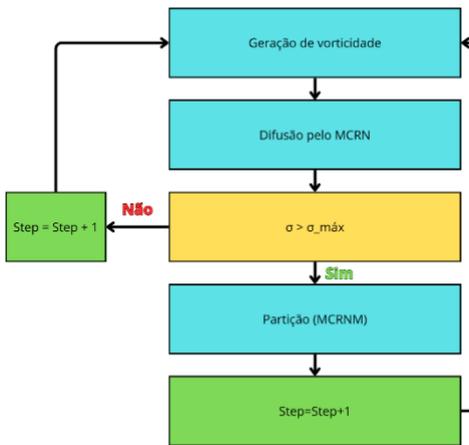


Figura 3 - Código responsável pelo MCRNM

Em finalização, foram acrescentadas as partículas de temperatura, regidas pelas mesmas leis de difusão e advecção escolhidas para os vórtices, além de gerarem influência na movimentação dos vórtices presentes no estudo.

**Resultados e discussão**

Durante o desenvolvimento do projeto, foi feito paralelamente um estudo sobre os parâmetros do MCRNM a fim de determinar um equilíbrio entre e processamento e refinamento. O parâmetro em questão foi o fator de refinamento (alfa) presente que varia de 0 a 1. O objetivo foi tentar trazer alfa mais próximo possível de 1 utilizando o programa do aeroporto finalizado com o método de Runge-Kutta selecionado na chave de advecção e levando em consideração uma operação

viável para o computador do laboratório em questão de tempo de processamento. Encontrou-se um alfa de 0.7 que atendia muito bem ao caso se utilizado em iterações próximas de 500.

| Tempo de processamento: Segundos |              |          |          |          |          |                 |
|----------------------------------|--------------|----------|----------|----------|----------|-----------------|
|                                  | Step = 1     | Step = 2 | Step = 3 | Step = 4 | Step = 5 | Step = 6        |
| alfa = 0,1                       | 0,028        | 0,014    | 0,015    | 0,017    | 0,025    | 0,93            |
| alfa = 0,2                       | 0,002        | 0,003    | 0,007    | 0,017    | 0,041    | 0,271           |
| alfa = 0,3                       | 0,002        | 0,005    | 0,021    | 0,086    | 0,411    | 3,496           |
| alfa = 0,4                       | 0,002        | 0,011    | 0,078    | 0,505    | 5,298    | 47,842          |
| alfa = 0,5                       | 0,002        | 0,021    | 0,253    | 2,619    | 57,728   | 1775,815        |
| alfa = 0,6                       | 0,004        | 0,066    | 1,31     | 6,508    | 2493,382 | 17690,41        |
| alfa = 0,7                       | 0,0049999999 | 0,163    | 3,251    | 11,309   | 17700,99 | 52220,9         |
| alfa = 0,8                       | 0,006        | 0,59     | 6,098    | 16,904   | 61394,61 | Impossibilitado |
| alfa = 0,9                       | 0,0099999999 | 1,826    | 8,888    | 21,468   | 153042,5 | Impossibilitado |

Tabela 1 – Tempo de processamento em segundos levando em consideração o alfa

De fato, o MCRNM foi implementado com êxito, contribuindo com o estudo publicado no ENCIT 2024 relacionando os diferentes métodos de advecção com os dados práticos.

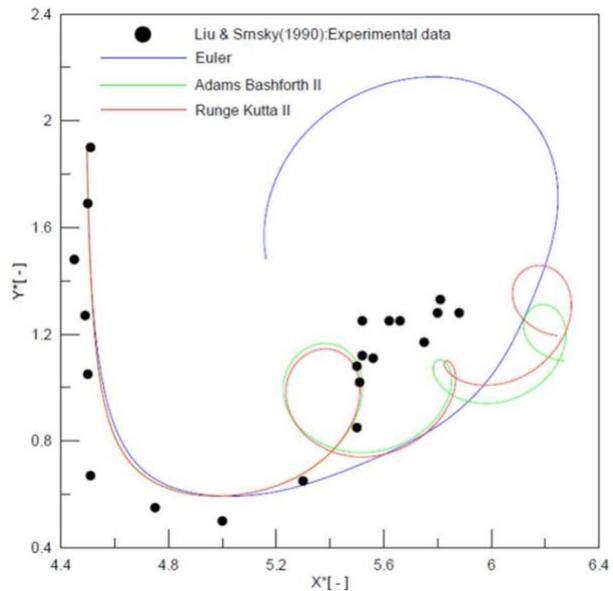


Figura 4 - Comparação dos métodos de advecção [1]

Não apenas isso, mas os dados recolhidos numericamente das partículas de temperatura e dos vórtices também se aproximaram dos dados práticos em que se utilizou um alfa= 0.85 simulando uma esteira de vórtices finita no semiplano.

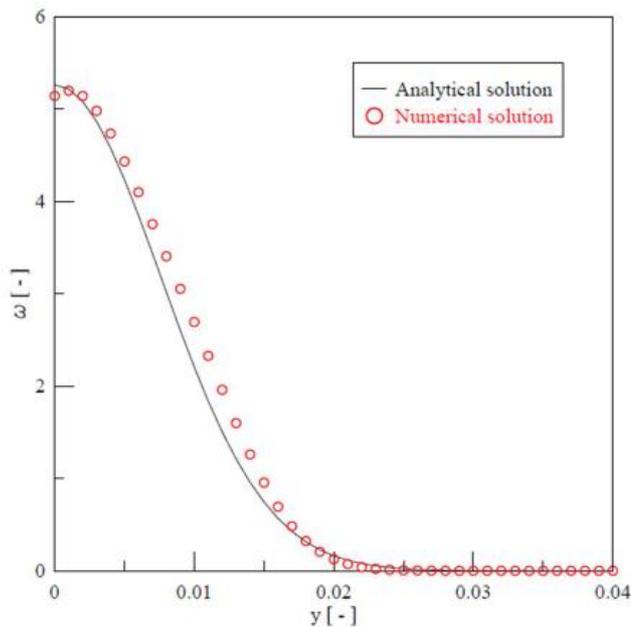


Figura 5 - Solução analítica da difusão de vórtices versus solução numérica

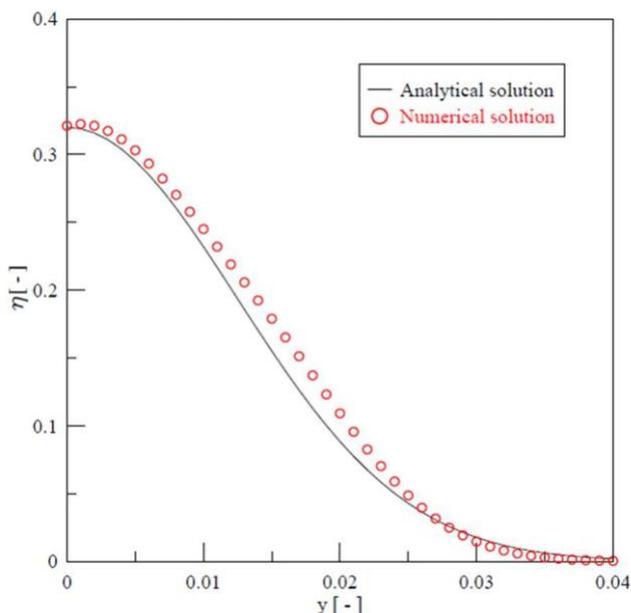


Figura 5 - Solução analítica da difusão de vórtices versus solução numérica

### Conclusões

Em síntese, o projeto atingiu resultados expressivos no estudo do MCRNM, com ênfase no fator de refinamento (alfa). As simulações realizadas permitiram identificar um alfa de 0.7 como o ideal para equilibrar processamento e precisão, especialmente em iterações próximas a 500. Também foi demonstrado que, com um alfa de 0.85, a simulação de vórtices em um semiplano apresentou excelente compatibilidade com

dados práticos, validando a eficácia do método numérico aplicado.

A comparação dos métodos de advecção, incluindo o uso do método de Runge-Kutta, foi confirmada com sucesso, alinhando-se com as conclusões apresentadas no ENCIT 2024 [1]. Os resultados numéricos obtidos corresponderam bem às soluções analíticas, reforçando a precisão das simulações. O tempo de processamento também foi compatível com as exigências computacionais do laboratório, assegurando uma operação eficiente e precisa.

Por fim, o projeto alcançou seus objetivos ao oferecer um estudo minucioso dos parâmetros de refinamento e demonstrar a aplicação prática e teórica dos métodos numéricos, contribuindo para o avanço da modelagem de vórtices e advecção.

### Agradecimentos

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todos que contribuíram para a realização deste trabalho. Agradeço primeiramente à minha família, pelo apoio incondicional em todas as etapas desta jornada. Ao professor Luiz Antônio de Alcântara, que me proporcionou a oportunidade de colaborar neste estudo, e cujas orientações foram fundamentais para o desenvolvimento deste projeto.

Agradeço também à Universidade Federal de Itajubá (Unifei) por oferecer a infraestrutura e os recursos necessários para a condução deste trabalho. Por fim, estendo meus agradecimentos ao CNPq, pelo apoio financeiro concedido, que foi essencial para a realização desta pesquisa.

### Referências

Fonte: CHIARADIA, T. R.; CARVALHO, G. F. M. de; ZARINELLO JÚNIOR, J. de S.; MACHADO, R. A. da S.; PEREIRA, L. A. A. 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. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA. Anais do [35. Encontro Nacional de Engenharia]. Belo Horizonte: ABCM, 2024. p. [1-8]. [1]

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.

BIMBATO, A.M.; ALC NTARA PEREIRA, L.A.; HIRATA, M.H., (2018), "Development of a new Lagrangian vortex method for evaluating effects of surfaces roughness." European Journal of Mechanics B-Fluids, v. 74, p. 291-301

WHITE, F.M., (2002), "Mecânica dos Fluidos", McGraw-Hill, 4ª Ed., 570p.

MÉTAIS, O., LESIEUR, M. (1992), "Spectral large-eddy simulation of isotropic and stably stratified turbulence", Journal of Fluid Mechanics, v. 239, pp. 157-194.

ALC NTARA PEREIRA, L.A., (2018), "Notas de Aula da Disciplina de Métodos de

Partículas Lagrangianas Aplicados à Problemas de Escoamentos Multicomponentes Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, IEM/UNIFEI

CHORIN, A.J., (1973), "Numerical Study of Slightly Viscous Flow". Journal of Fluid Mechanics, Vol. 57, pp.785-796.

ROSSI, L. F., (1996), "Resurrecting Core Spreading Vortex Methods: A New Scheme that is both Deterministic and Convergent". SIAM J. Sci. Comput., 17:370-397.