

Aplicação da Mecânica dos Fluidos e CFD no Estudo de Torres Eólicas

Luiz Pádua¹

Resumo: A avaliação do comportamento aerodinâmico de torres eólicas é essencial para estimar esforços de arrasto, padrões de recirculação, zonas de aceleração do escoamento e possíveis condições operacionais críticas durante a implantação, operação, manutenção e desmontagem dessas estruturas. Neste artigo apresenta-se uma abordagem técnica baseada em mecânica dos fluidos e dinâmica dos fluidos computacional (CFD) para o estudo de torres eólicas, com ênfase na representação numérica do escoamento atmosférico ao redor da torre, na definição das condições de contorno e na interpretação dos principais resultados de engenharia. Discute-se a aplicação do software FLOW-3D HYDRO como ferramenta de modelagem tridimensional, destacando-se sua capacidade de lidar com geometrias complexas, fenômenos transientes e campos de velocidade e pressão com elevado nível de detalhamento. São apresentadas as vantagens do uso da CFD para subsidiar decisões de projeto, segurança operacional e planejamento de intervenções, além de um capítulo específico de resultados, estruturado para posterior inserção das figuras obtidas em simulação.

Abstract: Evaluating the aerodynamic behavior of wind turbine towers is essential to estimate drag forces, recirculation patterns, local flow acceleration and possible critical operating conditions during installation, operation, maintenance and dismantling. This paper presents a technical approach based on fluid mechanics and computational fluid dynamics (CFD) for the study of wind turbine towers, emphasizing numerical representation of atmospheric flow around the structure, boundary-condition definition and interpretation of the main engineering results. The application of FLOW-3D HYDRO as a three-dimensional modeling tool is discussed, highlighting its ability to handle complex geometries, transient phenomena and detailed velocity and pressure fields. The advantages of CFD for supporting design decisions, operational safety and intervention planning are also addressed, and a dedicated results chapter is left prepared for the later inclusion of simulation figures.

Palavras-Chave mecânica dos fluidos; CFD; torres eólicas; FLOW-3D HYDRO; aerodinâmica

Keywords: fluid mechanics; CFD; wind turbine towers; FLOW-3D HYDRO; aerodynamics

INTRODUÇÃO

O aproveitamento eólico depende não apenas da disponibilidade de vento, mas também do adequado entendimento da interação entre o escoamento atmosférico e os componentes estruturais do sistema. Entre esses componentes, a torre possui papel decisivo por sustentar o aerogerador, transmitir esforços à fundação e interferir diretamente no padrão de escoamento incidente (BURTON et al., 2011; SØRENSEN, 2011).

¹) GeoFlow Consult (luiz.padua@geoflowconsult.com)

Sob o ponto de vista da mecânica dos fluidos, o escoamento ao redor de uma torre eólica envolve gradientes de pressão, separação da camada limite, formação de esteiras, vórtices, flutuações turbulentas e alteração local das velocidades. Tais fenômenos influenciam os carregamentos atuantes na estrutura e podem modificar o comportamento do fluxo nas regiões adjacentes (SØRENSEN, 2011; POPE, 2000).

Em situações práticas, a análise torna-se ainda mais importante quando se deseja avaliar cenários de vento extremo, mudanças geométricas, presença de topografia complexa, interferência entre estruturas vizinhas, atividades de içamento, desmontagem ou queda controlada de componentes. Nesses casos, abordagens simplificadas podem não capturar adequadamente os efeitos tridimensionais e transientes do problema (BURTON et al., 2011; CHUNG, 2010).

A dinâmica dos fluidos computacional permite resolver numericamente as equações governantes do movimento do fluido e obter campos espaciais de velocidade, pressão, turbulência e forças resultantes. Com isso, torna-se possível investigar o comportamento do escoamento de forma mais detalhada do que por correlações empíricas isoladas (ANDERSON, 1995; VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Neste contexto, o presente artigo discute os fundamentos físicos e numéricos aplicados ao estudo de torres eólicas, apresenta uma estratégia de modelagem em CFD com uso do FLOW-3D HYDRO e destaca as vantagens técnicas desse tipo de simulação para análises de engenharia e tomada de decisão (FLOW SCIENCE, 2026).

MÉTODOS

Do ponto de vista bibliográfico, a modelagem do escoamento em torno de turbinas eólicas decorre diretamente das equações de conservação aplicadas ao ar atmosférico como fluido newtoniano. Em faixas usuais de operação, os números de Mach permanecem suficientemente baixos para que a hipótese de incompressibilidade seja adequada na maior parte das análises de engenharia voltadas à ação do vento sobre torre, nacelle e rotor estacionado. Nessas condições, o problema passa a ser governado pela continuidade e pelas equações de Navier-Stokes, nas quais a aceleração local e convectiva do escoamento se equilibra com gradientes de pressão, tensões viscosas e forças de volume (ANDERSON, 1995; CHUNG, 2010).

Na revisão técnica de estudos aerodinâmicos, é comum empregar a decomposição de Reynolds para separar grandezas médias e flutuantes, escrevendo a velocidade instantânea como a soma entre componente média e componente turbulenta. A aplicação dessa decomposição às equações de movimento conduz a diferentes estratégias de fechamento, dentre as quais se destacam as abordagens RANS e LES (Large Eddy Simulation) (POPE, 2000; MENTER, 1994). No presente estudo, adotou-se o modelo de turbulência LES, mais adequado para representar estruturas turbulentas de grande escala, desprendimento de vórtices, flutuações transientes e a dinâmica da esteira gerada ao redor da turbina. Nessa formulação, as grandes escalas do escoamento são resolvidas diretamente, enquanto apenas as menores escalas, de caráter mais universal, são modeladas por meio de um modelo submalha (POPE, 2000).

Em análises voltadas à avaliação de vento, pressões e cisalhamento sobre torres eólicas, a interpretação física dos resultados costuma ser organizada a partir da pressão dinâmica $q = 0,5\rho U^2$ e

de coeficientes adimensionais de força e momento. A força total sobre a estrutura é obtida pela integração das tensões normais e tangenciais na superfície molhada, de modo que o campo de pressão responde pela maior parcela do arrasto de forma, enquanto o cisalhamento parietal contribui para a parcela friccional. Em regiões de aceleração do escoamento e de mudança abrupta de geometria, a combinação entre altas velocidades, gradientes de pressão e intensa produção de turbulência pode produzir concentrações localizadas de carregamento relevantes para verificações de integridade, fadiga e segurança operacional (BURTON et al., 2011; SØRENSEN, 2011).

No âmbito numérico, a discretização espacial e temporal deve preservar estabilidade e reduzir difusão numérica excessiva, sobretudo quando se deseja identificar recirculações, descolamento da camada limite, gradientes pronunciados de pressão e flutuações turbulentas associadas ao escoamento atmosférico sobre a turbina. Essa exigência torna-se ainda mais relevante em simulações LES, nas quais a resolução adequada das grandes estruturas turbulentas depende diretamente da malha, do passo de tempo e da qualidade da representação das regiões de maior cisalhamento. Em aplicações de engenharia, o objetivo não é apenas obter imagens qualitativas do escoamento, mas construir um modelo reproduzível, capaz de quantificar velocidades, pressões, tensões de cisalhamento e forças resultantes com consistência suficiente para subsidiar decisões de projeto, retrofit ou avaliação de risco (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007; POPE, 2000).

No FLOW-3D HYDRO, essa estratégia pode ser implementada com base no solucionador tridimensional transiente que resolve as equações de Navier-Stokes em malha estruturada, com representação geométrica por frações de área e volume abertas ao escoamento. A técnica FAVOR (Fractional Area/Volume Obstacle Representation) permite aproximar contornos complexos sem a necessidade de malhas totalmente aderentes ao corpo, o que favorece estudos preliminares e análises paramétricas de geometrias extensas. Para a presente aplicação, a modelagem foi conduzida com abordagem LES, visando representar com maior fidelidade os efeitos transientes do vento, os campos de cisalhamento, as pressões aerodinâmicas e a evolução espacial ao redor de uma turbina eólica (FLOW SCIENCE, 2026; HIRT; NICHOLS, 1981).

A formulação resumida das equações governantes pode ser apresentada pela continuidade, $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$, e pela conservação de quantidade de movimento, expressa de forma compacta por:

$$\rho(\partial \mathbf{u} / \partial t + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} \quad (1)$$

em que ρ é a densidade do ar, $\mathbf{u}$ o vetor velocidade, p a pressão, μ a viscosidade dinâmica e $\mathbf{g}$ a aceleração da gravidade (CHUNG, 2010; VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Quando se utiliza abordagem LES, a solução numérica passa a resolver explicitamente as grandes escalas turbulentas do escoamento, enquanto os efeitos das menores escalas são incorporados por meio do modelo submalha adotado. Para o presente tipo de estudo, tais relações são fundamentais para interpretar campos de velocidade, picos de pressão, regiões de separação, distribuição de cisalhamento sobre a torre e flutuações transientes associadas à passagem de estruturas vorticosas (POPE, 2000).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente é apresentado a visão global do domínio, com utilização de malha computacional de 0.25m de lado, totalizando 38 milhões de células.

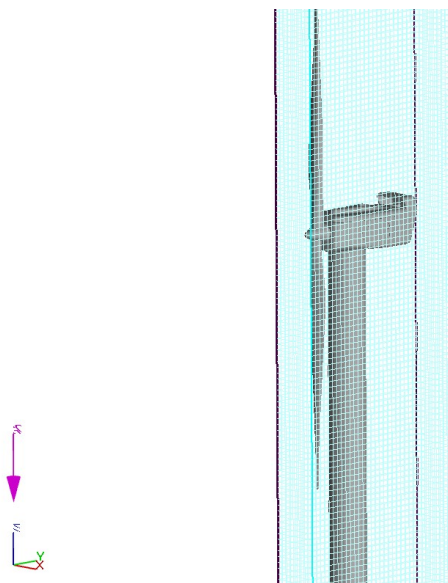


Figura 2 - malha e domínio computacional.

Em seguida, são incluídos campos de velocidade em cortes longitudinais e transversais, evidenciando regiões de aceleração, descolamento do escoamento e formação de esteira. Esses resultados auxiliam na identificação de zonas críticas para esforços localizados e para interferências operacionais em áreas próximas à torre.

São ainda incluídos mapas de pressão estática na superfície da estrutura que mostram a distribuição dos carregamentos aerodinâmicos, enquanto variáveis associadas à turbulência e campos instantâneos obtidos com LES ajudam a compreender a intensidade das flutuações do escoamento.

Foi adotado como direção do vento variável (entre 0 km/h e 80 km/h) o sentido longitudinal (vetor Y) em direção a estrutura da geometria modelada. Como condições de contorno foram adotadas livre saída e liberdade de movimento em todas as demais direções.

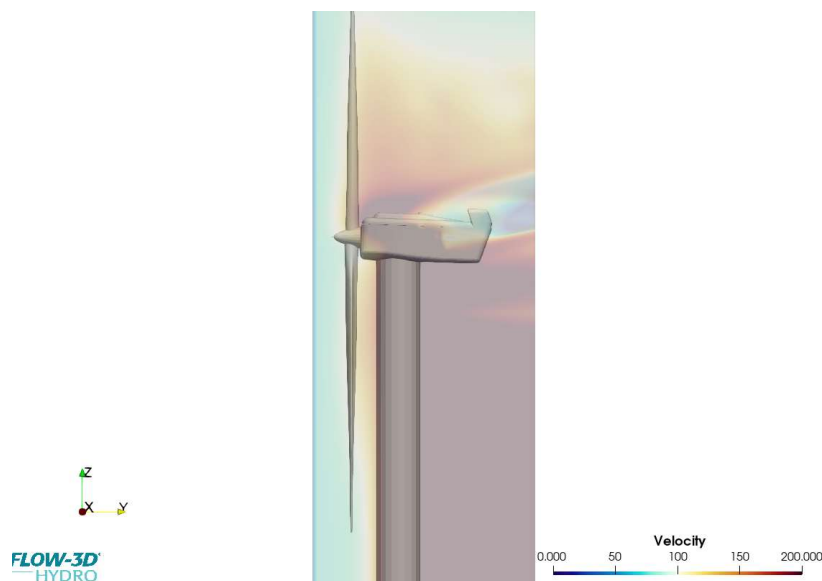


Figura 3 - Campo de velocidades no plano longitudinal.

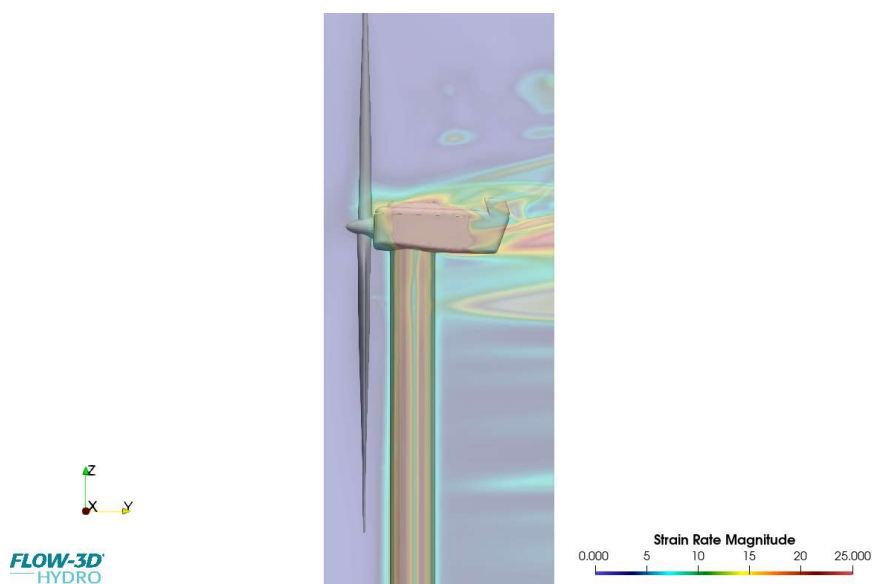


Figura 5 – Strain rate magnitude na superfície da torre.

CONCLUSÃO

A mecânica dos fluidos oferece o arcabouço conceitual necessário para compreender a interação entre o vento e as torres eólicas, enquanto a CFD amplia a capacidade de análise ao resolver numericamente fenômenos tridimensionais, transientes e fortemente dependentes da geometria e das condições de contorno (ANDERSON, 1995; CHUNG, 2010).

Entre as principais vantagens desse tipo de estudo destacam-se a redução de incertezas, a possibilidade de testar cenários sem intervenção física direta, o apoio à mitigação de riscos e o aumento da confiabilidade das avaliações técnicas. Além disso, os resultados podem servir como

base para relatórios, pareceres, estudos comparativos e comunicação com clientes e órgãos de controle (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007; FLOW SCIENCE, 2026).

Ressalta-se, contudo, que a qualidade final da simulação depende da coerência entre problema físico, hipóteses adotadas, parametrização numérica, resolução de malha e análise crítica dos resultados. Portanto, a CFD deve ser entendida como ferramenta de engenharia avançada, cuja efetividade cresce quando associada à experiência técnica e, sempre que possível, a referências experimentais ou dados de campo (ANDERSON, 1995; POPE, 2000).

Conclui-se que a aplicação combinada da mecânica dos fluidos e da modelagem CFD constitui um caminho consistente para o estudo de torres eólicas, especialmente em situações nas quais a compreensão detalhada do escoamento é determinante para segurança, desempenho e tomada de decisão (BURTON et al., 2011; SØRENSEN, 2011).

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, J. D. Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications. New York: McGraw-Hill, 1995.
- BURTON, T.; JENKINS, N.; SHARPE, D.; BOSSANYI, E. Wind Energy Handbook. 2. ed. Chichester: Wiley, 2011.
- FLOW SCIENCE. FLOW-3D HYDRO: The complete 3D CFD modeling solution. Disponível em: www.flow3d.com. Acesso em: 18 abr. 2026.
- HIRT, C. W.; NICHOLS, B. D. Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. Journal of Computational Physics, v. 39, n. 1, p. 201-225, 1981.
- VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. 2. ed. Harlow: Pearson, 2007.
- CHUNG, T. J. Computational Fluid Dynamics. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- MENTER, F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. AIAA Journal, v. 32, n. 8, p. 1598-1605, 1994.
- POPE, S. B. Turbulent Flows. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- SØRENSEN, J. N. Aerodynamic Aspects of Wind Energy Conversion. Annual Review of Fluid Mechanics, v. 43, p. 427-448, 2011.