

APLICAÇÃO DE METODOLOGIA DE ALTA ORDEM PARA A SOLUÇÃO DE PROBLEMA SIMPLIFICADO DE ENERGIA EÓLICA

Ismar Mascarenhas de Carvalho Filho, ismar@discente.ufg.br¹
Mylena Carvalho Silva, mylena.carvalho@discente.ufg.br¹
Andreia Aoyagui Nascimento, aanascimento@ufg.br¹²

¹Laboratório de Engenharia Térmica e de Fluidos (LATEF), Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Universidade Federal de Goiás (UFG), Av. Esperança, s/n, Prédio B5, Goiânia, Goiás 74690-900, Brasil

²Centro de Excelência em Hidrogênio e Tecnologias Energéticas Sustentáveis (CEHTES), Parque Tecnológico Samambaia, Rodovia R2, n. 3.061, Campus Samambaia, CEP: 74690-900, Goiânia, Goiás, Brasil

Resumo. O estudo do escoamento de fluido ao redor de diversas superfícies é crucial em diversas aplicações da engenharia mecânica, especialmente em geometrias cilíndricas de seção circular, comuns em estruturas como pontes, turbinas eólicas, sistemas de refrigeração e torres de energia. Neste trabalho, resolvemos as equações bidimensionais de conservação da massa e Navier-Stokes, nas variáveis x e y , desconsiderando o efeito gravitacional, aplicando o método pseudo-espectral de Fourier acoplado ao método da fronteira imersa. Definimos um domínio com duas fronteiras cilíndricas de diâmetro igual 1 em um domínio retangular e $Re = 100$. Os resultados obtidos são promissores, aproximando-se das revisões bibliográficas existentes.

Palavras chave: Método Pseudoespectral de Fourier, Método da Fronteira Imersa, Escoamento Sobre Cilindros Alinhados

Abstract. The study of fluid flow around various surfaces is crucial in several applications of mechanical engineering, especially in cylindrical geometries of circular section, common in structures such as bridges, wind turbines, cooling systems, and power towers. In this work, we solve the two-dimensional mass conservation and Navier-Stokes equations in the x and y variables, ignoring gravitational effects, applying the Fourier pseudo-spectral method coupled with the immersed boundary method. We define a domain with two cylindrical boundaries of diameter equal to 1 at a rectangular domain and a $Re = 100$. The obtained results are promising, approaching existing literature reviews.

Keywords: Fourier Pseudo-Spectral Method, Immersed Boundary Method, Flow over Aligned Cylinders

1. INTRODUÇÃO

O estudo do escoamento de fluidos ao redor de diferentes geometrias, especialmente cilíndricas de seção circular, é crucial para diversas aplicações nas engenharias, como pontes, turbinas eólicas, sistemas de refrigeração e fios de energia. A Dinâmica dos Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics - CFD) desempenha um papel essencial no desenvolvimento desses projetos, permitindo simular e analisar o comportamento de fluidos em várias condições, incluindo padrões de escoamento, turbulência, transferência de calor e coeficiente de arrasto, entre outras características importantes. Diferentes métodos computacionais, como volumes finitos, diferenças finitas, elementos finitos e métodos espectrais, são utilizados para resolver numericamente as equações que descrevem o comportamento dos fluidos, cada um com suas vantagens e limitações específicas, dependendo do problema e das necessidades do projeto.

Existem vários métodos computacionais para realizar a solução numérica das equações que descrevem o comportamento dos fluidos. Entre essas metodologias, destacam-se o método de volumes finitos, o método diferenças finitas, métodos de elementos finitos, métodos espectrais e outros. Cada método tem suas próprias vantagens e limitações, e a escolha depende do tipo de problema a ser resolvido e das necessidades específicas do projeto.

A partir de uma investigação numérica, Mloy and Wang (2023) estudou os efeitos do espaçamento no desprendimento de vórtices em dois cilindros em arranjo alinhado e com baixo número de Reynolds. Testes preliminares com fluxos ao redor de um e dois cilindros validaram a precisão do solucionador utilizado ao comparar resultados de desprendimento de vórtices e forças hidrodinâmicas com dados da literatura. Os resultados indicam que o espaçamento entre os cilindros pode ser estrategicamente ajustado para suprimir completamente o desprendimento de vórtices em certas configurações, enquanto em outras configurações pode reduzir parcialmente ou não afetar significativamente esse fenômeno

O Trabalho de Tu *et al.* (2015) utilizou de dois cilindro de seção circular alinhados para validação de seu método, utilizando baixo Reynolds para investigar as vibrações induzidas pelo fluxo (VIV) em dois cilindros circulares montados elasticamente em arranjo alinhado, submetidos a um escoamento cisalhante planar em $Re=160$.

Outro estudo similar para cilindros alinhados é o de Narváez *et al.* (2019). Este estudo numérico investigou vibrações induzidas pelo fluxo em dois cilindros dispostos em configuração tandem sob um fluxo uniforme de baixo número de Reynolds. Para isso, foi feita uma validação do código utilizando dois cilindros fixos e dispostos a uma distância $\frac{L_x}{D} = 3.5$.

No presente trabalho pretende-se simular o escoamento em um par de aerogeradores alinhados, para isso foi feita uma aproximação com o trabalho de Tu *et al.* (2015) e Narváez *et al.* (2019). Onde foi simulado um escoamento em dois cilindros alinhados e de seção circular $Re = 100$ e distante $L_x/D = 3.5$, apresentando os dados de coeficiente de arrasto e sustentação. Os resultados obtidos validaram a precisão do método computacional utilizado, mostrando concordância satisfatória com dados existentes na literatura.

2. MÉTODOS

2.1 Problema Físico

Na figura (1) está presente a representação do domínio físico, onde ZB refere-se à zona de buffer, ZF, refere-se a zona de forçagem, na qual uma velocidade u_{max} é imposta num perfil retangular a fim de alinhar o escoamento e ZU a zona útil onde é analisado o escoamento. Todas as dimensões são dadas adimensionais pelos diâmetros dos cilindros, D. A distância entre os cilindros é de L_x , sendo o primeiro cilindro distante de $25D$ de ZF. Devido à característica periódica do método IMERSPEC2D, foi necessário alterar o domínio de forma que se adequasse ao domínio utilizado pelo autor.

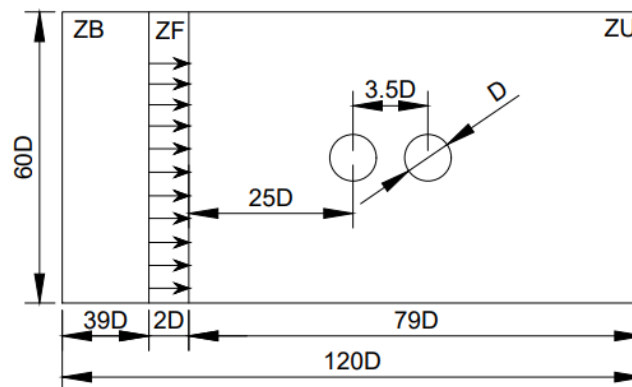


Figura 1. Esquema da representação das características da simulação

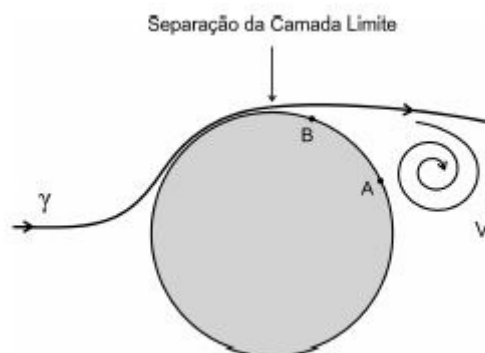


Figura 2. Ilustração da Formação de Vórtices

A figura (2) representa a geração de vórtices de von Kármán. Uma linha de corrente γ contorna as proximidades do cilindro na região da camada limite. A pressão no ponto A é maior que no ponto B (gradiente adverso de pressão), o que causa instabilidade na camada limite, resultando em seu descolamento próximo ao ponto B. Nessas condições, o gradiente de pressão adverso é suficientemente forte para inverter a direção do fluxo na região de separação. Um vórtice de von Kármán V é assim criado e subsequentemente transportado pelo fluxo a jusante do cilindro. Como visto em (Marconi and Pereira, 2021)

2.2 Modelagem Matemática

No presente trabalho foi modelado matematicamente utilizando as equações de conservação da massa, Eq.(3) e as equações de Navier-Stokes Eq.(1) e Eq.(2). As hipóteses simplificadoras utilizadas são: escoamento incompressível, fluido newtoniano, sem efeitos gravitacionais e com propriedades constantes.

$$-\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + f_x = \rho \frac{du}{dt} \quad (1)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + f_y = \rho \frac{dv}{dt} \quad (2)$$

Onde x e y são as direções horizontal e vertical (do domínio), u e v são as velocidades horizontal e vertical respectivamente, μ e ρ são as propriedades do fluido : viscosidade e massa específica, e f_x e f_y são os termos fontes nos quais serão inseridas as velocidades lagrangeanas.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

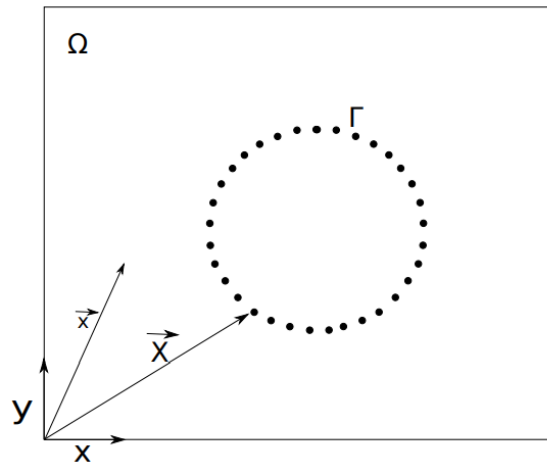


Figura 3. Esquema da malha euleriana e lagrangeana.
Nascimento *et al.* (2013)

$$D_h(\vec{x} - \vec{X}) = \frac{1}{h^2} W_c(r_x) W_c(r_y), \quad (4)$$

$$W_c(r) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{2} |r| - |r|^2 + \frac{1}{2} |r|^3 & \text{se } 0 \leq |r| \leq 1 \\ 1 - \frac{11}{6} |r| + |r|^2 - \frac{1}{6} |r|^3 & \text{se } 1 \leq |r| \leq 2, \\ 0 & \text{se } 2 \leq |r| \end{cases} \quad (5)$$

Onde D_h é a função de distribuição, $r_x = \frac{x-X}{\Delta x}$, $r_y = \frac{y-Y}{\Delta y}$, Δs é a distância dos pontos Lagrangeanos e W_c é a função de peso. Como pode se observar em Nascimento *et al.* (2013) e Lima e Silva AL (2003)

2.3 Modelagem Numérica

No presente trabalho foi usado o método pseudo-espectral de Fourier, que pode ser visto em William L. Briggs (1987), acoplado com o método da fronteira imersa. O método pseudo-espectral empregado neste estudo requer a consideração de dois domínios: físico e espectral. Isso se deve ao fato de que a metodologia IMERSEPEC2D aplica a transformada de Fourier a todos os termos das Equações (1), (2) e (3), levando à obtenção das Equações (6) e (7).

O código utilizado para solução do problema físico é um código *in-house* que foi desenvolvido pelo grupo de pesquisa em engenharia mecânica da Universidade Federal de Goiás.

$$ik_j \hat{u}_l = 0 \quad (6)$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} + \nu k^2 \right] \hat{u}_l(\vec{k}, t) = \varphi_{im} \left[\hat{f}_m(\vec{k}, t) - ik_j \int_{\vec{k}=\vec{r}+\vec{s}} \hat{u}_m(\vec{r}, t) \hat{u}_j(\vec{k} - \vec{r}, t) d\vec{r} \right] \quad (7)$$

Onde k é o número de onda, \hat{u}_l é o vetor de velocidade transformado i é o número complexo $\sqrt{-1}$ e f_i é o termo fonte.

2.4 Parâmetros de Simulação

Os parâmetros para simulação estão explicitados na tabela abaixo:

Re	Número de reynolds	100
ρ	Massa específica	997 kg/m ³
D	Diâmetro do cilindro	0.0016m
t	Tempo de simulação	10s
CFL	Número de Courant-Friederick-Lewis	1
U_{max}	Velocidade máxima	1 m/s

Tabela 1. Parâmetro de simulação

3. RESULTADOS

Neste estudo, buscamos realizar uma análise comparativa qualitativa entre a imagem de vorticidade obtida por (Tu *et al.*, 2015) e os resultados reproduzidos neste trabalho. Nas figuras (4) e (5), está representada a variável vorticidade do escoamento, onde a coloração vermelha representa o valor positivo 1 e a azul o valor negativo -1

Ao observar as imagens (4) e (5) de vorticidade, podemos notar semelhanças notáveis em termos de estruturas e padrões de escoamento. As regiões de alta vorticidade, indicativas de zonas de intensa rotação do fluido, são consistentemente identificadas em ambas as imagens. Além disso, as características globais do escoamento, como vórtices principais, vistos na figura (6) e áreas de recirculação, parecem ser reproduzidas com precisão satisfatória.

Em resumo, a comparação qualitativa das imagens de vorticidade revela uma concordância satisfatória entre os resultados obtidos neste estudo e os dados referenciados. Isso sugere uma reprodução precisa dos padrões de escoamento subjacentes, corroborando a validade de nossa abordagem computacional e a robustez dos resultados apresentados.

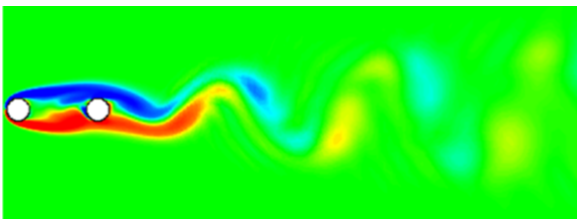


Figura 4. Campo de vorticidade Tu *et al.* (2015)

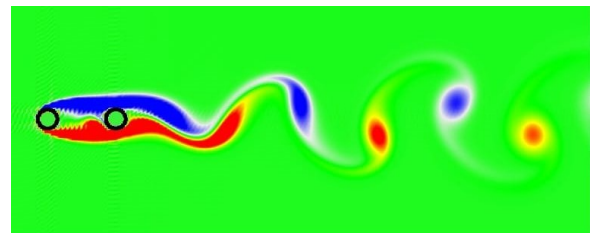


Figura 5. Campo de vorticidade

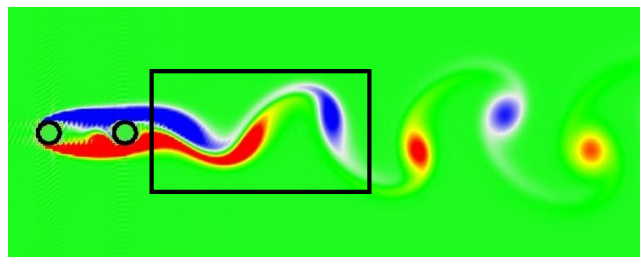


Figura 6. Vórtices Principais

Na figura (7) está apresentado as linhas de corrente do escoamento em estudo, nesta é possível notar regiões de recirculação atrás das geometrias representada pela linha pontilhada, na mesma figura, causada pela região de baixa pressão gerada pelo descolamento da camada limite. A presença desse vórtice pode causar efeitos como mudanças no coeficiente de arrasto e sustentação da geometria que está alinhada. Possui compatibilidade com a vista na figura (8) encontrada em Narváez *et al.* (2019)

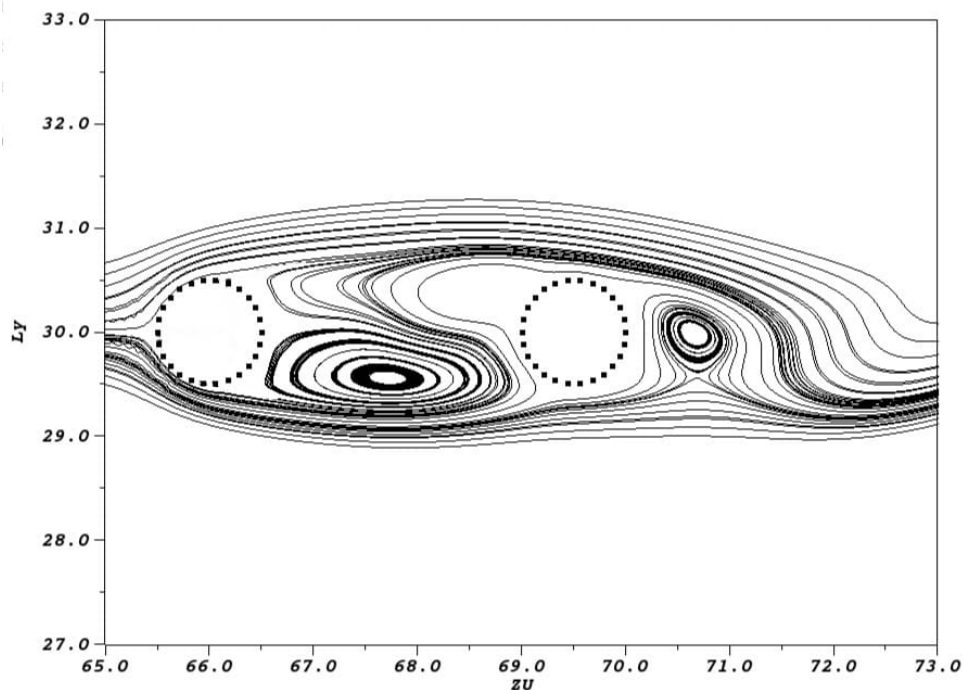


Figura 7. Linhas de Corrente

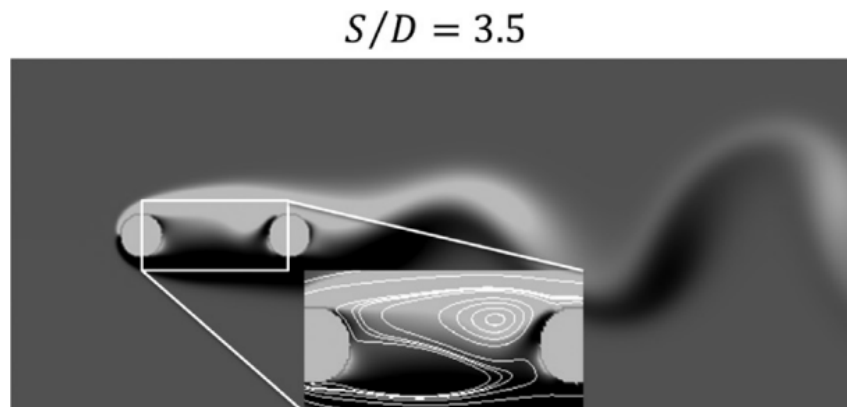


Figura 8. Região de recirculação Narváez *et al.* (2019)

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Eletrobras, ao “Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico” (P&D) da ANEEL, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG), ao Programa de Educação Tutorial (PET), pelo apoio financeiro e infraestrutura destinados ao desenvolvimento da pesquisa.

5. REFERÊNCIAS

- Lima e Silva AL, Silveira-Neto A, D.J., 2003. “Numerical simulation of two dimensional flows over a circular cylinder using the immersed boundary method”. *Comput Phys*.
- Marconi, L. and Pereira, R., 2021. “The statistical physics of turbulence”. *Revista Brasileira de Ensino de Física*.

- Mloy, J.S. and Wang, Y., 2023. "Vortex-induced vibrations of two cylinders in tandem arrangement at low reynolds number". *Journal of Fluid Dynamics*.
- Narváez, G., Schettini, E. and Silvestrini, J., 2019. "Numerical simulation of flow-induced vibration of two cylinders elastically mounted in tandem by immersed moving boundary method". *Applied Mathematical Modelling*.
- Nascimento, A.A., Mariano, F.P. and Padilla, E.L.M., 2013. "Comparison of the convergence rates between fourier pseudospectral and finite volume methods using taylor-green vortex problem." *22nd International Congress of Mechanical Engineering*.
- Tu, J., Zhou, D., Bao, Y., Ma, J., Lu, J. and Han, Z., 2015. "Flow-induced vibrations of two circular cylinders in tandem with shear flow at low reynolds number". *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 59, No. 800, pp. 224–251.
- William L. Briggs, V.E.H., 1987. *The DFT An Owner's Manual For The Discrete Fourier Transform*. Society for Industrial and Applied Mathematics.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.