

+Artigo

Desenvolvimento de um modelo numérico para uma turbina eólica através do método do disco atuador.

Matheus Odilon da Silva Pereira ^[1], Victor Wagner Freire de Azevedo ^[2]

^[1] Bacharel em engenharia mecânica, UFERSA, Mossoró – Rio Grande do Norte. E-mail: matheus.odilon@gmail.com

^[2] Professor Doutor, UFERSA, Mossoró – Rio Grande do Norte. E-mail: victorwfreire@ufersa.edu.br

Data da defesa: 19/04/2024

Resumo: A análise do comportamento do fluido em plantas de geração de energia eólica pode ser realizada por meio da dinâmica dos fluidos computacional. Com base nisso, modelos simplificados podem ser empregados, como o modelo do disco atuador (ADM, em inglês), que é capaz de descrever o comportamento das turbinas em situações reais, conforme validações encontradas na literatura. Dessa maneira, este estudo buscou desenvolver um modelo numérico capaz de prever o comportamento de uma turbina eólica utilizando o modelo do disco no software Ansys Fluent. O modelo demonstrou habilidade em descrever o comportamento do fluido ao atravessar o disco, tanto em termos de gradiente de velocidade quanto de pressão, e o impacto que isso gera na esteira aerodinâmica imediatamente após o disco.

Palavras-chave: Energia Eólica; Ansys; CFD; Disco Atuador; Simulação; Esteira Aerodinâmica;

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), o ano de 2022 encerrou com 904 usinas e uma potência eólica instalada de 25,63 GW, o que equivale a 12,4% de toda a geração injetada no Sistema Integrado Nacional (SIN) ao longo do ano. Esse valor representa um aumento significativo de 18,85% em comparação com a geração eólica de 2021, quando a capacidade instalada era de 21,56 GW.[1]

Diante do cenário de expansão, é crucial aprofundar o entendimento da interação entre a camada limite atmosférica e as turbinas, bem como de suas esteiras. As esteiras turbulentas geradas pelas turbinas posicionadas à montante exercem influência sobre o campo de fluxo das turbinas situadas posteriormente, resultando em déficits de velocidade e na redução da produção de energia. Com um conhecimento mais aprofundado desse fenômeno de fluxo, os desenvolvedores de parques eólicos teriam a capacidade de planejar instalações com um desempenho superior. A simulação desse fluxo por meio da dinâmica de fluidos computacional (CFD) emerge como um método essencial para obter uma compreensão mais aprimorada dos padrões de fluxo em parques eólicos.[2]

O método do disco atuador pode ser empregado como uma maneira de simplificar a complexidade do projeto de uma turbina eólica, uma vez que sua geometria complexa demanda uma capacidade computacional extremamente elevada para resolver todos os elementos da malha. Além disso, já se provou amplamente utilizado.[3]

Com base nisso, o presente trabalho construiu um modelo numérico capaz de prever e aproximar o comportamento de turbinas eólicas enfileiradas, utilizando a teoria do disco atuador para simulação do rotor. O estudo foi conduzido no software Ansys FLUENT. Primeiramente, foram projetados os discos enfileirados para compreender o efeito que cada rotor causa nas turbinas subsequentes. Em seguida, foi gerada a malha para todo o domínio computacional, seguido pela simulação de uma condição de vento uniforme de 13 m/s.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA (CLA)

A Camada Limite Atmosférica (CLA) é uma fina camada na superfície terrestre que sofre influência direta da topografia e responde a fenômenos provocados por ela. As mudanças na topografia, como a rugosidade e a temperatura, têm um impacto direto sobre o comportamento da Camada Limite Atmosférica (CLA). Essa influência resulta na geração de fluxos de calor latente e sensível, os quais interagem com a porção inferior da troposfera, desencadeando processos turbulentos que provocam diversas modificações na dinâmica da CLA. As interações entre os fenômenos térmicos e dinâmicos também desempenham um papel crucial no movimento e na transferência de energia na direção vertical.[4]

A espessura da CLA varia de quilômetros a alguns metros, sendo fortemente influenciada pela variação de temperatura durante o dia. A maior influência da variação de temperatura é a radiação do solo emitida após receber a luz solar. Normalmente, dias mais quentes geram trocas mais turbulentas em massa e energia, bem como na quantidade de movimento, devido às correntes de convecção geradas pelo calor da superfície. As massas de ar quente tendem a subir, ocupando o lugar das massas frias.[4]

O perfil de velocidade na CLA é influenciado por fluxos turbulentos, tensões cisalhantes, rugosidade do terreno e sua topografia. A equação que descreve o perfil de velocidade é dada pela equação 2.1.

$$u(z) = \frac{u^*}{k} \ln \left(\frac{z+z_0}{z_0} \right) \quad (2.1)$$

onde $u(z)$ representa a velocidade do vento em [m/s], u^* a velocidade de fricção, k a constante de Von Kármán ($\approx 0,4$), z a altura em relação ao solo em [m] e z_0 a altura de rugosidade aerodinâmica [m]. A rugosidade aerodinâmica indica o quão áspero é o terreno em termos de interação com o fluxo de ar e é definida como a altura acima da superfície em que a velocidade do escoamento deixa de ser nula.[5]

2.2 DISCO ATUADOR

O modelo do disco atuador é uma metodologia muito utilizada para simulações de projetos eólicos. O disco atua como uma representação simplificada de um rotor de turbinas eólicas, uma vez que a construção de um modelo de turbina eólica é muito complexa e detalhada. Isso permite simplificar a análise e reduzir o esforço computacional necessário para simulações, tornando possível a pré-avaliação de modelagem das esteiras aerodinâmicas de turbinas eólicas, cargas estruturais, estimativa de eficiência energética e fatores de projetos como o espaçamento entre as turbinas e a orientação das pás.

O modelo do disco atua como um sumidouro de quantidade de movimento, representando a redução de energia cinética ao longo do escoamento. As forças tangenciais que atuam sobre a turbina são responsáveis pelo movimento da turbina, o que gera uma mesma força axial como reação no sentido contrário sobre o escoamento, de forma que a energia mecânica é conservada. Isso traz como consequência a redução da velocidade de corrente e elevação da pressão no escoamento. Na Figura 1 pode ser observado que a redução da energia cinética causado pela turbina resulta em uma redução brusca da pressão logo após o escoamento passar pela turbina.[6]

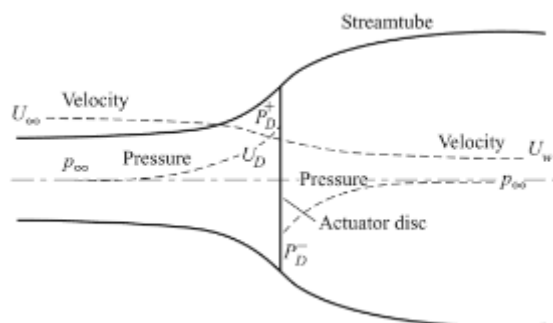


Figura 1: Escoamento ao longo de uma turbina segundo teoria de conservação do momentum

O disco atuador modela as pás da turbina como um disco inserido no campo de fluxo, ocupando a região varrida pelas pás. Esse procedimento envolve a subdivisão da área varrida pelo rotor em vários elementos. Mais adiante, na Figura 2, é apresentado o esquema de um disco atuador, onde cada ponto de atuador representa um elemento no disco. A força em cada elemento é ajustada por um fator de solidez,

$$\sigma = \frac{N \cdot Ab}{Ar} \quad (2.2)$$

onde N é o número de pás, Ab é a área de uma seção individual, e Ar é a área total varrida pelas pás. As forças de sustentação e arrasto em cada elemento do disco do atuador são determinadas por

$$L = \frac{1}{2} CL(\alpha) \rho V^2 cw \quad (2.3)$$

$$D = \frac{1}{2} CD(\alpha) \rho V^2 cw \quad (2.4)$$

onde α é o ângulo de ataque, $CL(\alpha)$ é o coeficiente de sustentação, $CD(\alpha)$ é o coeficiente de arrasto, ρ é a densidade, V é a magnitude de velocidade, c é o raio e w a largura da secção.

3. DESENVOLVIMENTO

O foco da análise é desenvolver um modelo numérico por meio do disco atuador para quantificar o efeito esteira no campo de velocidades de cada turbina eólica. Nesta seção, serão apresentadas as fases percorridas durante o desenvolvimento do modelo utilizando dinâmica dos fluidos computacional (CFD), especificamente o software Ansys FLUENT, abrangendo a confecção do domínio, a geração da malha, a modelagem do problema e a obtenção do perfil de comportamento do fluido.

3.1 EQUAÇÕES GOVERNANTES

As equações de Navier-Stokes são um conjunto de equações diferenciais parciais que descrevem o movimento do fluido. O software Ansys FLUENT resolve de forma discreta as equações de conservação da massa e da quantidade de movimento (ver Eqs. 3.1 e 3.2).

$$\nabla \cdot \tilde{u} = 0 \quad (3.1)$$

$$\rho \frac{\partial \tilde{V}}{\partial t} = \rho \tilde{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \tilde{V} \quad (3.2)$$

Essas equações descrevem como a massa é conservada e o equilíbrio da quantidade de movimento é mantido em um campo de fluido. Em particular, o termo $\frac{\partial \tilde{V}}{\partial t}$ representa a convolução temporal da massa por unidade de volume em relação à aceleração. Além disso, $\rho \tilde{g}$ refere-se à força gravitacional por unidade de volume ou à influência do campo gravitacional. A contribuição da pressão é representada por ∇p , que denota a força de pressão por unidade de volume ou a força de superfície. Por fim, $\mu \nabla^2 \tilde{V}$ representa a força viscosa por unidade de volume.

Considerando ρ como a densidade do fluido, $\tilde{V}$ como a velocidade, g como a aceleração devido à gravidade, ∇p como o gradiente de pressão, μ como a viscosidade dinâmica e $\nabla^2 \tilde{V}$ como o laplaciano da velocidade, as Eqs. 3.1 e 3.2 descrevem os processos de conservação da massa e da quantidade de movimento, respectivamente.

A lógica por trás da simulação no FLUENT é a utilização do método de volumes finitos, o qual fragmenta a região de interesse em sub-regiões menores denominadas volumes de controle (ref. MALISKA). As equações de Navier-Stokes são então discretizadas e resolvidas iterativamente para cada volume de controle, utilizando como referência a interface dos volumes adjacentes. Dessa forma, torna-se viável obter uma representação do comportamento do fluxo em cada volume de controle, mantendo o aspecto conservativo das equações governantes.

3.2 MODELO DO DISCO, CONDIÇÃO DE CONTORNO E MALHA

Este estudo tem como objetivo formular um modelo numérico para um disco atuador. O modelo inclui um disco circular, conforme representado na Figura 2, com dimensões de 120 metros de diâmetro, 4 metros de espessura e uma torre circular de 90 metros de altura. A disposição dos discos foi estabelecida com uma distância de 300 metros entre eles. Uma velocidade de escoamento de 13 metros por segundo na direção e sentido positivo do eixo Z foi considerada para a análise, considerando que seja uma região de ventos fortes. [8]

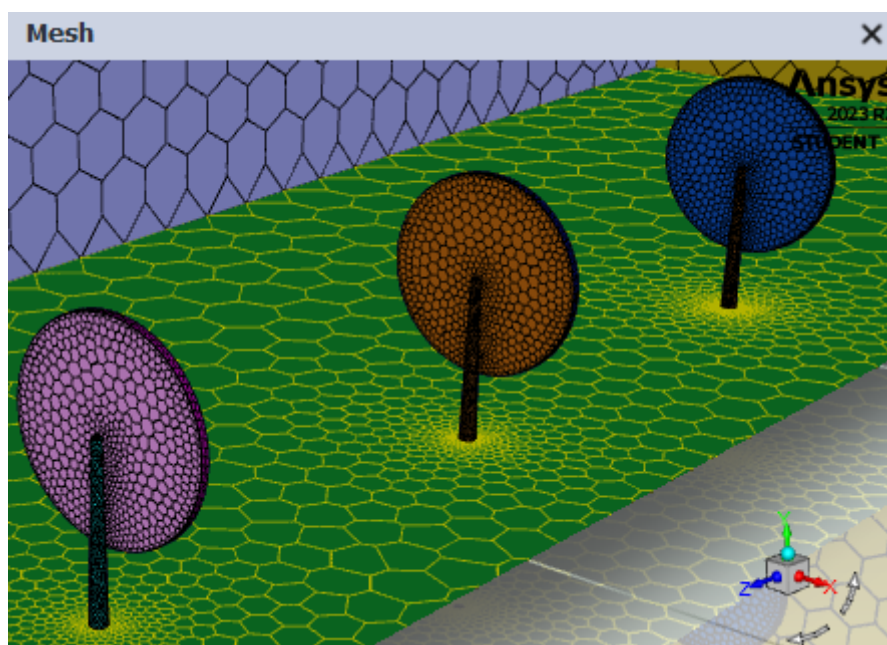


Figura 2: Malha dos Discos Atuadores

A malha computacional representada na Figura 2, contendo aproximadamente 110 mil volumes tetraédricos com 336 mil nódulos, permite visualizar as regiões de refino da malha, próximo a base e na região do disco, que são as duas regiões de principal interesse em relação ao comportamento do fluido em sua magnitude de velocidade e pressão.

O domínio computacional representado na Figura 3, que também representa a condição de contorno, possui 1840 metros de comprimento, 355 metros de altura com 600 metros de largura, a região de sua geometria foi aplicada a condição para não gerar vórtices. Para a condição de entrada do fluido foi especificada uma velocidade normal de 13 m/s e foi imposta uma condição de pressão nula na saída. Nas paredes laterais e superiores foi aplicado a condição de escoamento livre, ou seja, paredes sem atrito, para simulação do ambiente atmosférico. Na face inferior, que é a região do chão foi aplicado a condição de não escorregamento (no slip), ou seja, próximo ao piso a velocidade do fluido é zero. Os discos atuam como uma fronteira móvel, retirando momentum do fluido que transpassa os discos atuadores.

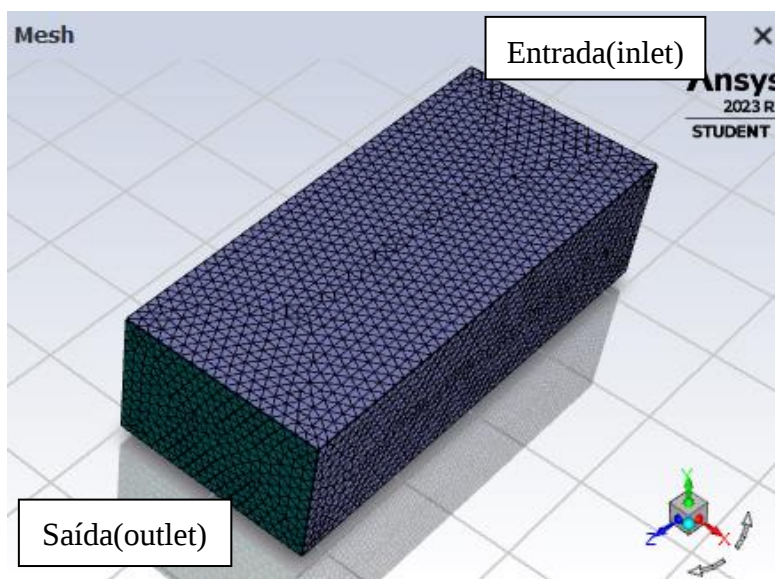


Figura 3: Domínio Computacional

4. RESULTADOS

Na Figura 4, através de uma linha ao longo do eixo Z é possível observar o perfil da velocidade do escoamento ao longo dos três discos, evidenciando uma redução de 15,39% em relação à velocidade inicial de 13 m/s. Os picos com velocidade igual a zero representam as regiões da linha em que ficam imediatamente na posterior da torre. Abaixo, na Figura 5, o gradiente de velocidade é visualizado com maior clareza, apresentando uma diminuição gradual conforme indicado pelas variações de cores.

No que tange ao segundo disco, registrou-se uma diminuição de 22,73% na velocidade em comparação com a medida após a passagem pelo primeiro disco. Para o terceiro disco, a redução de velocidade atingiu 23,53% em relação à velocidade imediatamente posterior à passagem pelo segundo disco. Após a interação com o terceiro disco, a redução de velocidade alcançou aproximadamente 50% em relação à velocidade inicial. Entretanto, logo em seguida, o escoamento experimentou um aumento gradual de velocidade.

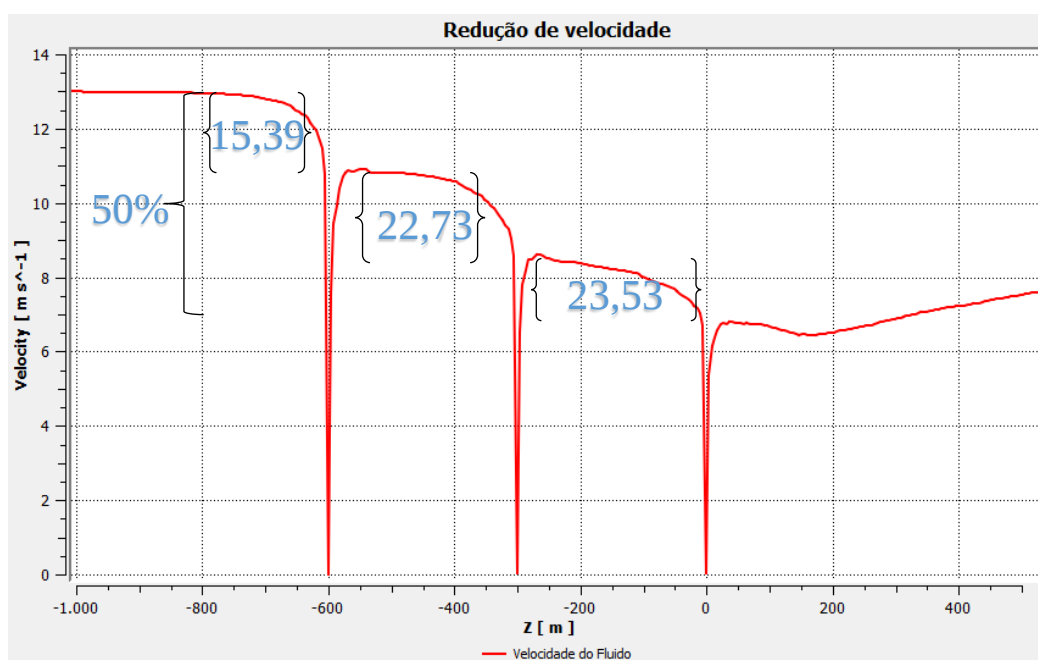


Figura 4: Perfil de Velocidade do Escoamento.

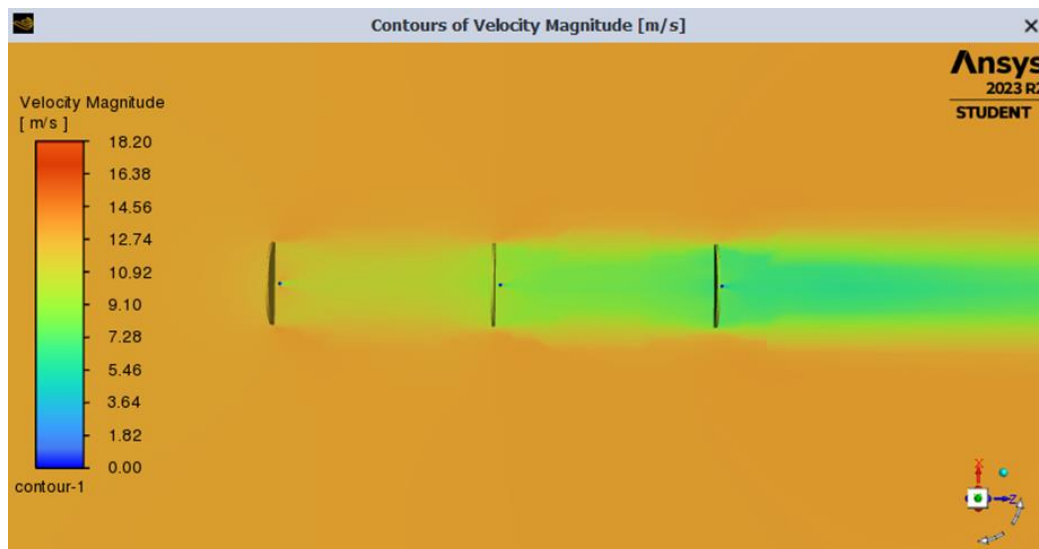


Figura 5: Gradiente de Velocidade do Escoamento.

A Figura 6 evidenciou um comportamento em conformidade com a dinâmica do escoamento do fluido nas proximidades de um gerador eólico. A conservação da energia mecânica resulta na redução simultânea da velocidade axial da corrente livre e no aumento da pressão estática. Posteriormente à diminuição da energia cinética do escoamento, provocada pela interação com o disco, observa-se uma queda abrupta da pressão logo após o disco. Contudo, imediatamente após essa queda, a pressão do ar na esteira tende a aumentar, buscando o equilíbrio com a pressão de corrente livre.

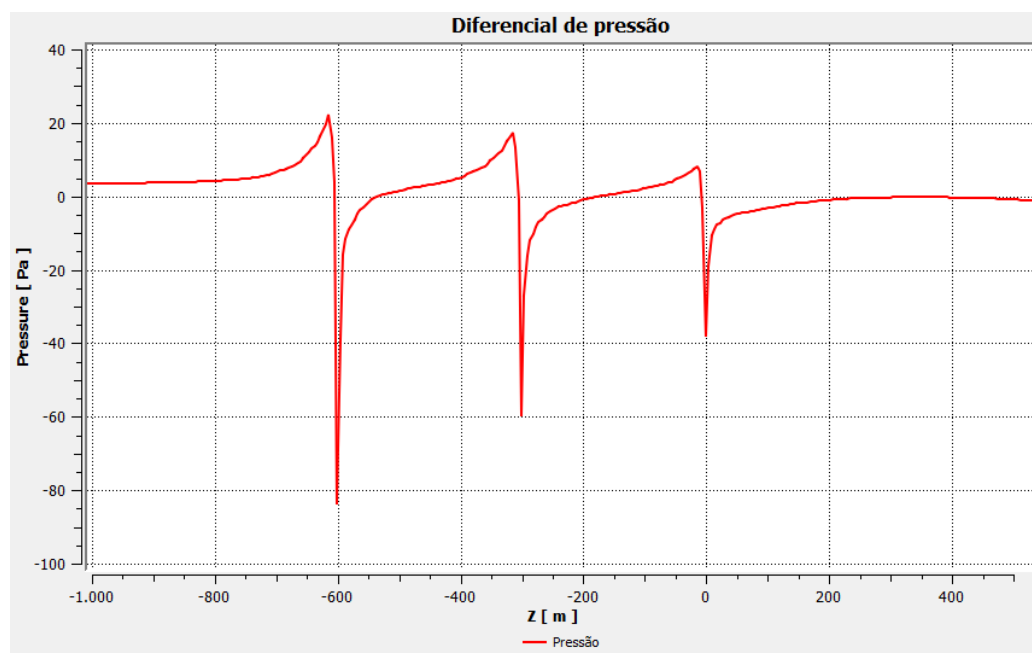


Figura 6: Diferencial de Pressão.

Nas Figuras 7 e 8 podemos observar o comportamento da velocidade e da pressão através do gradiente de cores, respectivamente. Conforme a Figura 7, podemos observar que no decorrer do escoamento, o efeito esteira é evidenciado pelas tonalidades de verde e azul claro ao longo da trajetória de escoamento, o que vai ao encontro com o gráfico de velocidade da Figura 5.

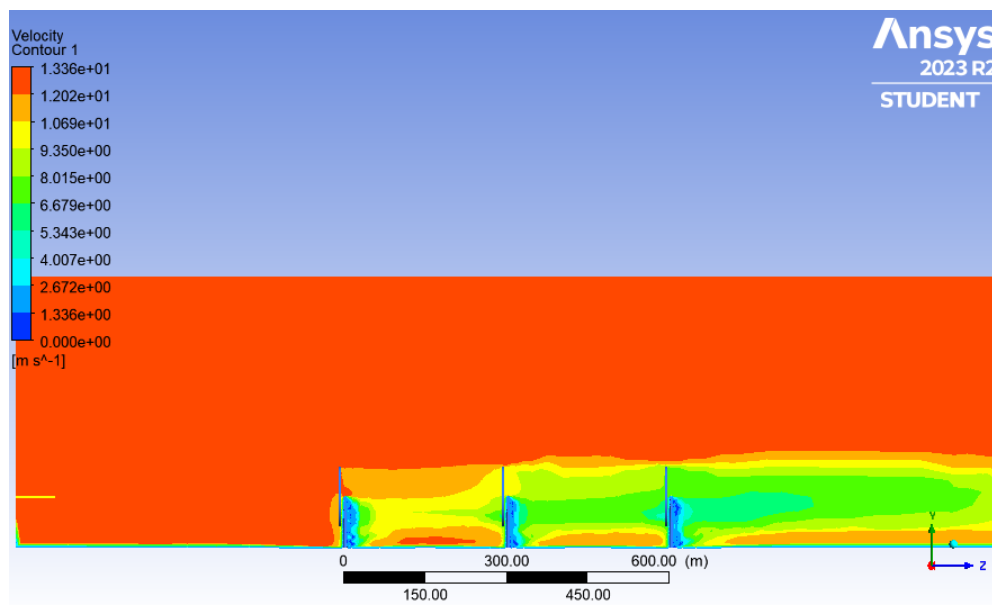


Figura 7: Gradiente de Velocidade.

O mesmo acontece na Figura 8, onde a área em amarelo claro indica um incremento gradual da pressão. Imediatamente após a passagem do escoamento pelo disco, constata-se uma súbita diminuição da pressão, claramente identificada pela região em azul claro, seguida pelo estabelecimento de equilíbrio da pressão com a região de corrente livre.

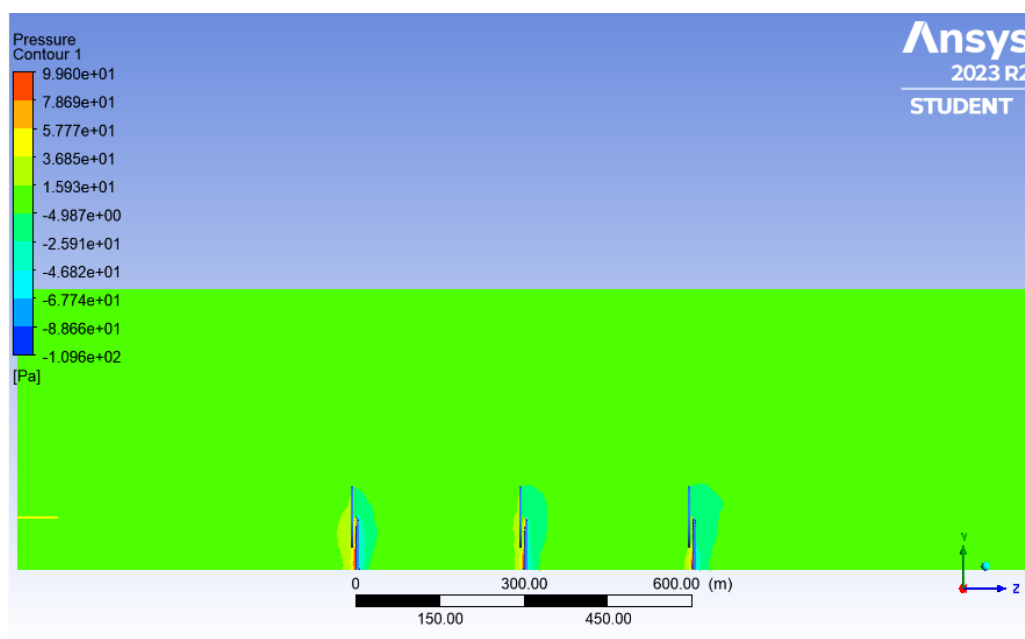


Figura 8: Gradiente de Pressão.

5. CONCLUSÃO

A partir da análise dos resultados obtidos neste estudo, conclui-se que o desenvolvimento de um modelo numérico utilizando o método do disco atuador para simular o comportamento de turbinas eólicas demonstrou ser uma abordagem eficaz. Os resultados obtidos foram consistentes com as expectativas teóricas e literárias, o que valida a utilização desse modelo para prever o impacto das turbinas eólicas no fluxo de ar circundante.

A redução gradual da velocidade do escoamento e as variações na pressão observadas ao longo dos discos atuadores estão em linha com os padrões esperados na esteira aerodinâmica das turbinas eólicas. Essas

informações são essenciais para o planejamento e a otimização de parques eólicos, permitindo uma melhor compreensão da interação entre as turbinas eólicas e o ambiente atmosférico.

Além disso, a aplicação do modelo numérico desenvolvido neste estudo demonstrou ser uma alternativa viável para simplificar a complexidade do projeto de turbinas eólicas, reduzindo o esforço computacional necessário para as simulações de turbinas completas, uma vez que o tempo para execução do modelo foi cerca de 30 minutos.

Portanto, os resultados deste estudo oferecem *insights* relevantes para a compreensão da dinâmica dos fluidos em parques eólicos, com possíveis benefícios práticos para a indústria de energia renovável. O modelo numérico desenvolvido pode ser uma ferramenta útil para os desenvolvedores de parques eólicos ao considerar decisões relacionadas ao projeto, localização e operação

7. REFERÊNCIAS

- [1] BOLETIM anual 2022. ABEEólica ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA E NOVAS TECNOLOGIAS, [S. l.], p. 1-19, 15 fev. 2023.
- [2] TOSSAS, LA Martinez; LEONARDI, S. Wind turbine modelling for computational fluid dynamics. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Technical Report No. NREL/SR-5000-55054, 2013.
- [3] CALAF, Marc; MENEVEAU, Charles; MEYERS, Johan. Large eddy simulation study of fully developed wind-turbine array boundary layers. *Physics of fluids*, v. 22, n. 1, 2010.
- [4] MOREIRA, Gilberto Augusto Amado. Desenvolvimento de modelos de camada limite atmosférica aplicados a micro-regiões. 2012.
- [5] PEZZI, Luiz Fernando. Avaliação do potencial eólico considerando o efeito da esteira aerodinâmica de turbinas através do modelo do disco atuador. 2017.
- [6] BURTON, Tony et al. *Wind energy handbook*. John Wiley & Sons, 2011.
- [7] MALISKA, Clovis Raimundo. *Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional*. Grupo Gen-LTC, 2017.
- [8] SANTANA, Lêda Valéria Ramos et al. Análise do comportamento da velocidade do vento na região Nordeste do Brasil utilizando dados da ERA-40. 2014.