

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ENGENHARIA DE ENERGIA

**MODELAGEM DE CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA TERMICAMENTE
ESTRATIFICADA VIA ANSYS FLUENT® PARA APLICAÇÃO EM ANÁLISE DO POTENCIAL
EÓLICO OFFSHORE**

por

Igor Haas Sehn

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Energia.

Porto Alegre, janeiro de 2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE ENERGIA

**MODELAGEM DE CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA TERMICAMENTE
ESTRATIFICADA VIA ANSYS FLUENT® PARA APLICAÇÃO EM ANÁLISE DO POTENCIAL
EÓLICO OFFSHORE**

por

Igor Haas Sehn

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
BACHAREL EM ENGENHARIA DE ENERGIA.
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Letícia Jenisch Rodrigues
Coordenadora do Curso de Engenharia de Energia

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Adriane Prisco Petry

Banca examinadora:

Prof.^a Dr.^a Adriane Prisco Petry – DEMEC / UFRGS
Prof. Dr. Alexandre Vagtinski de Paula – DEMEC / UFRGS
Prof. Dr. Guilherme Henrique Fiorot – DEMEC / UFRGS

Porto Alegre, 28 de janeiro de 2021.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Inês e Ivo, por todo carinho, amor e dedicação para me proporcionar a melhor formação que eu poderia ter.

Aos meus primos engenheiros, Maurício, Eduardo e Fabrício, pelo entusiasmo com a minha escolha por seguir a formação de engenharia, e a toda minha família, pelo apoio aos meus estudos.

Às amizades construídas ao longo da minha formação, pelo companheirismo e por tornarem muito mais fácil o cotidiano de estudos.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por ter me proporcionado um ensino gratuito e de qualidade.

A todos os meus professores, pelos ensinamentos transmitidos ao longo da minha graduação.

À Prof.^a Dr.^a Adriane Prisco Petry, em especial, pela orientação e pelos conhecimentos compartilhados ao longo deste trabalho e durante a minha bolsa de iniciação científica.

Ao Laboratório de Mecânica dos Flúidos da UFRGS, pela infraestrutura oferecida para realizar as simulações numéricas deste trabalho.

À iniciativa FINO (*Forschungsplattformen in Nord-und Ostsee*), financiada pelo Ministério Federal Alemão de Assuntos Econômicos e Energia (BMW_i) com base em uma decisão do *Bundestag* Alemão, organizada pelo *Projekttraeger Juelich* (PTJ) e coordenada pela Agência Federal Marítima e Hidrográfica Alemã (BSH), por gentilmente disponibilizar os dados necessários para conduzir este estudo.

SEHN, I. H. **Modelagem de Camada Limite Atmosférica termicamente estratificada via ANSYS Fluent® para aplicação em análise do potencial eólico offshore.** 2021. 25. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

RESUMO

Projetos de parques eólicos offshore tem se tornado uma opção cada vez mais viável para o abastecimento da demanda por energia elétrica de forma sustentável. Nesse contexto, o desenvolvimento de sistemas computacionais e metodologias capazes de estimar com maior precisão o potencial de geração dessa fonte de energia se mostra necessário. O aumento da capacidade de processamento computacional tem permitido que modelos mais robustos sejam competitivos economicamente por trazerem resultados mais precisos em tempo aceitável. Este trabalho aprofunda a metodologia de modelagem da Camada Limite Atmosférica (CLA) para aplicação em análise de potencial eólico offshore e compara as características da CLA nas condições instável, estável e neutra a fim de dimensionar a importância de se considerar efeitos térmicos na análise de potencial eólico desses locais. Os resultados das simulações numéricas do problema empregando a formulação RANS com o modelo de turbulência $k-\epsilon$ no software ANSYS Fluent® são comparados com perfis verticais extrapolados pela Teoria de Similaridade de Monin-Obukhov (MOST) a partir de dados públicos provenientes da plataforma FINO-3. Verificou-se que os perfis MOST apresentam boa adequação aos dados medidos em campo no caso de CLA instável e CLA neutra; entretanto, o perfil de temperatura no caso da CLA estável é superestimado em 0,8 °C. O modelo de CFD empregado nas simulações preservou satisfatoriamente os perfis de velocidade e temperatura nas três condições de estabilidade analisadas nas alturas de interesse para a energia eólica. Constatou-se que a não consideração dos efeitos térmicos poderia superestimar a produção de energia elétrica em 53,2% em condições de CLA instável e subestimar essa produção em 75,4% em condições de CLA estável. O trabalho contribuiu para o melhor entendimento dos efeitos térmicos no escoamento da CLA e mostrou a importância de se levar em conta esses efeitos na análise de potencial eólico offshore.

PALAVRAS-CHAVE: Camada Limite Atmosférica, Efeitos Térmicos, Dinâmica dos Fluidos Computacional, Energia Eólica Offshore.

SEHN, I. H. **Thermally stratified Atmospheric Boundary Layer modeling via ANSYS Fluent® for offshore wind resource assessment application.** 2021. 25 Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

ABSTRACT

Offshore wind farm projects have become an increasingly viable option for supplying demand for electricity in a sustainable way. In this context, the development of computational systems and methodologies capable of estimating with greater precision the generation potential of this energy source is necessary. Increased computational processing capacity has allowed more robust models to be economically competitive because they bring more accurate results in acceptable time. This work deepens the Atmospheric Boundary Layer (ABL) modeling methodology for offshore wind resource assessment application and compares the ABL characteristics in unstable, stable, and neutral conditions to dimension the importance of considering thermal effects in the wind resource assessment of these sites. The results of the numerical simulations of the problem using RANS formulation with the $k-\epsilon$ turbulence model in the ANSYS Fluent® software are compared with vertical profiles extrapolated by the Monin-Obukhov Similarity Theory (MOST) from public data from the FINO-3 platform. It was found that the MOST profiles have a good suitability for the field-measured data in the case of unstable ABL and neutral ABL; however, the temperature profile in the case of stable ABL is overestimated at 0,8 °C. The CFD model used in the simulations satisfactorily preserved the velocity and temperature profiles in the three stability conditions analyzed at the heights of interest for wind energy. It was found that the non-consideration of thermal effects could overestimate the production of electricity in 53,2% under unstable ABL conditions and underestimate this production in 75,4% under stable ABL conditions. This work contributed to a better understanding of the thermal effects on an ABL flow and showed the importance of taking these effects into account in the offshore wind resource assessment.

KEYWORDS: Atmospheric Boundary Layer, Thermal Effects, Computational Fluid Dynamics, Offshore Wind Energy.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
2.1	Camada Limite Atmosférica.....	2
2.2	Estabilidade e Estratificação da Camada Limite Atmosférica.....	3
2.3	Níveis de modelagem do vento.....	4
2.4	Equações governantes	5
2.5	O modelo $k-\epsilon$	8
2.6	Constantes do modelo $k-\epsilon$	8
3	METODOLOGIA E MODELAGEM.....	9
3.1	Dados climáticos e oceanográficos do local de estudo	10
3.2	Domínio computacional e qualidade da malha.....	10
3.3	Funções de entrada e condições de contorno.....	11
3.4	Pós-processamento dos resultados	13
4	SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	14
4.1	Identificação de diferentes condições de estabilidade da CLA.....	14
4.2	Obtenção dos perfis médios de entrada.....	15
4.3	Simulação da CLA termicamente estratificada sobre terreno offshore.....	17
4.4	Análise da qualidade de malha	22
5	CONCLUSÃO	23

1 INTRODUÇÃO

Ao redor do mundo, a energia eólica offshore¹ tem se mostrado uma opção cada vez mais viável para geração de energia renovável, impulsionada por políticas energéticas de apoio, em resposta a preocupações ambientais, e por avanços tecnológicos, desenvolvidos por cadeias de suprimentos amadurecidas em locais com uma grande quantidade de projetos implantados (EPE, 2020). O potencial dessa fonte é vasto e pouco explorado, sendo capaz de gerar mais de 18 vezes a demanda global por energia elétrica (IEA, 2019). Apenas no Brasil, o potencial a 100 m de altura dessa fonte de energia seria de aproximadamente 697 GW em locais com profundidade de até 50 m (EPE, 2020). Apesar de ter contribuído com apenas 0,3% do fornecimento global de eletricidade em 2018, o mercado de energia eólica offshore cresceu quase 30% ao ano desde 2010 (IEA, 2019).

No projeto de um parque eólico, a obtenção de informações a respeito do perfil de velocidades do vento é de suma importância para escolher o modelo de turbina mais apropriado para determinado local, bem como para estimar a sua produção de energia elétrica. Essa, por sua vez, é proporcional ao cubo da velocidade do vento incidente na altura na nacela. Neste sentido, incertezas associadas à produção de energia elétrica de um parque eólico são bastante sensíveis ao campo estimado de velocidades do vento, o que torna valioso o desenvolvimento de modelos capazes de prevê-lo com maior exatidão. A ferramenta padrão da indústria para avaliação de recursos eólicos é o WASP (*Wind Atlas Analysis and Application Program*), modelo linear baseado na abordagem de (JACKSON; HUNT, 1975). Embora o modelo tenha sido desenvolvido para atmosfera termicamente neutra sobre terreno uniforme, ele também tem sido usado em outras condições, como em terrenos complexos ou offshore. Porém, a maior precisão demandada pela indústria eólica, juntamente com uma importante redução dos custos computacionais, levou ao desenvolvimento de modelos mais sofisticados baseados em CFD (*Computational Fluid Dynamics*) (RODRIGO et al., 2008), como os modelos de turbulência que resolvem as equações de Navier-Stokes com Média de Reynolds (RANS). Tais modelos permitem a simulação de fenômenos físicos não-lineares presentes em escoamentos da Camada Limite Atmosférica (CLA). Dentre estes modelos de turbulência, o $k-\epsilon$ tem sido o mais extensivamente utilizado para modelagem do vento (PROBST; CÁRDENAS, 2010).

Para avaliar o potencial de produção de energia elétrica de parques eólicos, a indústria tem contado cada vez mais com modelos de CFD que simulam a CLA termicamente neutra (KOBBLITZ, 2013). Entretanto, em condições offshore, os efeitos de estratificação térmica são predominantes (RODRIGO et al., 2008) e sua influência no perfil de velocidades do vento deve ser mais bem compreendida. Dessa forma, modelos capazes de estimar o potencial eólico de terrenos offshore com maior precisão podem ser desenvolvidos, contribuindo assim para a redução de incertezas em projetos nesses locais e, consequentemente, atraindo mais investimentos em prol do crescimento dessa fonte de energia renovável no mundo.

O objetivo geral deste trabalho consiste em realizar um estudo comparativo entre diferentes níveis de estabilidade da CLA e dimensionar a importância de se levar em conta esses aspectos na metodologia de análise de potencial eólico offshore. Além disso, este trabalho busca incluir as considerações apontadas na literatura quanto a metodologia de modelagem do vento nesses locais. Os objetivos específicos consistem em identificar diferentes condições de estabilidade da CLA a partir da análise de dados de velocidade e temperatura provenientes de uma plataforma de pesquisa instalada no Mar do Norte, extrapolar os dados de medição em perfis verticais com a Teoria de Similaridade de Monin-Obukhov (MOST) e aplicar a metodologia proposta de modelagem CFD para o escoamento do vento no software comercial ANSYS Fluent®, utilizando os perfis verticais obtidos como funções de entrada do domínio computacional.

O ANSYS Fluent® é um software comercial de última geração escrito em linguagem de programação C e voltado para modelar escoamentos de fluidos, fenômenos de transferência de calor e reações químicas em geometrias complexas (ANSYS INC., 2010). O software apresenta ferramentas para definir a geometria do problema e as características da malha. Em seguida, configurações do problema podem ser especificadas, como o modelo de turbulência e suas constantes, as condições de contorno, os métodos de discretização adotados e a definição dos resíduos. A etapa de pós-processamento dos resultados também pode ser realizada no próprio software.

¹ Offshore é um termo da língua inglesa que significa “afastado da costa” na tradução para o português.

O software comercial é utilizado neste trabalho para simular o modelo de turbulência $k-\epsilon$ com as equações RANS em terrenos offshore sujeitos a três situações distintas de estabilidade da CLA: instável, estável e neutra. Os dados de velocidade do vento e temperatura para cada condição de estabilidade analisada são extrapolados para se obter funções analíticas que descrevem o perfil vertical de velocidade, temperatura, energia cinética turbulenta e sua taxa de dissipação. Esses perfis são comparados com os resultados obtidos com as simulações numéricas para verificar a consistência dos resultados numéricos com os perfis teóricos. Por fim, o método de convergência de malha é aplicado para determinar a dependência da solução em relação ao grau de refinamento da malha empregada no problema.

As seções 2 e 3 deste trabalho apresentam, respectivamente, a fundamentação teórica e a metodologia e modelagem de escoamentos atmosféricos sujeitos a diferentes condições de estabilidade em áreas offshore. A seção 4 descreve as simulações realizadas e analisa os resultados obtidos. Finalmente, na seção 5 as conclusões sobre o trabalho desenvolvido são descritas e sugestões para trabalhos futuros são abordadas.

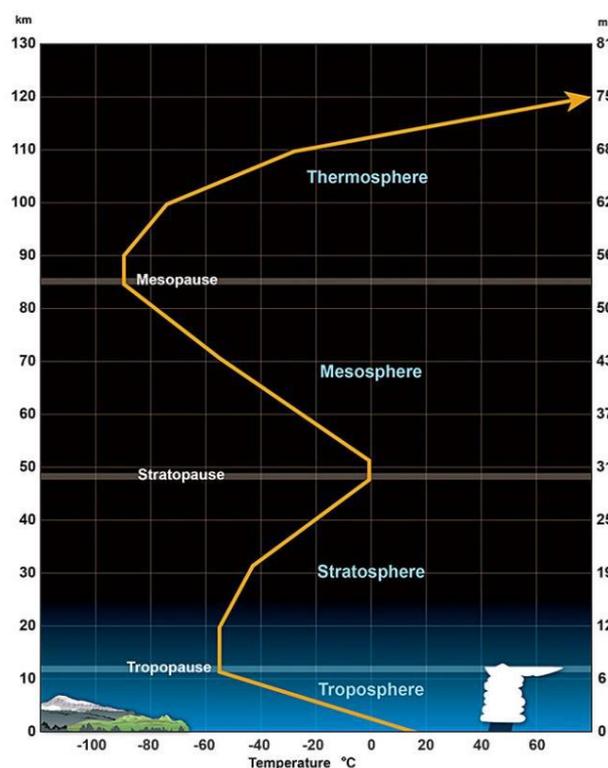
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Essa seção aborda conceitos relevantes para o entendimento e contextualização do presente estudo. Primeiramente, a definição de Camada Limite Atmosférica é apresentada, bem como os conceitos associados à sua estabilidade e estratificação térmica. Em seguida, uma breve introdução aos níveis de modelagem do vento é realizada. As equações governantes do escoamento atmosférico e o modelo de turbulência empregado neste trabalho para o fechamento dessas equações são então descritos. Por fim, os valores considerados para as constantes do modelo adotado são apresentados.

2.1 Camada Limite Atmosférica

A atmosfera terrestre pode ser subdividida em diversas subcamadas. A partir do nível do solo, estas subcamadas são normalmente nomeadas como troposfera, estratosfera, mesosfera e termosfera. A Figura 2.1 ilustra a variação da temperatura absoluta com a altitude para as diferentes camadas da atmosfera.

Figura 2.1 - Variação da temperatura absoluta nas camadas atmosféricas.



Fonte: Adaptado de UCAR, 2015.

Na região mais próxima do solo, dentro da troposfera, a Camada Limite Atmosférica (CLA) é formada (BARRIATTO, 2018). Stull (1988) define a Camada Limite Atmosférica como “a parte da troposfera que é diretamente influenciada pela presença da superfície terrestre, e responde às suas forçantes em uma escala de tempo de cerca de uma hora ou menos”. Os principais efeitos que regem as propriedades da CLA são a intensidade do vento geostrófico, a rugosidade da superfície, o efeito Coriolis devido à rotação da Terra e efeitos térmicos (BURTON et al., 2011).

De acordo com Barriatto (2018), os dois principais mecanismos responsáveis pelas interações entre o vento e a superfície são a transferência de energia mecânica por atrito e a transferência de energia térmica. O atrito do escoamento com a superfície gera tensões cisalhantes que desaceleram o escoamento do vento nas proximidades do solo, ao passo que a presença ou ausência de efeitos térmicos relevantes dentro da CLA mudam de forma significativa as características do escoamento do vento nas altitudes de interesse para o setor eólico.

2.2 Estabilidade e Estratificação da Camada Limite Atmosférica

As interações térmicas entre o escoamento atmosférico e as superfícies adjacentes são cíclicas e periódicas, e na grande maioria dos casos apresentam forte correlação com ciclos diários, visto que o sol aquece diretamente a atmosfera e o solo apenas durante o dia. A variação diária da temperatura nas proximidades do solo não é causada pela radiação solar direta na camada limite atmosférica, já que a maior parte dessa energia é absorvida pela superfície. Portanto, é o aquecimento e resfriamento do solo em função da radiação incidente que provoca mudanças na Camada Limite Atmosférica através da transferência de calor (BARRIATTO, 2018; STULL, 1988).

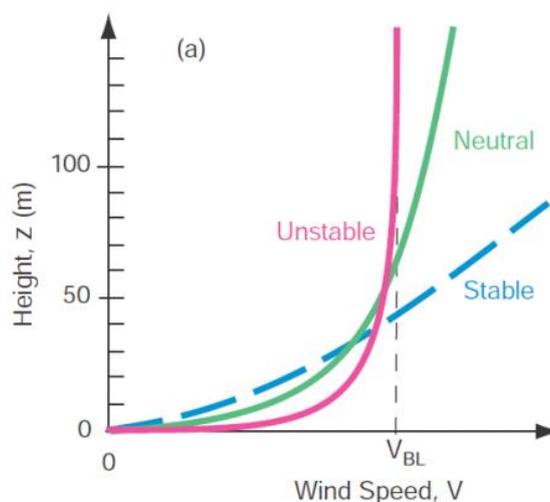
A influência dos efeitos térmicos pode ser classificada em três categorias: estratificação instável, estável e neutra. A estratificação instável ocorre quando o aquecimento da superfície é relevante, fazendo com que haja uma elevação do ar quente perto da superfície. À medida que o ar sobe, ele se expande devido à diminuição de pressão e, portanto, esfria adiabaticamente. Se o resfriamento não for suficiente para levar o ar ao equilíbrio térmico com o ar circundante, ele continuará a subir, dando origem a grandes correntes de convecção. O resultado é uma camada limite espessa com redemoinhos turbulentos de grande escala. Nessa situação, a mistura vertical e a transferência de momento são expressivas, resultando em uma mudança relativamente pequena da velocidade média do vento com a altura (BURTON et al., 2011).

Se o efeito do resfriamento adiabático tornar o ar ascendente mais frio do que seu entorno, seu movimento vertical é suprimido. Isso é conhecido como estratificação estável. Muitas vezes ocorre em noites frias quando a superfície do solo é fria. Nessa situação, a turbulência é dominada pelo atrito com o solo, e o cisalhamento do vento, isto é, o aumento da velocidade média do vento com a altura, pode ser grande (BURTON et al., 2011).

Na atmosfera neutra, o resfriamento adiabático do ar à medida que ele sobe é tal que o ar permanece em equilíbrio térmico com o seu entorno. Este é frequentemente o caso em ventos fortes, quando a turbulência causada pela rugosidade do solo causa mistura suficiente na camada limite. Para aplicações de energia eólica, a estabilidade neutra é geralmente a situação mais importante a ser considerada, especialmente quando se considera as cargas eólicas turbulentas em uma turbina, uma vez que estas são maiores em ventos fortes. No entanto, condições instáveis podem ser importantes, pois podem resultar em rajadas repentinas, e condições estáveis podem dar origem a cargas assimétricas significativas devido ao alto cisalhamento do vento. Também pode haver mudanças rápidas na direção do vento com a altura nesta situação (BURTON et al., 2011).

A Figura 2.2 apresenta os perfis típicos de velocidade do vento para diferentes condições de estabilidade atmosférica.

Figura 2.2 - Perfis típicos da velocidade do vento para condições instáveis, neutras e estáveis.



Fonte: WALLACE e HOBBS, 2006.

A Figura 2.2 indica que as condições de estabilidade atmosférica podem fazer com que o perfil de velocidade do vento se afaste consideravelmente da aproximação de perfil logarítmico, válida apenas para atmosfera neutra.

Uma métrica de estabilidade utilizada para avaliar a estratificação térmica dentro da CLA é a temperatura potencial (BARRIATTO, 2018). Ela representa a temperatura que uma parcela de ar atingiria se fosse expandida ou comprimida de forma adiabática desde o seu estado de pressão e temperatura até a pressão de referência. A temperatura potencial é definida matematicamente pela equação (2.1).

$$\theta = T \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{R}{c_p}} \quad (2.1)$$

onde θ é a temperatura potencial, em K, T e P são, respectivamente, a temperatura, em K, e a pressão, em Pa, da parcela de ar, P_0 é a pressão de referência, em Pa, geralmente tomada ao nível do mar, c_p é o calor específico do ar seco à pressão constante, em J/kg.K, e R é a constante dos gases ideais para o ar, em J/kg.K. A CLA é reconhecida como estável quando $\partial\theta/\partial z > 0$ e como instável quando $\partial\theta/\partial z < 0$ (KOBBLITZ, 2013). Quando $\partial\theta/\partial z = 0$, a CLA é reconhecida como neutra.

2.3 Níveis de modelagem do vento

Existe uma ampla gama de modelos numéricos teoricamente capazes de simular o vento na microescala atmosférica, variando desde formulações lineares mais simples até a simulação de todas as escalas do escoamento. Uma breve discussão sobre o foco de cada uma dessas abordagens, bem como sua aplicabilidade para o mapeamento do potencial eólico, foi apresentada por Radünz, (2018) e é resumida a seguir:

- Modelos Lineares: São formulações mais simples baseadas no conceito de pequenas perturbações em função da orografia (JACKSON; HUNT, 1975). O principal expoente desta classe de modelos é o *Wind Atlas Analysis and Applications Program* (WAsP) (PETERSEN; TROEN, 1989), amplamente utilizado pela indústria de energia eólica. Em terrenos complexos, porém, tende-se a superestimar o efeito de aceleração do vento no topo de elevações (AYOTTE, 2008).
- Equações de Navier-Stokes com média de Reynolds ou *Reynolds-averaged Navier-Stokes* (RANS): Envolve a solução dos campos médios de velocidade e pressão, ao passo que todas as escalas da turbulência são modeladas. São formulações teoricamente capazes de simular fenômenos não-lineares como descolamento da camada limite e recirculação. Atualmente, apresenta o melhor custo-benefício em termos de resultados e tempo de

processamento (PROBST; CÁRDENAS, 2010). Exemplos de modelos geralmente empregados com a formulação RANS são o $k-\epsilon$, $k-\omega$, $k-\omega$ SST, $k-\epsilon$ *realizable* e $k-\epsilon$ RNG.

- Simulação de Grandes Escalas ou *Large-Eddy Simulation* (LES): As grandes escalas presentes no espectro da turbulência são resolvidas, ao passo que as pequenas escalas são modeladas. Originalmente proposto por Smagorinsky (1963) para a simulação de escoamentos atmosféricos, seu emprego tem sido facilitado pelo avanço da capacidade de processamento. No entanto, em *micrositing* diversas simulações são necessárias para compor o mapa de densidade de potência do vento, assim, dificultado seu emprego.
- Simulação Numérica Direta ou *Direct Numerical Simulation* (DNS): Consiste na solução tridimensional direta das equações instantâneas que governam o escoamento de fluidos, que são a da continuidade e do balanço de quantidade de movimento. Dado que o tempo de processamento para DNS aumenta consideravelmente com o número de Reynolds Re (WILCOX, 2006), esta torna-se proibitiva em função do altíssimo Re do vento.

Enquadram-se como Dinâmica dos Fluidos Computacional ou *Computational Fluid Dynamics* (CFD) apenas as abordagens RANS, LES e DNS. Dada a capacidade da formulação RANS de simular fenômenos não-lineares observados em terrenos complexos, bem como o razoável custo computacional, esta tem sido a escolha mais usual para o mapeamento em microescala do potencial eólico em terrenos complexos (SONG et al., 2014; YAN; LI, 2016).

O estudo comparativo realizado por Bechmann et al. (2011), avaliou resultados de simulações submetidos por 57 participantes diferentes para o problema de escoamento do vento ao longo da pequena ilha *Bolund* localizada na costa da Dinamarca. Os 10 participantes cujas simulações resultaram em menores erros em relação a torres de medição utilizaram simulações de CFD com a formulação RANS e modelo de turbulência do tipo “ $k-\epsilon$ ”. Entretanto, mesmo os menores erros obtidos apresentavam magnitudes elevadas, da ordem de 10% para velocidade e 22% para energia cinética turbulenta, o que sugere que ainda há muito espaço para melhoria nas metodologias aplicadas para modelagem numérica do escoamento da Camada Limite Atmosférica (CLA) (BARRIATTO, 2018).

Rodrigo et al. (2008) propôs uma metodologia de modelagem do vento em condições offshore utilizando o software comercial ANSYS Fluent[®], levando em consideração diferentes condições de estabilidade da CLA. Baseando-se na Teoria de Similaridade de Monin-Obukhov (MOST), o modelo de turbulência $k-\epsilon$ padrão foi modificado para levar em consideração a estratificação térmica da camada limite. A validade desta teoria em condições offshore foi discutida com uma análise de dados de medição do vento de três dias na plataforma FINO-1, localizada no Mar do Norte. Os resultados mostraram uma boa adequação da teoria aos dados medidos para o caso de instabilidade da CLA; para o caso de estabilidade da CLA, entretanto, os dados analisados não se adequaram ao previsto na teoria. As discrepâncias foram atribuídas a uma série de efeitos da costa sobre o escoamento.

2.4 Equações governantes

A turbulência do escoamento da CLA cobre uma ampla gama de escalas de menos de um centímetro até vários quilômetros (JACOBSON, 2005). Para descrever completamente esses movimentos, as equações completas de Navier-Stokes precisariam ser resolvidas, o que é computacionalmente inviável. Escoamentos com elevado número de Reynolds podem, alternativamente, ser baseados na solução das equações RANS. A aplicação dessas equações, juntamente com um método de fechamento de duas equações, leva à representação do escoamento da CLA a um custo computacional muito menor do que, por exemplo, usando LES (BECHMANN, 2006).

A formulação RANS consiste na decomposição dos campos de velocidade e pressão em campos médios e flutuações (WILCOX, 2006). As equações (2.2) e (2.3) expressam essas relações em notação indicial.

$$u_i = U_i + u'_i, \quad i = 1,2,3 \quad (2.2)$$

$$p = P + p' \quad (2.3)$$

onde u_i é a velocidade instantânea, U_i a velocidade média, u'_i a flutuação em torno da média, em m/s, p a pressão instantânea, P a pressão média e p' a flutuação em torno da média, em Pa. O operador de média

avaliado diretamente sobre uma componente de flutuação de velocidade resulta em zero. Porém, a média do produto dessas flutuações, decorrentes do termo advectivo das equações de Navier-Stokes, não é nula, como mostrado pela equação (2.4).

$$\overline{u_i'} = 0 \quad \text{porém} \quad \overline{u_i' u_j'} \neq 0, \quad i = 1, 2, 3 \quad (2.4)$$

A principal implicação da não-nulidade das correlações $\overline{u_i' u_j'}$ é o não fechamento das equações e a consequente necessidade de um modelo de turbulência capaz de relacioná-las com os campos médios de velocidade e pressão (RADÜNZ, 2018). O escoamento de alto número de Reynolds da CLA considerando efeitos térmicos é regido pelas equações de conservação de massa, de quantidade de movimento e de energia. A lei de conservação de massa é apresentada em notação indicial pela equação (2.5).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2.5)$$

onde ρ é a massa específica do fluido, em kg/m³, t é o tempo, em s, x_i ($x_1 = x, x_2 = y, x_3 = z$) são as direções longitudinal, lateral e vertical, U_i é a componente da velocidade média do vento, em m/s, ao longo de x_i . O primeiro termo do lado esquerdo da equação (2.5) representa a taxa de variação temporal da massa específica ρ do fluido e o segundo termo descreve o fluxo líquido de massa para fora de um volume finito e é chamado de termo convectivo (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

A relação de conservação de quantidade de movimento na formulação RANS apresentada em (ANSYS INC., 2010) e empregada neste trabalho é dada pela equação (2.6).

$$\frac{\partial (\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u_i' u_j'}) + S_v \quad (2.6)$$

onde p é a pressão do ar, em Pa, μ é a viscosidade dinâmica, em N.s/m², S_v é uma força externa, em N/m³, dada pela equação (2.7).

$$S_v = g_i (\rho - \rho_0) + \epsilon_i f_c \rho U_i + S_{vol} \quad (2.7)$$

onde g_i é a aceleração da gravidade, $g_i^T = (0, 0, -g)$, em m/s², ρ é a massa específica variável e ρ_0 é uma massa específica de referência, em kg/m³, $\epsilon_i^T = (-1, 1, 0)$ e f_c é o parâmetro de Coriolis, dado pela equação (2.8).

$$f_c = 2\Omega_E \sin \lambda \quad (2.8)$$

onde Ω_E é a velocidade angular de rotação da Terra, em rad/s e λ é a latitude do local, em rad. O termo S_v da equação (2.7) introduz nas equações RANS termos fonte/sumidouros que representam os efeitos da estratificação térmica e efeito Coriolis, causado pela rotação da Terra e pela inércia da massa. Apenas a componente da força de Coriolis que age perpendicularmente à direção do vento é considerada, quando visto a partir de um referencial rotativo. Esta força faz com que o vento desvie com a altura. A força de Coriolis na direção vertical é negligenciada, uma vez que nos escoamentos atmosféricos a componente vertical da aceleração de Coriolis é pequena em comparação com a aceleração gravitacional (KOBBLITZ, 2013).

Graças ao primeiro termo do lado esquerdo da equação (2.6), é possível simular fenômenos transientes com as equações RANS. Isso se baseia na premissa de que a média realizada para se obter essas equações é realizada em escala de tempo similar às flutuações turbulentas. Dessa forma, as variações de baixa frequência do escoamento médio da CLA, como as variações diárias do escoamento devido à estratificação da CLA, podem ser adequadamente resolvidas pelas equações RANS de regime transiente (KOBBLITZ, 2013).

A abordagem utilizada pelas médias de Reynolds para modelar a turbulência requer que o termo

$-\rho \overline{u_i' u_j'}$ da Equação (2.6) seja modelado para fechar as equações. Um método comum para isso consiste em empregar a hipótese de Boussinesq (HINZE, 1975) para relacionar as tensões turbulentas aos gradientes locais do escoamento médio através do conceito de viscosidade turbulenta, como mostrado na equação (2.9).

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (2.9)$$

onde μ_t é a viscosidade turbulenta, em N.s/m², δ_{ij} é o Delta de Kronecker ($\delta_{ij} = 1$, se $i = j$, $\delta_{ij} = 0$ se $i \neq j$) e k a energia cinética turbulenta, em m²/s², dada pela equação (2.10).

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i'} \quad (2.10)$$

A vantagem de utilizar a hipótese de Boussinesq é o custo computacional relativamente baixo relacionado ao cálculo da viscosidade turbulenta μ_t . No caso do modelo k - ϵ , apresentado na seção 2.5, duas equações de transporte adicionais são resolvidas, uma para a energia cinética turbulenta k e outra para a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta ϵ . A viscosidade turbulenta é então calculada como função de k e ϵ . A desvantagem da hipótese de Boussinesq é que ela assume que μ_t é uma quantidade escalar isotrópica, o que não é estritamente verdade. Entretanto, essa hipótese funciona bem em escoamentos como os de camada limite (ANSYS INC., 2010).

O termo $g_i(\rho - \rho_0)$ na equação (2.7) explica as variações de densidade devido às mudanças de temperatura na CLA. A aproximação de Boussinesq para o empuxo afirma que as variações de densidade são pequenas o suficiente para serem negligenciadas em todas as equações do modelo, exceto onde aparecem juntamente com a aceleração gravitacional. Esse termo é modelado conforme a equação (2.11).

$$(\rho - \rho_0)g \approx -\rho_0 \beta (T - T_0)g \quad (2.11)$$

onde T_0 é uma temperatura de referência e β é o coeficiente de expansão térmica, em 1/K. A aproximação da equação (2.11) é realizada para eliminar ρ do termo de empuxo e é válida desde que a variação da densidade seja pequena; mais precisamente, desde que a relação da equação (2.12) seja satisfeita (ANSYS INC., 2010).

$$\beta(T - T_0) \ll 1 \quad (2.12)$$

Como as variações de densidade são relativamente pequenas e aparecem em baixas velocidades em relação à velocidade do som, o escoamento pode ser tratado como incompressível; portanto, variações de pressão devido a variações de densidade são desprezadas (KOBLOITZ, 2013).

No ANSYS Fluent[®], a transferência de calor em escoamentos turbulentos incompressíveis é modelada pela equação (2.13).

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(U_i(\rho E + p))}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] + S_h \quad (2.13)$$

onde E é a energia total, dada pela equação (2.14).

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (2.14)$$

onde h é a entalpia sensível. Ainda na equação (2.13), k_{eff} é a condutividade térmica efetiva, definida de acordo com o modelo de turbulência utilizado, e S_h é um termo fonte de calor, em J/m³s. Para o modelo k - ϵ padrão, k_{eff} é modelado pela equação (2.15).

$$k_{eff} = k + \frac{c_p \mu_t}{\sigma_t} \quad (2.15)$$

onde k , neste caso, é a condutividade térmica e σ_t é o número de Prandtl turbulento para a energia, cujo valor padrão é 0,85 (ANSYS INC., 2010).

A completa solução dos campos de velocidade e pressão requer o emprego de um modelo de turbulência capaz de simular o campo de viscosidade turbulenta μ_t (RADÜNZ, 2018), presente na equação (2.9). Esta questão é abordada na próxima seção.

2.5 O modelo k - ϵ

O modelo k - ϵ tem sido extensivamente utilizado ao longo dos anos nos campos de engenharia do vento e avaliação de potencial eólico (BALOGH; PARENTE; BENOCCI, 2012; CASTRO; PALMA; LOPES, 2003; PARENTE et al., 2011; RODRIGO et al., 2008) devido a sua robustez e precisão. Trata-se de um modelo semiempírico cujas equações são baseadas em considerações fenomenológicas e em empiricismo (ANSYS INC., 2010). No modelo k - ϵ padrão para escoamentos incompressíveis considerando efeitos térmicos, utilizado neste trabalho, a energia cinética turbulenta k , em m^2/s^2 , e sua taxa de dissipação ϵ , em m^2/s^3 , são obtidas através das equações (2.16) e (2.17), respectivamente.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k U_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon + S_k \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon U_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{\epsilon 3} G_b) - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (2.17)$$

onde σ_k e σ_ϵ são os números de Prandtl turbulentos, adimensionais, para o transporte de k e de ϵ , respectivamente, $C_{\epsilon 1}$, $C_{\epsilon 2}$ e $C_{\epsilon 3}$ são constantes do modelo, adimensionais, S_k , em J/m^3s , e S_ϵ , em J/m^3s^2 , são termos fonte definidos pelo usuário para k e para ϵ , respectivamente, e G_k e G_b , em J/m^3s , são os termos de produção de k por cisalhamento e por empuxo, respectivamente, determinados pelas equações (2.18) e (2.19) (ANSYS INC., 2010).

$$G_k = -\overline{\rho u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (2.18)$$

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (2.19)$$

Em condições instáveis, G_b é positivo e faz com que k seja gerada pelo efeito do empuxo. Se G_b for negativo, caracterizando condições estáveis, a turbulência é atenuada pelo efeito do empuxo (KOBBLITZ, 2013). A viscosidade turbulenta é calculada em termos de k e ϵ com a equação (2.20) (ANSYS INC., 2010).

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2.20)$$

onde C_μ é uma constante adimensional.

2.6 Constantes do modelo k - ϵ

A Tabela 2.1 apresenta os valores das constantes do modelo k - ϵ padrão.

Tabela 2.1 – Valores para as constantes do modelo de turbulência k - ϵ padrão.

C_μ	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	σ_k	σ_ϵ
0,09	1,44	1,92	1,0	1,3

Fonte: ANSYS INC., 2010.

Os valores acima foram determinados experimentalmente e funcionam muito bem para uma ampla gama de escoamentos delimitados por parede. Entretanto, para escoamentos atmosféricos, o valor de $C_\mu = 0,033$ é frequentemente utilizado (KATUL et al., 2004). Para garantir que a solução do modelo tenha um perfil logarítmico para o vento com cisalhamento constante próximo ao solo, a relação da equação (2.21) tem que ser satisfeita.

$$\sigma_\epsilon = \frac{\kappa^2}{C_\mu^{1/2}(C_{\epsilon 2} - C_{\epsilon 1})} \quad (2.21)$$

onde κ é a constante de von Kármán, que recebe o valor de 0,4187 (ANSYS INC., 2010). Dessa forma, para respeitar a condição imposta pela equação (2.21) utiliza-se neste trabalho o valor de $\sigma_\epsilon = 2,01$.

No software comercial empregado, a consideração dos efeitos térmicos na parede do domínio, ou seja, no contato entre o oceano e o ar, pode ser realizada habilitando-se a opção *Enhanced Wall Treatment Options* na caixa de diálogo referente às especificações do modelo de turbulência, como apresentado no APENDICE D. Essa habilitação permite especificar as constantes σ_t e σ_w , que representam, respectivamente, os números de Prandtl turbulentos para a energia e para a parede. O valor padrão de ambas as constantes é de 0,85 (ANSYS INC., 2010).

O grau no qual ϵ é afetado pelo empuxo é determinado pela constante $C_{\epsilon 3}$ da equação (2.17). A constante $C_{\epsilon 3}$ não é especificada, mas calculada pela equação (2.22).

$$C_{\epsilon 3} = \tanh \left| \frac{v}{u} \right| \quad (2.22)$$

onde v e u são as componentes de velocidade paralela e perpendicular, respectivamente, ao vetor da aceleração gravitacional (ANSYS INC., 2010). Assim, $C_{\epsilon 3}$ tende a 1 à medida que o empuxo aumenta e tende a 0 quando o empuxo é desprezável em relação à velocidade na direção do escoamento.

3 METODOLOGIA E MODELAGEM

Essa seção apresenta a metodologia utilizada para aplicar a modelagem da CLA em diferentes condições de estabilidade atmosférica sobre um terreno offshore. Dados de velocidade e temperatura do vento medidos ao longo de cinco dias corridos em uma plataforma de pesquisa no Mar do Norte são utilizados para extrapolar os perfis de velocidade, temperatura, energia cinética turbulenta e sua taxa de dissipação nas condições identificadas de atmosfera instável, estável e neutra. Utiliza-se o software comercial ANSYS Fluent® para empregar o Método dos Volumes Finitos (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007) para resolver as equações fundamentais apresentadas nas seções 2.4 e 2.5 e representar o escoamento do vento na CLA sujeita a efeitos térmicos. Os perfis verticais obtidos das medições são utilizados como funções de entrada no domínio computacional para cada condição de estabilidade analisada.

A seção 3.1 apresenta brevemente a plataforma FINO-3, da qual os dados de medição meteorológicos e oceanográficos foram coletados. Em seguida, a seção 3.2 apresenta o domínio computacional e a malha considerados nas simulações, bem como as malhas consideradas no método de convergência de malha empregado. A seção 3.3 apresenta as condições de contorno consideradas nas simulações e, por fim, a seção 3.4 descreve como é conduzida a etapa de pós processamento dos resultados obtidos nas simulações.

3.1 Dados climáticos e oceanográficos do local de estudo

As Plataformas de Pesquisa do Mar do Norte e do Mar Báltico (FINO, do alemão *Forschungsplattformen in Nord-und Ostsee*) são plataformas equipadas com instrumentos para medição de dados meteorológicos e oceanográficos. Elas estão localizadas em regiões adequadas para a implantação de parques eólicos offshore. A FINO-3, situada no Mar do Norte a 80 km a Oeste de Sylt, na Alemanha, se encontra próxima a três parques eólicos offshore em operação: *Butendiek*, *DanTysk* e *Sandbank*. As coordenadas da plataforma FINO-3 são: 55° 11,7' N, 7° 9,5' L. A Figura 3.1 indica a localização das três plataformas FINO (esquerda) e exibe uma fotografia da FINO-3 (direita).

Figura 3.1 – Localização das três plataformas FINO (esquerda). Fotografia da FINO-3 (direita).



Fonte: <https://www.fino-offshore.de/en/index.html>

A base de dados da FINO-3 possui medições da velocidade do vento de 10 em 10 minutos e em 9 alturas diferentes, além de possuir medições de temperatura do ar em 3 alturas distintas. A partir desses dados, pode-se identificar períodos em que o escoamento apresenta condições de CLA instável, estável e neutra, como apresentado na seção 4.1. A partir desses dados, perfis verticais de velocidade do vento, temperatura, energia cinética turbulenta e sua taxa de dissipação podem então ser extrapolados para cada caso de estabilidade identificado. Esses perfis são utilizados como condição de contorno na fronteira de entrada do domínio computacional em cada caso de estabilidade da CLA analisado.

A FINO-3 também se destaca por conter medições de temperatura da água do mar a cada 30 minutos. Esses dados são tratados e utilizados como condição de contorno de temperatura para a superfície do mar. Os dados medidos na plataforma FINO-3 também são utilizados para verificar se a metodologia aplicada nas simulações é capaz de representar os fenômenos físicos envolvidos do escoamento do vento termicamente estratificado. Isso é feito comparando-se os resultados das simulações com os perfis de entrada provenientes das medições de velocidade e temperatura realizadas pela plataforma FINO-3.

3.2 Domínio computacional e qualidade da malha

O escoamento sobre um terreno plano e de rugosidade uniforme, como é o caso do escoamento do vento sobre o mar, é horizontalmente homogêneo (KOBLOITZ, 2013). Neste trabalho, o interesse consiste em analisar o escoamento do vento ao longo de uma direção nas alturas de interesse para área de análise de potencial eólico. Nesse sentido, define-se um domínio computacional hexaédrico com dimensões de 1000 x 50 x 300 m, criado com o auxílio do *SpaceClaim* do ANSYS Fluent®, o que permite observar o comportamento dos perfis utilizados na entrada do domínio tridimensional ao longo da extensão de 1 km. Esse domínio é discretizado em volumes finitos através da geração da malha, que é elaborada com o recurso de *Meshing* do ANSYS Fluent®. As malhas utilizadas são estruturadas e seus volumes finitos são, por sua vez, hexaedros de base quadrada e altura variável.

Para cada malha analisada no problema, define-se 200 volumes na direção do escoamento do vento e 10 volumes na direção transversal ao escoamento, de modo que os volumes empregados tenham uma base quadrada de lado igual a 5 m. A altura das células é variável e apresenta uma razão de crescimento de 1,1, sendo definidas a partir da altura da primeira célula, Z_1 , e não ultrapassando a altura de 5 m. Devido aos elevados gradientes próximos a superfície do mar, é importante definir uma malha suficientemente refinada nessa região para representar corretamente as variáveis do problema. Com o intuito de definir quão refinada a malha do problema precisa ser para se obter uma solução aceitável, o método de convergência de malha é realizado. Para isso, diminui-se progressivamente a altura da primeira célula a cada nova simulação em cada condição de estabilidade, aumentando assim o número de volumes na direção vertical do domínio, como indicado na Tabela 3.1.

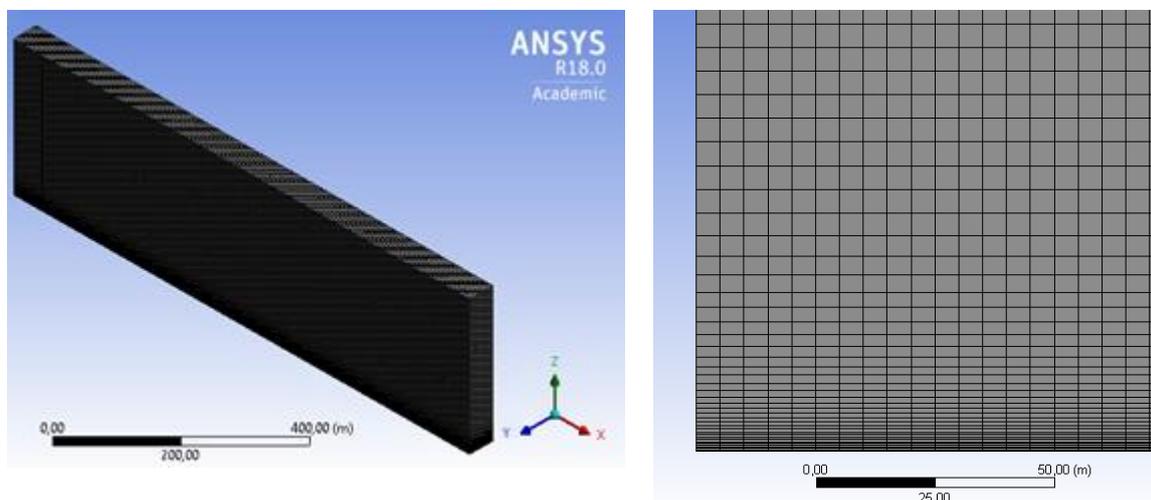
Tabela 3.1 – Parâmetros das malhas empregadas nas simulações.

Malha	Z_1 [m]	Nº de volumes na direção vertical	Nº de volumes total
M0	1,00	69	138.000
M1	0,50	76	152.000
M2	0,25	82	164.000

Fonte: Autor

Na seção 4.4, as malhas apresentadas acima são utilizadas sucessivamente nas simulações para que se possa observar a dependência da solução ao grau de refinamento da malha empregada. A Figura 3.2 apresenta, a esquerda, o domínio computacional com a malha M2 e, a direita, o detalhe do crescimento da altura das células a partir da célula mais próxima ao oceano. A altura das células mais afastadas é limitada a 5 m.

Figura 3.2 – Domínio computacional em perspectiva com a malha M0 (esquerda). Detalhe do refinamento da malha nas proximidades do oceano (direita).



Fonte: Autor

3.3 Funções de entrada e condições de contorno

Para resolver as equações descritas na fundamentação teórica, as condições de contorno e as aproximações iniciais precisam ser especificadas e implementadas corretamente no software empregado. Na fronteira de entrada do domínio, prescreve-se os perfis de velocidade horizontal, temperatura, energia cinética turbulenta e sua taxa de dissipação. Em condições homogêneas e estacionárias, os perfis de velocidade do vento e temperatura potencial são descritos por perfis logarítmicos com os parâmetros de escala L , u_* e T_* , como mostrado pelas equações (3.1) e (3.2), respectivamente, de acordo com a Teoria de Similaridade de Monin-Obukhov (MOST) (RODRIGO et al., 2008).

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - \psi_m \left(\frac{z}{L} \right) \right] \quad (3.1)$$

$$\theta(z) = \theta_0 + \frac{T_*}{\kappa} \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - \psi_h \left(\frac{z}{L} \right) \right] \quad (3.2)$$

onde L é o comprimento de Monin-Obukhov, em m, u_* é a velocidade de fricção, em m/s, T_* é um parâmetro de escala de temperatura, em K, e z_0 é a altura de rugosidade, em m, que em condições de mar aberto está relacionada com a velocidade de fricção u_* , como mostrado na equação (3.3). Esta equação é conhecida como relação de Charnock (RODRIGO et al., 2008).

$$z_0 = 0,0185 \frac{u_*^2}{g} \quad (3.3)$$

A relação entre os perfis de temperatura potencial e temperatura do ar é obtida de forma aproximada pela equação (3.4) (PANOFSKY; DUTTON, 1984).

$$T(z) = \theta(z) - \frac{g}{c_p} z \quad (3.4)$$

Os perfis de k e de ϵ também são obtidos em função do comprimento adimensional z/L , como mostrado nas equações (3.5) e (3.6), respectivamente (RODRIGO et al., 2008).

$$k(z) = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \left[\frac{\phi_\epsilon \left(\frac{z}{L} \right)}{\phi_m \left(\frac{z}{L} \right)} \right]^{1/2} \quad (3.5)$$

$$\epsilon(z) = \frac{u_*^3}{\kappa z} \phi_\epsilon \left(\frac{z}{L} \right) \quad (3.6)$$

O número de Richardson Gradiente é calculado pela equação (3.7).

$$Ri \approx g \left(\frac{\Delta T}{\Delta z} + \frac{g}{c_p} \right) / T \left(\frac{\Delta U}{\Delta z} \right)^2 \quad (3.7)$$

onde os gradientes de temperatura $\Delta T/\Delta z$ e de velocidade $\Delta U/\Delta z$ são estimados a partir de dados de medição em duas alturas diferentes, z_1 e z_2 , e a altura efetiva para Ri vale $z = (z_1 - z_2)/\ln(z_1/z_2)$. O comprimento de Monin-Obukhov, L , em m, é estimado pela equação (3.8) para os casos de CLA instável e estável (RODRIGO et al., 2008).

$$L = \begin{cases} z/Ri & Ri < 0 \text{ (instável)} \\ z(1 - 5Ri)/Ri & 0 < Ri < 0,2 \text{ (estável)} \end{cases} \quad (3.8)$$

As funções ψ_m , ψ_h , ϕ_ϵ e ϕ_m que aparecem nas equações (3.1), (3.2), (3.5) e (3.6), são funções de estabilidade universais, cujas formas mais populares são dadas em (PANOFSKY; DUTTON, 1984). O Quadro 3. 1 resume as funções de estabilidade universais empregadas em cada caso de estabilidade estudado neste trabalho.

Quadro 3. 1 – Resumo das funções de estabilidade universais utilizadas nas três condições de estabilidade.

Função	CLA Instável	CLA Estável	CLA Neutra
ψ_m	$\ln \left[\left(\frac{1+X^2}{2} \right) \left(\frac{1+X}{2} \right)^2 \right] - 2tg^{-1}(X) + \frac{\pi}{2}$	$-5 \frac{z}{L}$	0
ψ_h	$2 \ln \left[\frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 - 16 \frac{z}{L}} \right) \right]$	$-5 \frac{z}{L}$	0
ϕ_ϵ	$1 - \frac{z}{L}$	$\left[1 + 2,5 \left(\frac{z}{L} \right)^{0,6} \right]^{3/2}$	1
ϕ_m	$\left(1 - 16 \frac{z}{L} \right)^{-1/4}$	$1 + 5 \frac{z}{L}$	1

Fonte: Elaborado pelo Autor com base em PANOFSKY e DUTTON, 1984.

O parâmetro X utilizado acima é dado pela Equação (3.9).

$$X = \left(1 - 16 \frac{z}{L} \right)^{1/4} \quad (3.9)$$

Os perfis descritos pelas equações (3.1), (3.2), (3.5) e (3.6) são utilizados como funções de entrada do domínio computacional mostrado na Figura 3.2. Isso é feito através da criação de *User Defined Functions*, escritas em linguagem C e interpretadas pelo software comercial. Os códigos dessas funções para os casos de CLA instável, estável e neutra estão disponibilizados nos APÊNDICES A, B e C, respectivamente.

A condição de contorno da fronteira de saída é definida com a condição de saída de pressão, que é normalmente utilizada quando não se sabe a priori as características do escoamento no final do domínio. Nas fronteiras laterais e na fronteira superior do domínio, condições de contorno de simetria são utilizadas.

A parte inferior do domínio, que representa o mar, é tratada como uma parede rugosa. Para os altos números de Reynolds considerados nesse trabalho, a subcamada viscosa laminar pode ser desprezada, e funções de parede apropriadas para a velocidade, temperatura e variáveis de turbulência são utilizadas. Para a velocidade do vento, a condição de não-deslizamento é imposta. Nos casos de CLA instável e estável, a temperatura é prescrita na fronteira inferior do domínio. Essa condição de contorno é obtida a partir dos dados disponibilizados de temperatura da água da plataforma FINO-3 no instante analisado em cada caso. As condições de contorno para k e para ϵ na parede são internamente tratadas pelo software comercial, eliminando a necessidade de serem informadas pelo usuário (ANSYS INC., 2010).

As variáveis do escoamento são inicializadas a partir de seus valores dados pela condição de contorno na fronteira de entrada do domínio.

O APÊNDICE D apresenta com mais detalhes a implementação dos perfis de entrada e condições de contorno no ANSYS Fluent®, bem como a configuração dos demais *Solvers* utilizados para modelar e resolver o problema.

3.4 Pós-processamento dos resultados

Os resultados obtidos com a simulação podem ser visualizados e tratados diretamente no *CFD-Post* do ANSYS Fluent®. Com ele, três linhas verticais igualmente espaçadas foram definidas no interior do domínio ao longo do escoamento, em $x = 0$ m, $x = 500$ m e $x = 1000$ m, onde se deseja extrair os perfis de velocidade, temperatura, energia cinética turbulenta e sua taxa de dissipação nas diferentes condições analisadas de estabilidade da CLA. Assim, a influência dessas condições da CLA nas características do vento pode ser identificada e a capacidade da modelagem proposta de representar os fenômenos físicos de interesse no escoamento pode ser discutida. Os perfis resultantes são então comparados os perfis de entrada obtidos com os dados da plataforma FINO-3 nas respectivas condições de estabilidade.

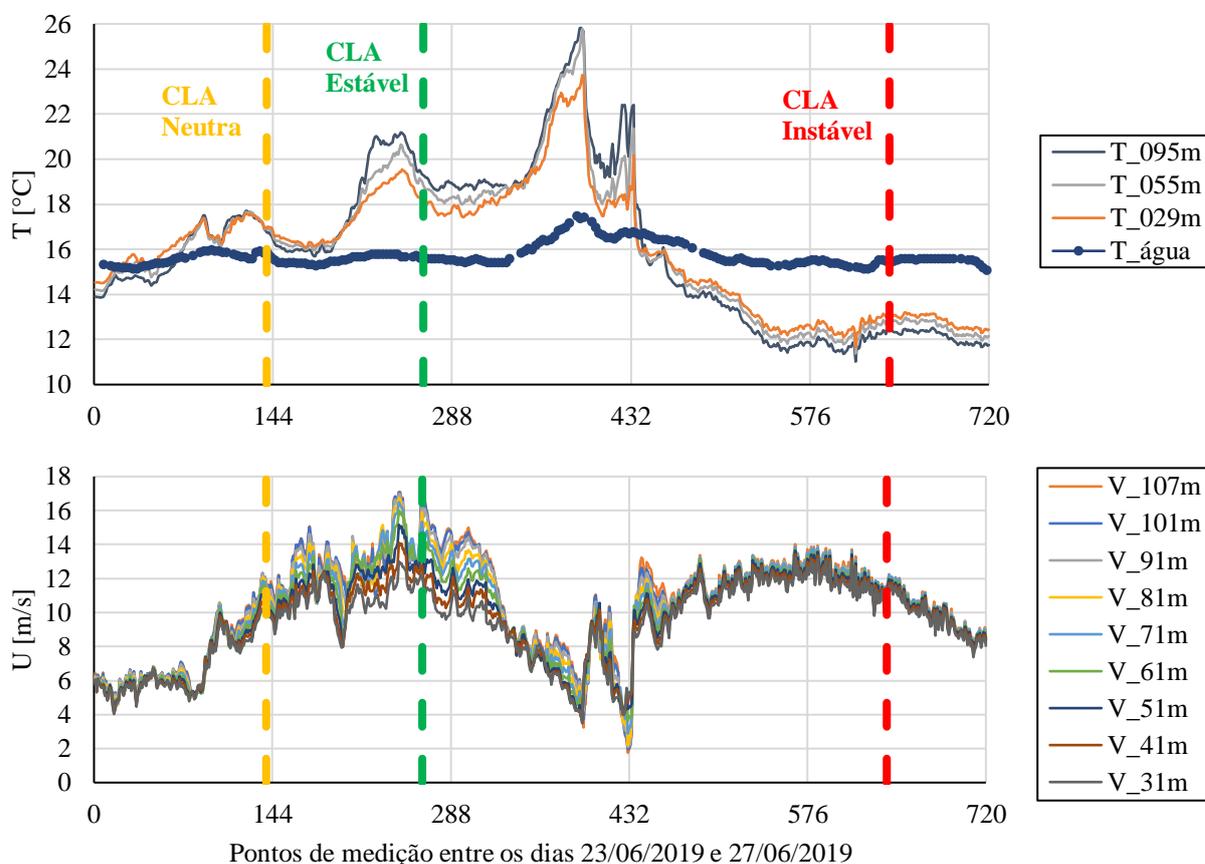
4 SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Esta seção apresenta as simulações numéricas realizadas da CLA utilizando a metodologia descrita na seção anterior, juntamente com uma análise dos resultados obtidos.

4.1 Identificação de diferentes condições de estabilidade da CLA

Os dados de interesse para esse estudo foram extraídos da base de dados da FINO-3. Selecionouse uma janela temporal de cinco dias, do 23/06/2019 ao dia 27/06/2019, para analisar os dados. O período selecionado coincide com o início do verão do hemisfério norte, onde se espera observar maiores variações térmicas durante os dias. A Figura 4.1 apresenta, na parte superior, os dados de temperatura do ar de 10 em 10 minutos em três alturas distintas, indicadas na legenda, bem como os dados de temperatura da água do mar de 30 em 30 minutos. Já na parte inferior, a Figura 4.1 mostra os valores da velocidade do vento de 10 em 10 minutos nas nove alturas indicadas na legenda.

Figura 4.1 – Dados de temperatura e velocidade do vento em diferentes alturas ao longo do período analisado. Os instantes em que a CLA se caracteriza como neutra, estável e instável são identificados por linhas tracejadas.



Fonte: Autor

A Figura 4.1 permite observar a evolução temporal da velocidade do vento e da temperatura ao longo do período analisado. Nota-se que durante as primeiras horas do primeiro dia analisado (entre os pontos de medição 1 e 144), assim como durante todo o quarto e o quinto dia (entre os pontos de medição 432 e 720), a temperatura da água é superior à temperatura do ar e a temperatura do ar diminui suavemente com a altura. Além disso, as medições da velocidade do vento nesses períodos indicam variações verticais relativamente pequenas no perfil de velocidade do vento entre as alturas de 31 m e 107 m, o que pode ser constatado visualmente pelos pequenos espaçamentos entre as curvas de velocidade em diferentes alturas. Essas condições sugerem que a estratificação térmica da CLA durante esses períodos pode ser considerada instável, conforme discutido da seção 2.2. Para representar a CLA instável nas simulações numéricas,

escolhe-se analisar um ponto de medição obtido no quinto e último dia da série de dados, em que a CLA se encontra nas mesmas condições durante várias horas. Esse instante de medição é indicado pela linha tracejada em vermelho na Figura 4.1.

A Figura 4.1 também indica que durante o segundo e o terceiro dia analisado (entre os pontos 144 e 432) a temperatura do ar é mais alta do que a temperatura da água, além de indicar um maior espaçamento vertical entre as curvas de temperatura, que mostram que quanto maior a altura, maior a temperatura medida. Essas características dos dados de temperatura nesse período são acompanhadas por maiores espaçamentos verticais entre as curvas de velocidade, indicando maiores variações do perfil de velocidade com a altura. Essas condições sugerem que a estratificação térmica da CLA durante esse período pode ser considerada estável, como discutido na seção 2.2. Escolheu-se um ponto ao final do segundo dia para representar a CLA estável nas simulações. Esse instante de medição é indicado pela linha tracejada em verde na Figura 4.1.

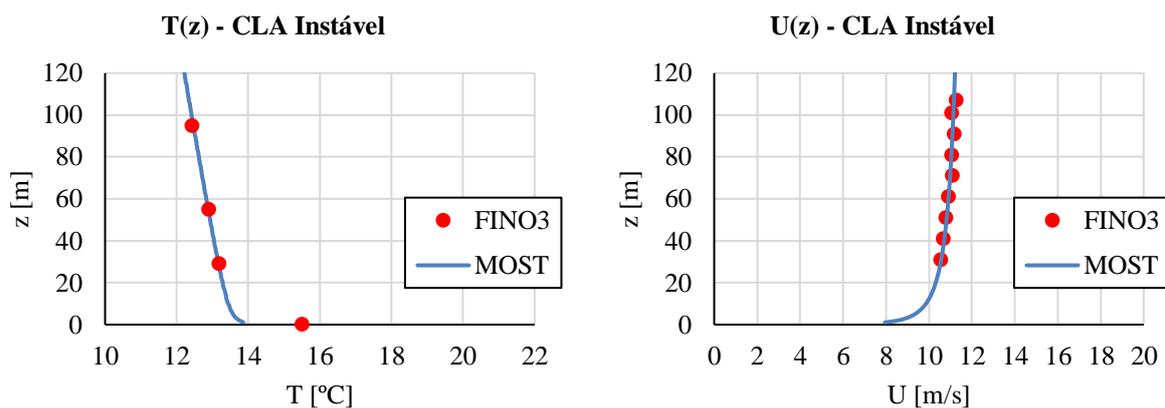
Por fim, escolhe-se representar a CLA neutra nas simulações através dos dados de um ponto de medição obtido ao final do primeiro dia analisado, período em que as curvas de temperatura do ar em diferentes alturas encontram-se praticamente sobrepostas e a diferença entre as temperaturas do ar e da água é relativamente pequena. O ponto em questão é indicado pela linha tracejada em amarelo na Figura 4.1.

4.2 Obtenção dos perfis médios de entrada

A partir da identificação dos instantes em que a CLA apresenta um comportamento correspondente a cada uma das três condições de estabilidade analisadas, pode-se utilizar a Teoria de Similaridade de Monin-Obukhov, apresentada na seção 3.3, para ajustar as medições de velocidade e temperatura a funções analíticas que podem ser inseridas como funções de entrada no domínio computacional.

O comprimento de Monin-Obukhov, L , para as condições instável e estável é obtido pela metodologia apresentada na seção 3.3. Os dados de medição da velocidade do vento são ajustados à equação (3.1) através do z_0 que melhor corresponde aos pontos medidos em cada condição de estabilidade. O mesmo z_0 é utilizado com as equações (3.2) e (3.4) para ajustar os dados de temperatura na condição de estabilidade correspondente. A Figura 4.2 apresenta os perfis ajustados pela Teoria de Similaridade de Monin-Obukhov (MOST) aos dados da plataforma FINO-3 para o caso de CLA instável.

Figura 4.2 – Perfis de temperatura e velocidade ajustados pelos dados de medição em condições de CLA instável. $L = -50,96 \text{ m}$, $z_0 = 3,3 \times 10^{-4} \text{ m}$ e $u_* = 0,419 \text{ m/s}$.

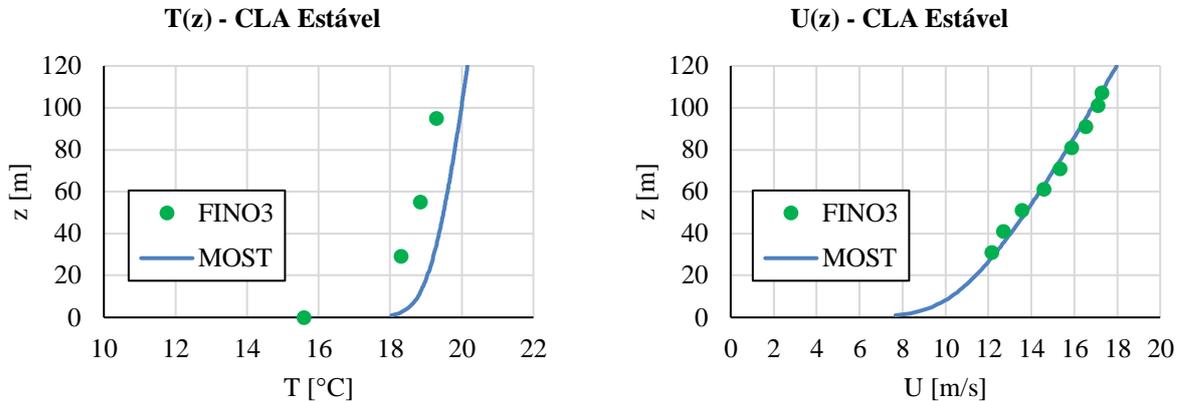


Fonte: Autor

Observa-se na Figura 4.2 que, para o ajuste aos dados com $z_0 = 3,3 \times 10^{-4} \text{ m}$ e $u_* = 0,419 \text{ m/s}$, os perfis verticais propostos pela Teoria de Similaridade de Monin-Obukhov se ajustaram muito bem tanto aos dados medidos de velocidade horizontal do vento quanto aos dados de temperatura do ar para o caso de CLA instável no instante analisado. Percebe-se também que a temperatura decresce com a altura, enquanto a velocidade do vento aumenta suavemente entre os 20 e 120 m de altura, caracterizando um baixo cisalhamento vertical do vento nessa região do escoamento, o que é típico de condições de CLA instável.

A Figura 4.3 apresenta os perfis ajustados para o caso de CLA estável.

Figura 4.3 – Perfis de temperatura e velocidade ajustados pelos dados de medição em condições de CLA estável. $L = 90,74 \text{ m}$, $z_0 = 2,9 \times 10^{-4} \text{ m}$ e $u_* = 0,392 \text{ m/s}$.

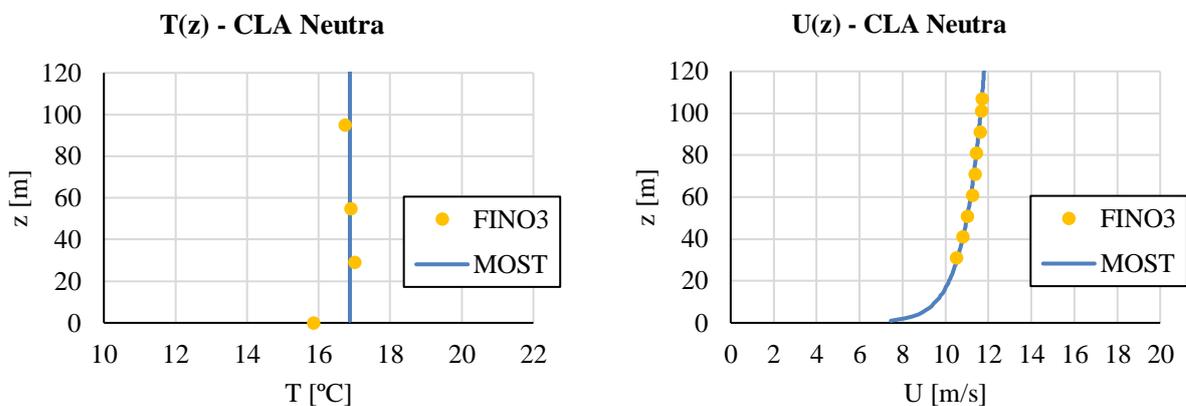


Fonte: Autor

Na Figura 4.3, nota-se que os dados medidos de velocidade em condições de CLA estável se adequam bem ao perfil de velocidade com $z_0 = 2,9 \times 10^{-4} \text{ m}$ e $u_* = 0,392 \text{ m/s}$. Entretanto, o perfil de temperatura, apesar de seguir a mesma tendência dos dados medidos, superestimou esses pontos em média em $0,8 \text{ }^\circ\text{C}$. Nota-se, nesse caso, que tanto a temperatura quanto a velocidade do vento aumentam com a altura, sendo o cisalhamento do vento na região entre 20 e 120 m acima da superfície do mar consideravelmente mais acentuado do que o cisalhamento do vento em condições instáveis da CLA.

Por fim, a Figura 4.4 apresenta os perfis ajustados para o caso de CLA neutra.

Figura 4.4 – Perfis de temperatura e velocidade ajustados pelos dados de medição em condições de CLA neutra. $z_0 = 2,7 \times 10^{-4} \text{ m}$ e $u_* = 0,380 \text{ m/s}$.



Fonte: Autor

A Figura 4.4 indica que o perfil de velocidade proposto para a condição de CLA neutra se adequou bem aos dados medidos de velocidade do vento para um $z_0 = 2,7 \times 10^{-4} \text{ m}$ e $u_* = 0,380 \text{ m/s}$. A temperatura do ar, nesse caso, não varia significativamente com a altura de medição, como também pode ser observado nessa figura, onde mostra-se uma linha vertical representando o valor da média de temperatura dos três pontos de medição. Essa temperatura não é levada em consideração nas simulações para CLA neutra, uma vez que a equação da energia não precisa ser resolvida nessa condição de estabilidade.

Ressalta-se que os valores obtidos para a altura de rugosidade z_0 nas três condições de estabilidade acima estão de acordo com a ordem de grandeza de 10^{-4} m prevista para essa variável em condições de mar aberto (PANOFSKY; DUTTON, 1984).

A obtenção dos perfis de velocidade e temperatura nos três casos de estabilidade analisados

permitiu também atribuir valores para os parâmetros L e u_* . Esses parâmetros são utilizados nas equações (3.5) e (3.6) para se obter os perfis verticais de energia cinética turbulenta, k , e sua taxa de dissipação, ϵ , que também devem ser levados em conta para resolver as equações de balanço apresentadas na seção 2.5.

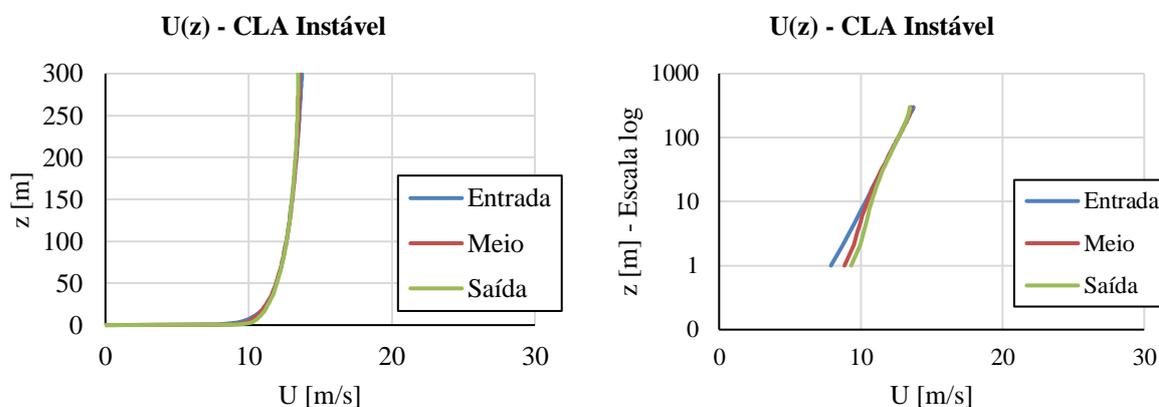
Os perfis verticais assim obtidos são escritos em linguagem C e interpretados no software empregado como *User Defined Functions*. Isso permite aplicar esses perfis na fronteira de entrada do domínio computacional para cada um dos três casos de estabilidade estudados e analisar a capacidade do modelo numérico em preservar esses perfis ao longo do domínio computacional.

4.3 Simulação da CLA termicamente estratificada sobre terreno offshore

As equações RANS com o modelo de turbulência $k-\epsilon$ considerando efeitos térmicos foram configuradas para representar o escoamento do vento sobre um terreno offshore. A malha M0, apresentada na seção 3.2, foi utilizada inicialmente para simular o problema. Em cada condição de estabilidade da CLA simulada, considera-se que o escoamento se encontra em regime permanente e é incompressível. Utiliza-se a aproximação de Boussinesq para a massa específica do ar a fim de tratar os efeitos das forças de empuxo. As etapas da configuração do problema no ANSYS Fluent® são descritas no APÊNDICE D.

No pós-processamento dos resultados, três linhas equidistantes foram definidas na região central do domínio computacional: em sua entrada, meio e saída. Essas linhas são utilizadas para avaliar a evolução dos perfis verticais das variáveis de interesse resultantes do modelo de CFD. Os dados de saída são extraídos do software e tratados em planilha eletrônica. Os resultados dessa seção são apresentados sistematicamente de duas formas: no lado esquerdo de cada figura, o eixo representando a altura é mostrado em escala linear para um melhor entendimento da forma do perfil resultante das variáveis em questão, enquanto que do lado direito das figuras o eixo representando a altura é mostrado em escala logarítmica, o que permite destacar o comportamento dos perfis resultantes nos 10 m mais próximos da superfície do oceano, região onde ocorrem os maiores gradientes. A Figura 4.5 exibe o perfil de velocidade resultante da simulação de CLA instável.

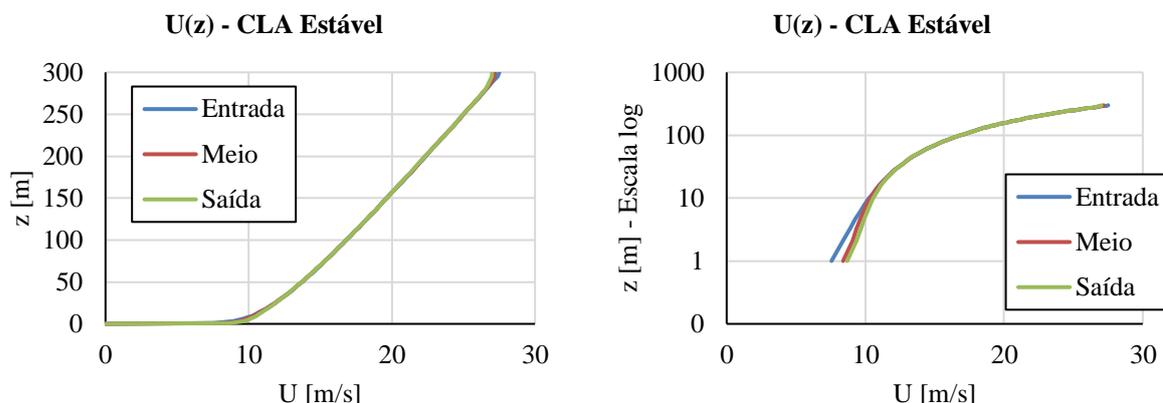
Figura 4.5 – Perfil vertical de velocidade horizontal do vento, $U(z)$, em três posições do domínio computacional, obtidos com a malha M0 na simulação de CLA instável.



Fonte: Autor

Na Figura 4.5 acima, observa-se um elevado gradiente na região do escoamento mais próxima a superfície do mar e um suave aumento da velocidade com a altura na região entre 50 e 300 m, característico de um escoamento bastante turbulento. A Figura 4.6, por sua vez, exibe o perfil de velocidade resultante da simulação de CLA estável.

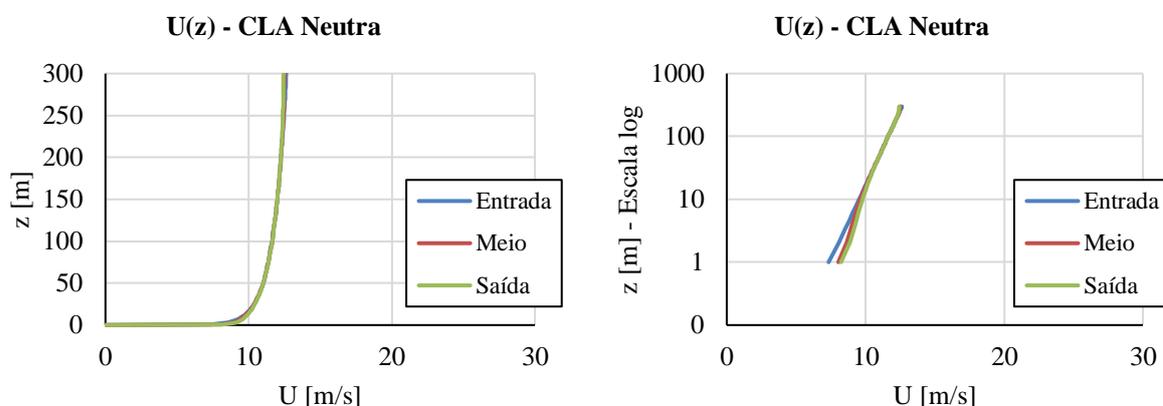
Figura 4.6 – Perfil vertical de velocidade horizontal do vento, $U(z)$, em três posições do domínio computacional, obtidos com a malha M0 na simulação de CLA estável.



Fonte: Autor

Nota-se na Figura 4.6 que, em condições de CLA estável, a variação do perfil vertical de velocidade com a altura é muito mais acentuada do que a observada em condições instáveis, uma vez que em condições estáveis a turbulência acaba sendo atenuada pelos efeitos térmicos. A Figura 4.7 exibe o perfil de velocidade resultante da simulação de CLA neutra.

Figura 4.7 – Perfil vertical de velocidade horizontal do vento, $U(z)$, em três posições do domínio computacional, obtidos com a malha M0 na simulação de CLA neutra.



Fonte: Autor

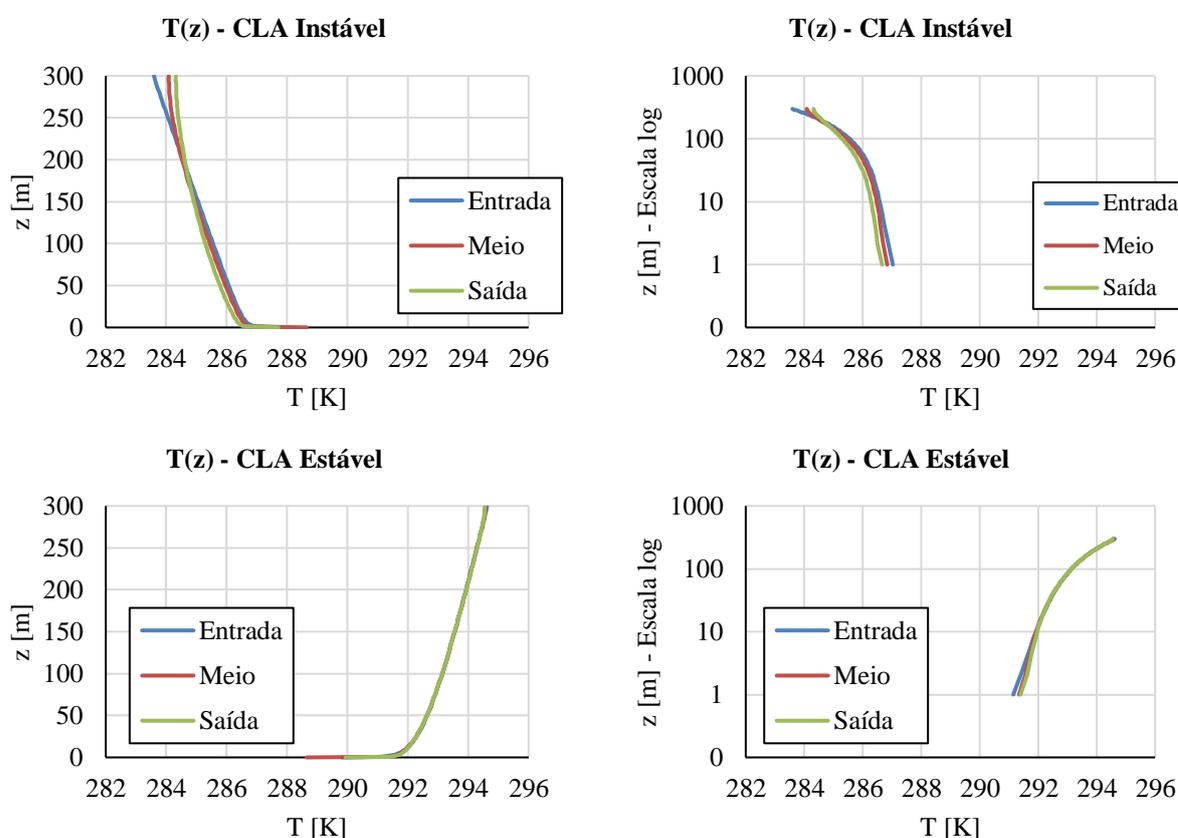
Observa-se na Figura 4.7 a forma logarítmica característica do perfil de velocidade do vento na CLA neutra. Nos gráficos do lado esquerdo das Figuras 4.5, 4.6 e 4.7, onde a altura está representada em escala linear, observa-se pela sobreposição dos valores de velocidade nas três linhas analisadas que o modelo de CFD empregado preservou o perfil de velocidade do vento ao longo de toda a extensão horizontal do domínio, nas três condições de estabilidade da CLA. Nos três gráficos do lado direito, cujos eixos que representam a altura estão em escala logarítmica, ressalta-se que apenas nos 10 m mais próximos ao mar a solução encontrada apresenta valores superiores aos perfis impostos na entrada. Esse padrão é perceptível nos resultados das três condições de estabilidade. No restante do perfil, dos 10 m aos 300 m, alturas essas de maior interesse para aplicações de análise de potencial eólico offshore, observa-se um bom acordo entre o perfil imposto na entrada e a solução numérica obtida.

A variação observada da forma do perfil de velocidade do vento entre diferentes condições de estabilidade da CLA reforça a necessidade de se considerar os efeitos térmicos para reduzir as incertezas na análise de potencial eólico. Na condição de CLA instável analisada, caso a medição de velocidade na altura de 107 m fosse extrapolada para a altura de 150 m com o perfil logarítmico, válido apenas para CLA

neutra, o desvio em relação ao valor estimado na mesma altura de 150 m com a equação (3.1) aplicada para condições instáveis seria de 15,3%, o que levaria a superestimar a produção de energia elétrica nesse instante em 53,2%. Já na condição de CLA estável analisada, caso a mesma extrapolação fosse realizada, o desvio em relação ao valor estimado na mesma altura de 150 m com a equação (3.1) aplicada para condições estáveis seria de -37,3%, o que levaria a subestimar a produção de energia elétrica nesse instante em 75,4%. Esses desvios são bastantes expressivos e se intensificam com a altura, conforme observado pela diferença nas formas que o perfil de velocidade assume em diferentes condições de estabilidade. Dado que turbinas eólicas de maior porte são mais comuns em parques eólicos offshore do que em parques onshore², a necessidade de se levar em conta esses efeitos na análise de potencial eólico de parques offshore se torna ainda maior.

A Figura 4.8 exibe os perfis de temperatura resultantes das simulações das condições instável e estável.

Figura 4.8 – Perfis verticais de temperatura, $T(z)$, em três posições do domínio computacional, obtidos com a malha M0 nas simulações das condições de CLA instável e estável.



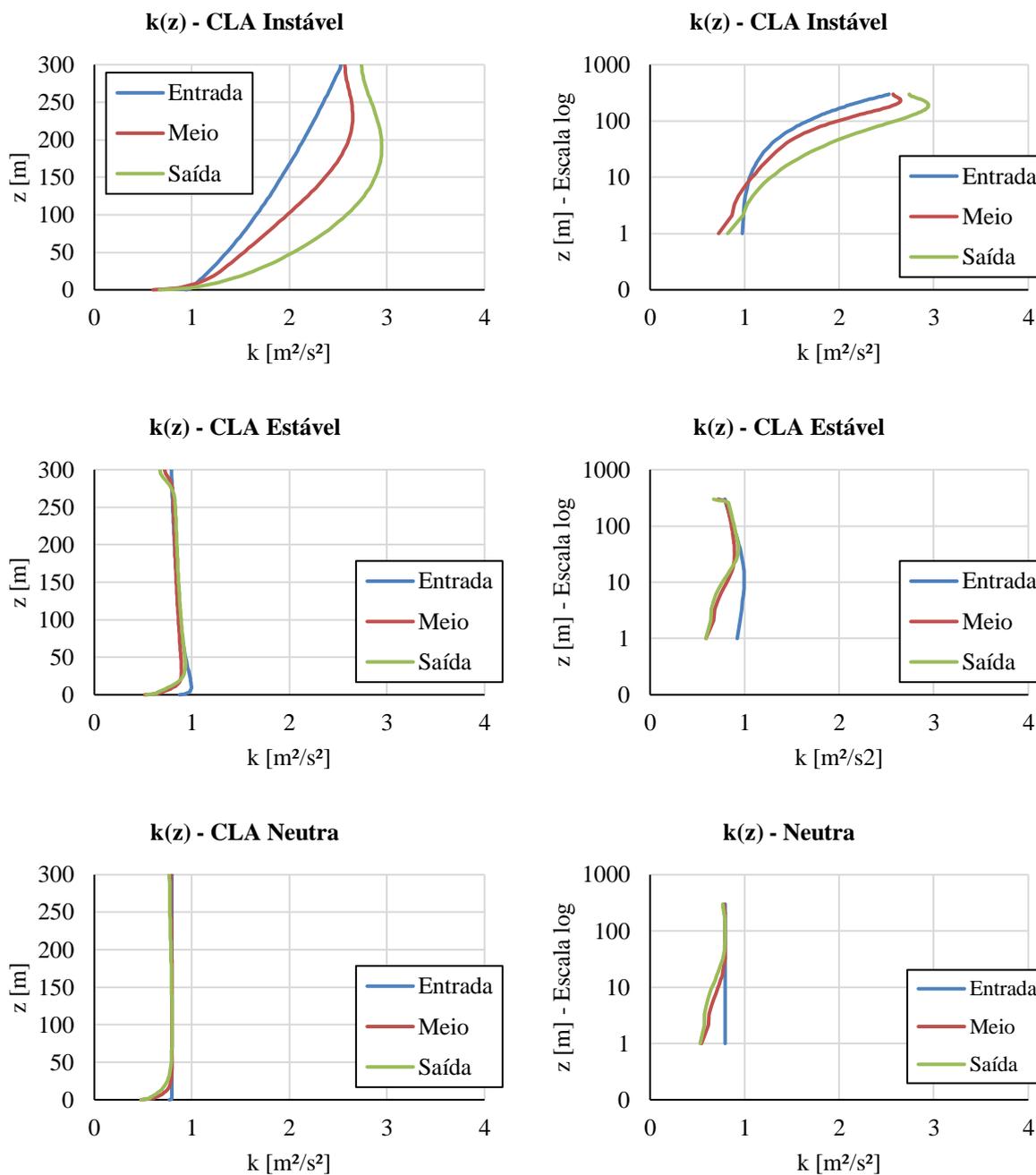
Fonte: Autor

Observa-se na Figura 4.8 que a modelagem de CFD proposta reproduziu bem o perfil de temperatura imposto na entrada do domínio para o caso de CLA estável, preservando-o ao longo de toda extensão horizontal do domínio, como pode-se inferir pela superposição dos valores de temperatura na entrada, meio e saída do domínio. Entretanto, o resultado para o caso de CLA instável parece ter sido afetado pela fronteira superior do domínio, região em que o perfil de temperatura simulado se afasta consideravelmente do perfil imposto na entrada. Apesar disso, os perfis de temperatura no meio e na saída do domínio acompanham bem a forma do perfil na entrada nos primeiros 250 m de altura.

A Figura 4.9 apresenta os resultados das simulações para os perfis de energia cinética turbulenta, k , nas condições de CLA instável, estável e neutra.

² Onshore é um termo da língua inglesa que significa “na costa” na tradução para o português.

Figura 4.9 – Perfis verticais de energia cinética turbulenta, $k(z)$, em três posições do domínio computacional, obtidos com a malha M0 nas simulações das três condições de estabilidade.



Fonte: Autor

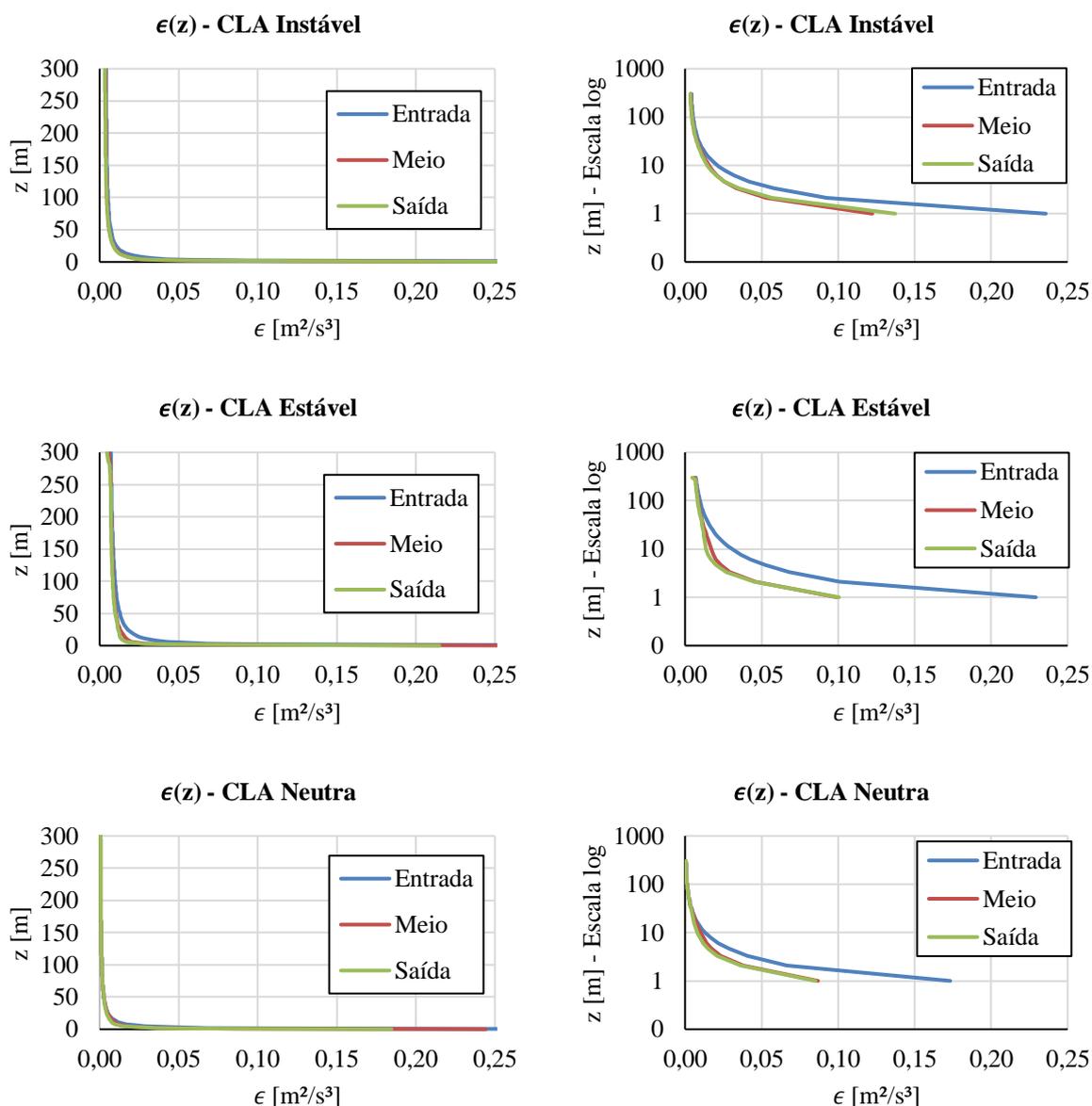
No caso de CLA instável, percebeu-se um aumento não-esperado de energia cinética turbulenta ao longo da extensão horizontal do domínio empregado. Isto poderia ser justificado pelo termo de produção de energia cinética turbulenta devido ao empuxo, G_b da equação (2.19), que assume valores positivos no caso de estratificação instável, atuando na equação (2.16) como termo fonte, sem que ocorra um aumento correspondente na sua taxa de dissipação. De fato, era esperado que os efeitos convectivos levassem a um escoamento mais turbulento na condição de CLA instável; porém, como os valores de energia cinética turbulenta não parecem se estabilizar, considera-se que esse aspecto deve ser investigado mais a fundo em trabalhos futuros.

Para os casos de CLA estável e neutra, os perfis obtidos com as simulações numéricas

correspondem razoavelmente bem ao perfil imposto na entrada, a não ser na região mais próxima à superfície do mar, onde os gradientes são mais acentuados. Nessas regiões, os resultados obtidos apresentam valores inferiores aos impostos pela função de entrada.

A Figura 4.10 apresenta os resultados das simulações para os perfis da taxa de dissipação de energia cinética turbulenta, ϵ , nas condições de CLA instável, estável e neutra.

Figura 4.10 – Perfis verticais de taxa de dissipação da energia cinética turbulenta, $\epsilon(z)$, em três posições do domínio computacional, obtidos com a malha M0 nas simulações das três condições de estabilidade.



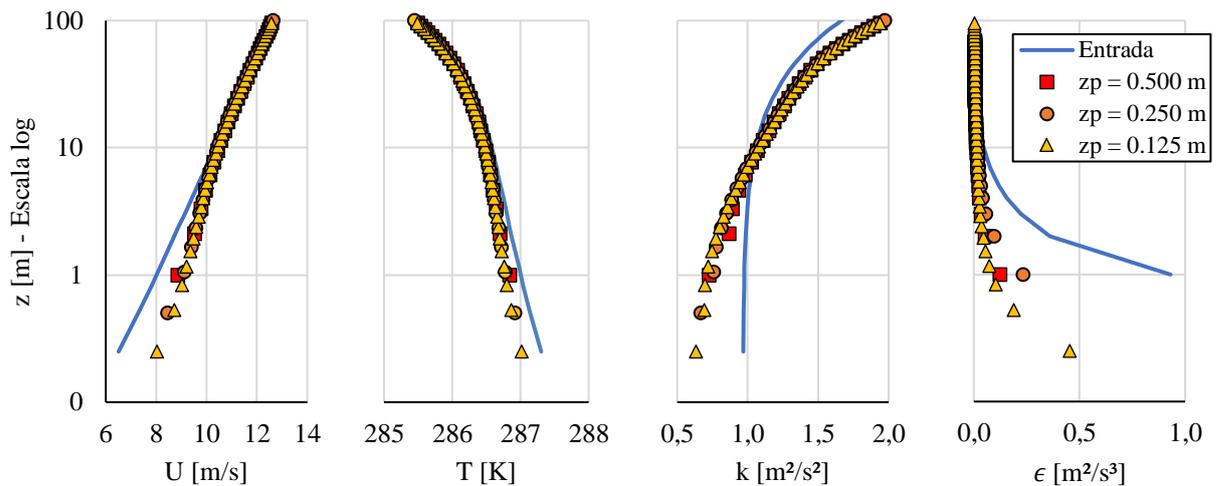
Fonte: Autor

Observa-se na Figura 4.10 que a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta apresenta um comportamento similar entre as três diferentes condições de estabilidade simuladas. Nos três casos, a solução obtida através da solução das equações de Navier-Stokes aparenta não variar do meio do domínio até a saída; porém, a solução apresenta valores inferiores aos impostos na entrada.

4.4 Análise da qualidade de malha

Para a análise de qualidade de malha, o GCI (*Grid Convergence Index*), ou método de convergência de malha, é realizado para investigar a dependência da solução encontrada na seção anterior ao refinamento da malha próximo à superfície do mar, região onde há os maiores gradientes das variáveis do escoamento. Simulou-se progressivamente o problema com as malhas apresentadas na seção 3.2 nas diferentes condições de estabilidade. Os resultados comparam os perfis de entrada de U , T , k e ϵ com suas respectivas soluções numéricas avaliadas em $x = 500$ m no domínio computacional nas três malhas utilizadas. Os resultados para a condição de CLA instável estão mostrados na Figura 4.11.

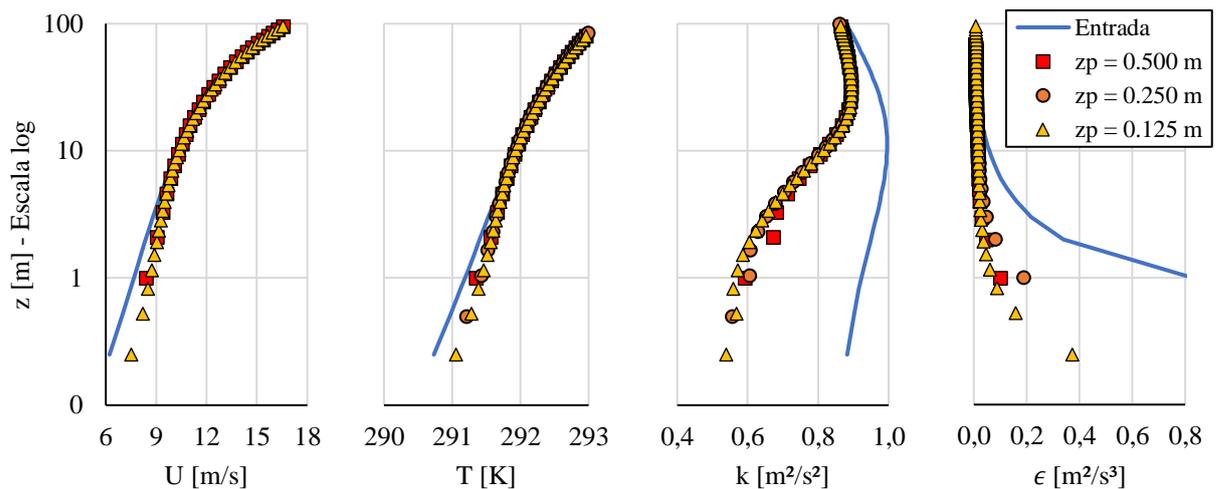
Figura 4.11 – Método de convergência de malha aplicado para a condição de CLA instável.



Fonte: Autor

Os resultados para a condição de CLA estável estão mostrados na Figura 4.12.

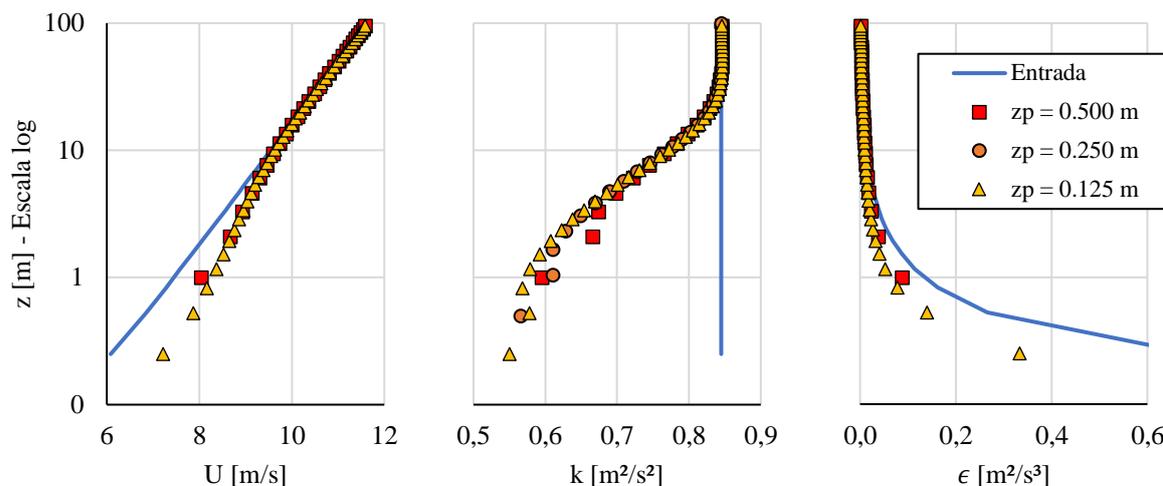
Figura 4.12 – Método de convergência de malha aplicado para a condição de CLA estável.



Fonte: Autor

Os resultados para a condição de CLA neutra estão mostrados na Figura 4.13.

Figura 4.13 – Método de convergência de malha aplicado para a condição de CLA neutra.



Fonte: Autor

Observa-se que o aumento do grau de refinamento da malha na região próxima à superfície do mar não aproximou a solução do problema ao perfil imposto na entrada em nenhuma das três condições de estabilidade simuladas, sugerindo que a malha M0 empregada inicialmente apresentava refinamento suficiente para resolver o modelo de turbulência satisfatoriamente. Além disso, levanta-se a hipótese de que o modelo de turbulência tenha encontrado soluções que representem de forma mais apropriada os fenômenos físicos envolvidos do que as funções de entrada oriundas da teoria de Monin-Obukhov, cujos parâmetros foram calculados a partir de gradientes de velocidade e temperatura computados a partir de dados de medição, tornando os parâmetros bastante sensíveis à escolha das duas alturas para aproximar os gradientes. De qualquer forma, pode-se observar que, nas alturas de interesse para a área de análise de potencial eólico offshore, as soluções obtidas com o modelo $k-\epsilon$ nas três condições de estabilidade da CLA reproduzem satisfatoriamente os perfis verticais de velocidade do vento e temperatura oriundos da Teoria de Similaridade de Monin-Obukhov.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, realizou-se um estudo a respeito do impacto dos efeitos térmicos nas características da CLA sobre um terreno offshore, a fim de se obter um melhor entendimento da importância de se considerar esses efeitos ao se realizar uma análise de potencial eólico nesses locais. A formulação RANS e o modelo de turbulência $k-\epsilon$ foram estudados e aplicados no software comercial ANSYS Fluent® para resolver as equações fundamentais com o Método dos Volumes Finitos e representar o escoamento. Dados públicos de medição do vento provenientes da plataforma de pesquisa FINO-3 foram utilizados para se obter as funções de entrada do domínio computacional.

A análise de dados públicos de vento permitiu identificar satisfatoriamente períodos nos quais a CLA apresentou características típicas de condições instáveis, estáveis e neutras. Observou-se que a teoria de Monin-Obukhov se ajustou muito bem aos dados da CLA em condições instáveis e neutras; porém, em condições estáveis, o ajuste proposto dos dados ao perfil de velocidade resultou em um perfil de temperatura de, em média, 0,8 °C acima dos três valores medidos. Os dados de medição também foram utilizados para se determinar os parâmetros necessários para se obter perfis verticais para a energia cinética turbulenta e sua taxa de dissipação em cada condição de estabilidade analisada. O equacionamento utilizado para modelar no software comercial a CLA sobre terreno offshore considerando efeitos térmicos foi descrito com as considerações necessárias para se resolver o problema. Como funções de entrada no domínio computacional, pode-se aplicar os perfis verticais de velocidade do vento, temperatura, energia cinética turbulenta e sua taxa de dissipação obtidos a partir dos dados de medição da plataforma FINO-3. Isso permitiu analisar a capacidade do modelo de turbulência empregado em representar e preservar as variáveis de interesse do escoamento ao longo da extensão do domínio computacional.

Os resultados obtidos em cada condição de estabilidade indicaram um bom desempenho do modelo em preservar os perfis de velocidade e temperatura nas diferentes condições de estabilidade. Constatou-se que a não consideração dos efeitos térmicos poderia superestimar a produção de energia elétrica em 53,2% em condições instáveis de CLA e subestimar essa produção em 75,4% em condições estáveis de CLA, reforçando a necessidade de se desenvolver metodologias que levam em conta os efeitos térmicos de forma a se obter melhores estimativas dos valores de velocidade do vento em diferentes alturas. O modelo, entretanto, não apresentou resultados esperados ao representar o perfil de energia cinética turbulenta na condição de CLA instável, tornando esse aspecto um ponto a ser investigado em trabalhos futuros. Mostrou-se também que o método de convergência de malha aplicado não levou a alterações significativas na região de maiores gradientes dos perfis verticais analisados e não aproximou a solução numérica aos perfis analíticos provenientes da Teoria de Similaridade de Monin-Obukhov impostos da entrada do domínio. Porém, nas alturas de maior interesse para a análise de potencial eólico offshore, a solução numérica apresentou bom acordo com os perfis teóricos impostos na entrada do domínio.

Este trabalho permitiu aprofundar a metodologia de modelagem da CLA considerando-se efeitos térmicos sobre um terreno offshore, aplicando-se um modelo de turbulência em um software comercial. Pode-se adquirir um melhor entendimento quanto a influência dos efeitos térmicos no escoamento da CLA, mostrando-se seus impactos nos perfis de velocidade e temperatura e sugerindo-se a necessidade de se levar em conta esses efeitos para se reduzir as incertezas associadas aos resultados de uma análise de potencial eólico offshore.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSYS INC. Ansys Fluent 15.0 - Theory Guide. **ANSYS Inc., USA**, 2010.
- AYOTTE, K. W. Computational modelling for wind energy assessment. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 2008.
- BALOGH, M.; PARENTE, A.; BENOCCI, C. RANS simulation of ABL flow over complex terrains applying an Enhanced k- ϵ model and wall function formulation: Implementation and comparison for fluent and OpenFOAM. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 2012.
- BECHMANN, A. **Large-Eddy Simulation of Atmospheric Flow over Complex Terrain**. [s.l: s.n.].
- BECHMANN, A. et al. The Bolund Experiment, Part II: Blind Comparison of Microscale Flow Models. **Boundary-Layer Meteorology**, 2011.
- BURTON, T. et al. **Wind Energy Handbook, Second Edition**. [s.l: s.n.].
- CALIL BARRIATTO, L. Efeitos Da Estabilidade Atmosférica Na Modelagem Do Escoamento Para Aplicações No Setor De Energia Eólica. 2018.
- CASTRO, F. A.; PALMA, J. M. L. M.; LOPES, A. S. Simulation of the askervein flow. Part 1: Reynolds averaged navier-stokes equations (k - ϵ turbulence model). **Boundary-Layer Meteorology**, 2003.
- EPE. Roadmap Eólica Offshore Brasil. p. 141, 2020.
- HINZE, J. O. Turbulence McGraw-Hill. **New York**, 1975.
- IEA. Offshore Wind Outlook 2019. **World Energy Outlook**, 2019.
- JACKSON, P. S.; HUNT, J. C. R. Turbulent wind flow over a low hill. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 1975.
- JACOBSON, M. Z. **Fundamentals of atmospheric modeling second edition**. [s.l: s.n.].
- KATUL, G. G. et al. One- and two-equation models for canopy turbulence. **Boundary-Layer Meteorology**, 2004.
- KOBLITZ, T. **CFD Modeling of Non-Neutral Atmospheric Boundary Layer Conditions**. [s.l: s.n.]. v. 0019
- PANOFSKY, H. A.; DUTTON, J. A. Atmospheric turbulence: models and methods for engineering

applications. 1984.

PARENTE, A. et al. Improved k- ϵ model and wall function formulation for the RANS simulation of ABL flows. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 2011.

PETERSEN, E. L.; TROEN, I. The European Wind Atlas. [s.d.].

PROBST, O.; CÁRDENAS, D. State of the art and trends in wind resource assessment. **Energies**, v. 3, n. 6, p. 1087–1141, 2010.

RADÜNZ, W. C. **Metodologia de micrositing para terrenos complexos baseada em CFD com softwares livres de código aberto**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

RODRIGO, J. S. et al. Numerical CFD modelling of non-neutral ABL for offshore wind resource assessment based on Monin-Obukhov theory. **European Wind Energy Conference and Exhibition 2008**, v. 2, p. 634–664, 2008.

SMAGORINSKY, J. S. Smagorinsky, J.: General Circulation Experiments with the Primitive Equations. *Monthly Weather Review* 91, 99-165. **Monthly Weather Review**, 1963.

SONG, M. X. et al. Wind resource assessment on complex terrain based on observations of a single anemometer. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 2014.

STULL, R. B. An introduction to boundary layer meteorology. **An introduction to boundary layer meteorology**, 1988.

UCAR. **Layers of Earth's Atmosphere**.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics 2nd Edition**. [s.l: s.n.].

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. **Atmospheric Science: An Introductory Survey: Second Edition**. [s.l: s.n.].

WILCOX, D. C. **Turbulence Modeling for CFD (Third Edition)**. **DCW Industries**, 2006.

YAN, B. W.; LI, Q. S. Coupled on-site measurement/CFD based approach for high-resolution wind resource assessment over complex terrains. **Energy Conversion and Management**, 2016.

APÊNDICE A – User Defined Function: CLA Instável

```

#include "udf.h"
#include "math.h"
DEFINE_PROFILE(inlet_x_velocity, thread, position)
{
    real x[ND_ND]; /* this will hold the position vector */
    real z; /*m*/
    real z0 = 0.00033; /*m*/
    real VK = 0.4187;
    real u_estrela = 0.419; /*m/s*/
    real L = -50.964; /*m*/
    face_t f;
    begin_f_loop(f,thread)
    {
        F_CENTROID(x,f,thread);
        z=x[1];
        F_PROFILE(f, thread, position) = (u_estrela/VK)*(log(z/z0)-1*(log( ( (1+pow((pow((1-16*z/L),1/4)),2))/2 )*( ( pow(((1+(pow((1-16*z/L),1/4))/2),2) ) ) ) -2*atan(pow((1-16*z/L),1/4)) + 3.1415/2) );
    }
    end_f_loop(f, thread)
}
DEFINE_PROFILE(inlet_x_epsilon, thread, position)
{
    real x[ND_ND]; /* this will hold the position vector */
    real z; /*m*/
    real z0 = 0.00033; /*m*/
    real VK = 0.4187;
    real u_estrela = 0.419; /*m/s*/
    real L = -50.964; /*m*/
    face_t f;
    begin_f_loop(f,thread)
    {
        F_CENTROID(x,f,thread);
        z=x[1];
        F_PROFILE(f, thread, position) = (pow(u_estrela,3)/(VK*(z+z0)))*(1-z/L);
    }
    end_f_loop(f, thread)
}
DEFINE_PROFILE(inlet_x_k, thread, position)
{
    real x[ND_ND]; /* this will hold the position vector */
    real z; /*m*/
    real u_estrela = 0.419; /*m/s*/
    real L = -50.964; /*m*/
    real cmu = 0.033;
    face_t f;
    begin_f_loop(f,thread)
    {
        F_CENTROID(x,f,thread);
        z=x[1];
        F_PROFILE(f, thread, position) = ( pow(u_estrela,2)/sqrt(cmu) )*sqrt((1-z/L)/(pow((1-16*z/L),1/4)));
    }
    end_f_loop(f, thread)
}
DEFINE_PROFILE(inlet_x_temperature, thread, position)
{
    real x[ND_ND]; /* this will hold the position vector */
    real z; /*m*/
    real z0 = 0.00033; /*m*/
    real theta0=288.65; /*K*/
    real VK = 0.4187;
    real T_estrela = -0.087; /*K*/
    real L = -50.964; /*m*/
    real gamma = 0.009751; /*K/m*/
    face_t f;
    begin_f_loop(f,thread)
    {
        F_CENTROID(x,f,thread);
        z=x[1];
        F_PROFILE(f, thread, position) = (theta0+(T_estrela/VK)*(log(z/z0)-(2*log(0.5*(1+sqrt(1-16*z/L)))))) -gamma*z;
    }
    end_f_loop(f, thread)
}

```

APÊNDICE B – User Defined Fuction: CLA Estável

```

#include "udf.h"
#include "math.h"
DEFINE_PROFILE(inlet_x_velocity, thread, position)
{
    real x[ND_ND]; /* this will hold the position vector */
    real z; /*m*/
    real z0 = 0.00029; /*m*/
    real VK = 0.4187;
    real u_estrela = 0.392; /*m/s*/
    real L = 95.736; /*m*/
    face_t f;
    begin_f_loop(f,thread)
    {
        F_CENTROID(x,f,thread);
        z=x[1];
        F_PROFILE(f, thread, position) = (u_estrela/VK)*(log(z/z0)-(-5*z/L) );
    }
    end_f_loop(f, thread)
}
DEFINE_PROFILE(inlet_x_epsilon, thread, position)
{
    real x[ND_ND]; /* this will hold the position vector */
    real z; /*m*/
    real z0 = 0.00029; /*m*/
    real VK = 0.4187;
    real u_estrela = 0.392; /*m/s*/
    real L = 95.736; /*m*/
    face_t f;
    begin_f_loop(f,thread)
    {
        F_CENTROID(x,f,thread);
        z=x[1];
        F_PROFILE(f, thread, position) =(pow(u_estrela,3)/(VK*(z+z0)))*(pow(1+2.5*pow(z/L,0.6),1.5));
    }
    end_f_loop(f, thread)
}
DEFINE_PROFILE(inlet_x_k, thread, position)
{
    real x[ND_ND]; /* this will hold the position vector */
    real z; /*m*/
    real u_estrela = 0.392; /*m/s*/
    real L = 95.736; /*m*/
    real cmu = 0.033;
    face_t f;
    begin_f_loop(f,thread)
    {
        F_CENTROID(x,f,thread);
        z=x[1];
        F_PROFILE(f, thread, position) = ( pow(u_estrela,2)/sqrt(cmu) ) *sqrt((pow(1+2.5*pow(z/L,0.6),1.5))/(1+5*z/L));
    }
    end_f_loop(f, thread)
}
DEFINE_PROFILE(inlet_x_temperature, thread, position)
{
    real x[ND_ND]; /* this will hold the position vector */
    real z; /*m*/
    real z0 = 0.00029; /*m*/
    real theta0=288.75; /*K*/
    real VK = 0.4187;
    real T_estrela = 0.125; /*K*/
    real L = 95.736; /*m*/
    real gamma = 0.009751; /*K/m*/
    face_t f;
    begin_f_loop(f,thread)
    {
        F_CENTROID(x,f,thread);
        z=x[1];
        F_PROFILE(f, thread, position) = theta0+(T_estrela/VK)*(log(z/z0)+5*z/L)-gamma*z;
    }
    end_f_loop(f, thread)
}

```

APÊNDICE C – User Defined Function: CLA Neutra

```

#include "udf.h"
#include "math.h"

DEFINE_PROFILE(inlet_x_velocity, thread, position)
{
    real x[ND_ND]; /* this will hold the position vector */
    real z; /*m*/
    real z0 = 0.00027; /*m*/
    real VK = 0.4187;
    real u_estrela = 0.380; /*m/s*/
    face_t f;

    begin_f_loop(f,thread)
    {
        F_CENTROID(x,f,thread);
        z=x[1];
        F_PROFILE(f, thread, position) = (u_estrela/VK)*log(z/z0);
    }
    end_f_loop(f, thread)
}

DEFINE_PROFILE(inlet_x_epsilon, thread, position)
{
    real x[ND_ND]; /* this will hold the position vector */
    real z; /*m*/
    real z0 = 0.00027; /*m*/
    real VK = 0.4187;
    real u_estrela = 0.380; /*m/s*/
    face_t f;

    begin_f_loop(f,thread)
    {
        F_CENTROID(x,f,thread);
        z=x[1];
        F_PROFILE(f, thread, position) = pow(u_estrela,3)/(VK*(z+z0));
    }
    end_f_loop(f, thread)
}

DEFINE_PROFILE(inlet_x_k, thread, position)
{
    real x[ND_ND]; /* this will hold the position vector */
    real z; /*m*/
    real u_estrela = 0.380; /*m/s*/
    real cmu = 0.033;
    face_t f;

    begin_f_loop(f,thread)
    {
        F_CENTROID(x,f,thread);
        z=x[1];
        F_PROFILE(f, thread, position) = pow(u_estrela,2)/sqrt(cmu) ;
    }
    end_f_loop(f, thread)
}

```

APÊNDICE D – Configuração do ANSYS Fluent®

Após a criação do domínio computacional e a geração da malha, as configurações do problema podem ser definidas no *Setup* do ANSYS Fluent®. Na aba “*General*”, o *Solver* mais apropriado para tratar o problema pode ser configurado da seguinte forma:

- Em “*Type*”, seleciona-se “*Pressure-based*”, pelo escoamento ser considerado incompressível;
- Em “*Velocity Formulation*”, seleciona-se “*Relative*”, indicado quando a maior parte do fluido presente no domínio está em movimento;
- Em “*Time*”, seleciona-se “*Steady*”, pelo escoamento ser resolvido em regime permanente.

Ainda na aba “*General*”, a caixa “*Gravity*” é selecionada para que a aceleração da gravidade possa ser levada em conta. Utiliza-se o valor de $9,81 \text{ m/s}^2$ na direção vertical.

Em seguida, na aba “*Models*”, são ativados os modelos “*Energy*”, para a equação da energia ser resolvida, e “*Viscous*”, para que as configurações do modelo de turbulência possam ser definidas. Para isso, na caixa de diálogo “*Viscous Model*” que se abre, as seguintes configurações são definidas:

- Em “*Model*”, seleciona-se “*k-epsilon (2 eqn)*”;
- Em “*k-epsilon Model*”, seleciona-se “*Standard*”;
- Em “*Near Wall Treatment*”, seleciona-se “*Enhanced Wall Treatment*”;
- Em “*Enhanced Wall Treatment Options*”, seleciona-se “*Pressure Gradient Effects*” e “*Thermal Effects*”;
- Em “*Options*”, seleciona-se “*Full Bouyancy Effects*”, para se considerar os feitos do empuxo no ϵ ;
- Em “*Model Constants*”, insere-se as constantes do modelo definidas na seção 2.6.

Na aba “*Materials* → *Fluid*”, as propriedades do ar podem ser modificadas. A caixa de diálogo “*Create/Edit Materials*” contém a caixa “*Properties*”. Nela, os seguintes campos são alterados:

- Em “*Density*”, escolhe-se a opção “*boussinesq*” na lista suspensa, e logo abaixo o valor da massa específica do ar é inserido, em kg/m^3 , de acordo com a temperatura média do ar em cada caso de estabilidade;
- No campo “*Thermal Expansion Coefficient (1/K)*”, o valor do coeficiente de expansão térmica do ar é inserido, de acordo com a temperatura média do ar em cada caso de estabilidade;

Na aba “*Cell Zone Conditions* → *Operating Conditions*”, as condições de operação do fluido são especificadas:

- A pressão de operação de 101325 Pa é inserida em “*Operating Pressure (Pascal)*”;
- O campo “*Gravity*” é ativado e seu valor de $9,81 \text{ m/s}^2$ é definido na direção vertical;
- A temperatura de operação é inserida em “*Operating Temperature (K)*”;
- A massa específica de operação é inserida em “*Operating Density (kg/m³)*”.

Na aba “*Boundary Conditions*”, especifica-se as condições de contorno e funções de parede definidas na seção 3.3.

- A entrada do domínio é definida como “*velocity-inlet*”. Os perfis de entrada definidos na seção 3.3 são importados através da caixa de diálogo correspondente;
- A saída do domínio é definida como “*pressure-outlet*”;
- A superfície do mar é definida como “*wall*”, com condição de não-deslizamento para a velocidade e temperatura prescrita na parede;
- O topo do domínio é definido como “*symmetry*”;
- As laterais são definidas como “*symmetry*”.

Na aba “*Solution* → *Methods*”, os *Solvers* utilizados para resolver as equações são selecionados:

- Em “*Pressure-Velocity Coupling*”, o esquema “*Coupled*” é selecionado;
- Em “*Spatial Discretization* → *Gradient*”, o “*Least Squares Cell Based*” é selecionado;
- Em “*Spatial Discretization* → *Pressure*”, o “*Body Force Weighted*” é selecionado;
- Para as equações de quantidade de movimento, energia cinética turbulenta, taxa de dissipação de energia cinética turbulenta e energia, é selecionada a opção “*Second Order Upwind*”.

Na aba “*Solution* → *Monitors*”, os resíduos de 1×10^{-7} são definidos como critério de convergência.