

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA FPSO EM MEDIÇÕES EÓLICAS
OFFSHORE COM LIDAR EMBARCADO EMPREGANDO DINÂMICA DOS FLUIDOS
COMPUTACIONAL

por

César Augusto Bohn Noll

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, abril de 2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Noll, César Augusto Bohn

Análise da Influência da Geometria da FPSO em
Medições Eólicas Offshore com LiDAR Embarcado
Empregando Dinâmica dos Fluidos Computacional / César
Augusto Bohn Noll. -- 2023.

32 f.

Orientadora: Adriane Prisco Petry.

Coorientador: Jahel Emmanuhel Motta da Silva.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2023.

1. energia eólica offshore. 2. LiDAR. 3. FPSO. 4.
CLA neutra. I. Petry, Adriane Prisco, orient. II. da
Silva, Jahel Emmanuhel Motta, coorient. III. Título.

César Augusto Bohn Noll

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA FPSO EM MEDIÇÕES EÓLICAS
OFFSHORE COM LIDAR EMBARCADO EMPREGANDO DINÂMICA DOS FLUIDOS
COMPUTACIONAL

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Energia e Fenômenos de Transporte

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

Coorientador: Eng. Jahel Emmanuhel Motta da Silva

Comissão de Avaliação:

Prof^ª. Dr.^a Adriane Prisco Petry (Presidente)

Prof^ª. Dr.^a Letícia Jenisch Rodrigues

Prof. Dr. Alexandre Vagtinski de Paula

Porto Alegre, abril de 2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus familiares, em especial meus pais, por estarem presentes ao longo da minha vida e por terem garantido a educação como prioridade para mim.

Meus agradecimentos à amigos e colegas que formei durante minha caminhada, que sempre estiveram presentes comigo e demonstraram apoio nas diversas atividades que realizei na vida.

Agradeço ao Jahel Emmanuhel por ter me ajudado em diversos aspectos técnicos envolvidos durante a elaboração deste trabalho.

APOIO FINANCEIRO

Agradecimentos aos Consórcio de LIBRA, através do projeto Ventos de LIBRA, que permitiu a realização deste trabalho com apoio financeiro.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2023

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA FPSO EM MEDIÇÕES
EÓLICAS OFFSHORE COM LIDAR EMBARCADO EMPREGANDO
DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

Noll, César A. B.

cesar.b.noll@gmail.com

Resumo. Este trabalho tem por objetivo realizar um estudo sobre a influência da geometria de uma FPSO no perfil de velocidade do vento que está sujeito a medições de um sensor LiDAR para a caracterização de recursos eólicos. Neste estudo, foram realizadas duas simulações de uma camada limite atmosférica neutra com e sem a presença da FPSO a fim de comparar as distorções geradas pela superfície da plataforma. Constatou-se que a partir de 40 m de distância do LiDAR, altura mínima de medição, o erro de leitura apresentou valores menores que 3%, apresentando uma tendência de queda no erro da leitura, à medida que a altura de medição era incrementada. Além disso, observou-se um desvio mínimo na direção de velocidade do vento nos pontos em que foram realizadas as medições.

Palavras-chave: energia eólica offshore, LiDAR, FPSO, CLA neutra

Analysis of the Influence of FPSO Geometry on Offshore Wind Measurements with Embedded LiDAR Using Computational Fluid Dynamics

Abstract. The objective of this work is to study the influence of the geometry of an FPSO on the wind speed profile subject to measurements by a LiDAR sensor for the characterization of wind resources. In this study, two simulations of a neutral ABL were performed with and without the presence of the FPSO to compare the distortions generated by the platform surface. It was found that, from a minimum measurement height of 40 m from the LiDAR, the reading error presented values lower than 3%, showing a tendency to decrease in the reading error as the measurement height was increased. Additionally, a minimum deviation was observed in the wind speed direction at the measurement points.

Keywords: offshore wind energy, LiDAR, FPSO, neutral ABL

NOMENCLATURA

Símbolos

$C_{\varepsilon 1}$	Constante do modelo k - ε	[adim]
$C_{\varepsilon 2}$	Constante do modelo k - ε	[adim]
$C_{\varepsilon 3}$	Constante do modelo k - ε	[adim]
c_p	Calor específico	[J/kg]
G_b	Termo de produção por empuxo	[J/m ³ .s]
G_k	Termo de produção de k por cisalhamento	[J/m ³ .s]
P	Pressão da parcela de ar	[Pa]
p'	Componente flutuante da pressão em torno da média	[Pa]
P_0	Pressão de referência	[Pa]
R	Constante universal dos gases	[J/kg.K]
S_ε	Termo fonte para a equação de ε	[J/m ³ .s]
S_k	Termo fonte para a equação de k	[J/m ³ .s]
S_v	Termo fonte para a quantidade de movimento do ar	[N/m ³]
T	Temperatura de parcela de ar	[K]
t	Tempo	[s]
u_*	Velocidade de fricção	[m/s]
U_i	Velocidade média na direção i	[m/s]
u'_i	Componente flutuante da velocidade em torno da média na direção i	[m/s]
u_i, u_j	Velocidade instantânea na velocidade i e j	[m/s]
x_i, x_j	Componentes na direção i e j	[m]
z_0	Altura de rugosidade	[m]
Símbolos gregos		
ε	Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta	[m ² /s ³]
θ	Temperatura potencial	[K]
μ	Viscosidade dinâmica	[N.s/m ²]
μ_t	Viscosidade turbulenta	[N.s/m ²]
ρ	Massa específica	[kg/m ³]
σ_k	Número de Prandtl para o transporte de k	[adim]
σ_ε	Número de Prandtl para o transporte de ε	[adim]

Abreviaturas e acrônimos

CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CLA	Camada Limite Atmosférica
FPSO	<i>Floating Production Storage and Offloading</i>
GCI	<i>Grid Convergence Index</i>
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
RANS	<i>Reynolds-Averaged Navier-Stokes</i>
SIMPLE	<i>Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations</i>
UDF	<i>User Defined Function</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTAÇÃO	2
2.1 Camada Limite Atmosférica	3
2.2 Estabilidade Térmica e Estratificação da Camada Limite Atmosférica	4
2.3 Equações Governantes	5
2.4 Modelo $k-\varepsilon$	7
3. METODOLOGIA	8
3.1 Desenvolvimento das Geometrias e Domínio Computacional	8
3.1.1 Malha Gerada para o escoamento Livre	9
3.1.2 Malha Gerada para o escoamento com a FPSO	10
3.2 Condições de Contorno	10
3.3 Configurações do Software de Simulação	11
3.4 Pós-processamento e Comparação dos Resultados	11
3.5 Estudo da Qualidade da Malha	12
4. RESULTADOS	12
4.1 Análise do Desenvolvimento dos Perfis ao Longo do Escoamento	13
4.2 Comparação com os Pontos de Medição	14
5. CONCLUSÃO	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16
ANEXO A – Gráfico de Contorno da Velocidade Sobre a FPSO	18
APÊNDICE A – Modelagem dos Domínios Computacionais	20
APÊNDICE B – <i>User Defined Function</i> Para CLA Neutra	23

1. INTRODUÇÃO

Diante das crises climáticas ocasionadas pelo aquecimento global somada à crescente demanda energética, diversas organizações, empresas privadas e entidades governamentais ao redor do mundo têm se reunido nas últimas décadas para propor soluções com o objetivo de conter o avanço das mudanças climáticas. Dentre as diversas medidas apresentadas para reduzir a emissão de gases de efeito estufa, destacam-se o uso de fontes de energia renováveis, como por exemplo, a energia solar, a energia maremotriz, como também a energia eólica.

Em 2020, a capacidade total de potência eólica instalada no mundo ultrapassou 700 GW, sendo 93 GW de potência instaladas neste mesmo ano, resultando em um aumento de 70% em comparação com o ano anterior (IEA WIND, 2020). No Brasil, o ano de 2021 terminou com 21,56 GW de potência eólica acumulada após a instalação de 3,83 GW de potência através de 110 novos parques neste mesmo ano, representando um aumento de 21,53% em relação ao ano de 2020, cuja capacidade acumulada era de 17,75 GW (ABEEÓLICA, 2021). Embora a energia eólica onshore¹ continue a dominar a maior parcela da capacidade eólica instalada, a participação da modalidade offshore tem aumentado nos últimos anos. Globalmente, a capacidade de potência eólica offshore² instalada no ano de 2020 atingiu os 35 GW (IEA WIND, 2020), enquanto no Brasil, a 100 m de altura, a energia eólica offshore tem potencial para atingir os 697 GW em locais com até 50 m de profundidade (EPE, 2020).

A energia eólica offshore, possui uma capacidade de produção energética maior em comparação com a modalidade onshore, visto que no oceano os ventos não encontram barreiras e a rugosidade da superfície pode ser considerada muito próxima de zero, ou seja, os ventos tendem a apresentar velocidades maiores, mais regulares e com maior aproveitamento que em terra (ORTIZ; KAMPEL, 2011). Apesar deste potencial eólico ter uma presença menor em comparação com a modalidade onshore, a modalidade offshore tem se destacado nos últimos anos como uma opção cada vez mais viável para a produção de energia eólica para atender a demanda energética global e vem recebendo investimentos de governos e diversos setores da economia, como por exemplo, a indústria do óleo e gás.

A indústria petrolífera, uma das maiores emissoras de gases de efeito estufa, ao mesmo tempo que precisa expandir suas atividades para atender a demanda cada vez crescente, deve estudar maneiras de diminuir o impacto ambiental gerado por ela sobre o planeta (TABASNIK, 2020). Por operarem em alto mar, as plataformas dependem de energia elétrica para garantir o seu funcionamento e, além de fornecer energia para a operação do maquinário de extração de petróleo, a energia elétrica também é utilizada pelos funcionários que trabalham na plataforma (BRAGA, 2013). Para fornecer energia elétrica para suas instalações, as plataformas utilizam turbinas a gás que consomem combustíveis fósseis para o seu funcionamento, muitas vezes gás natural oriundo do petróleo extraído do local. As turbinas a gás, em comparação com outras tecnologias para produção de energia, são relativamente compactas e apresentam boa performance, sendo muito utilizado em plataformas em alto mar. Contudo, apesar de sua versatilidade, contribuem fortemente para a emissão de gases nocivos para a atmosfera, chegando a representar 90% das emissões antropogênicas de CO₂, influenciando de forma significativa a mudança climática (TABASNIK, 2020). Diante deste contexto, diversas empresas do ramo de óleo e gás buscam fontes de energias alternativas, como a energia eólica offshore, para eletrificar suas plataformas e reduzir as emissões de gases poluentes de suas turbinas, além de garantirem o seu compromisso com os acordos climáticos estabelecidos ao redor do mundo.

No projeto de parques eólicos offshore, as medições de potencial eólico em alto mar são extremamente importantes devido ao alto investimento do projeto e os altos riscos técnicos e

¹ Tradução do inglês para “em terra”.

² Tradução do inglês para “em alto mar”.

financeiros associados às dificuldades em ambiente oceânico (HASAGER et al., 2013). Portanto, uma base sólida de dados eólicos é necessária para estimar o futuro rendimento energético e com isso avaliar o retorno esperado do investimento planejado (GOTTSCHELL et al., 2017). Tradicionalmente, utilizam-se torres anemométricas instaladas em locais fixos com instrumentos de medições acoplados em determinadas faixas de altura para a coleta pontual de dados do vento. Entretanto, devido às restrições estruturais e de custo, as torres anemométricas possuem cerca de 50 a 100 m de altura e, dessa forma, não conseguem realizar medições em alturas que correspondem aos novos aerogeradores com alturas que variam entre 100 a 130 m e com diâmetros de rotores de 150 a 200 m (GOIT; YAMAGUCHI; ISHIHARA, 2020). Assim, a montagem de uma torre para a realização de medições nessa faixa de altura obriga dimensões cada vez maiores, o que torna o processo muito mais complexo e dispendioso (SIMÃO, 2017). Como resultado, técnicas de sensoriamento remoto, como a tecnologia LiDAR, cuja sigla significa em inglês *Light Detection and Ranging*, têm se tornado cada vez mais populares na área de pesquisa de energia eólica devido à sua capacidade de medir a velocidade do vento em grandes regiões e a altitudes de até 200 m. Além disso, o LiDAR têm como vantagem sobre as torres anemométricas a sua flexibilidade em relação ao transporte e instalação, podendo ser montados diretamente em boias, navios, FPSO (acrônimo em inglês para *Floating Production Storage and Offloading*) e demais plataformas flutuantes (GOIT; YAMAGUCHI; ISHIHARA, 2020).

Embora a tecnologia LiDAR apresente vantagens em relação às torres anemométricas, a mesma encontra desafios técnicos a serem superados. Técnicas de compensação do movimento oscilatório da plataforma flutuante e dispositivos de estabilização são discutidas por Gottshall et al. (2017). Além dos desafios relacionados ao movimento oscilatório da estrutura de onde está instalado o LiDAR, é necessário compreender se a geometria da estrutura pode distorcer o perfil de velocidade do vento e conseqüentemente influenciar na leitura do equipamento. Stickland et al. (2013) realizaram um estudo do emprego de CFD para a estimar a distorção do vento na presença de uma plataforma e concluíram que se a distorção do vento for altamente localizada, como próximo à superfície da plataforma offshore, o LiDAR produzirá resultados mais confiáveis do escoamento livre se comparado com um anemômetro.

Tendo em vista a preocupação com confiabilidade das medições eólicas, este trabalho tem por objetivo verificar, através do emprego de software de simulação numérica, a influência da geometria de uma FPSO no perfil de velocidade do vento em medições eólicas offshore com sensor LiDAR embarcado. Empregando o software de simulação de fluidos Ansys Fluent, será realizada a simulação da camada limite atmosférica em ambiente offshore em duas situações: um escoamento livre sem a presença da FPSO e outro escoamento com a plataforma, modelado em CAD através do software SpaceClaim. Ao final será comparado o perfil de velocidade do vento em pontos específicos do domínio computacional dos dois escoamentos e verificado se houve diferenças significativas nos perfis de velocidade, ou seja, se a geometria da FPSO influenciou nos resultados lidos pelo sensor LiDAR.

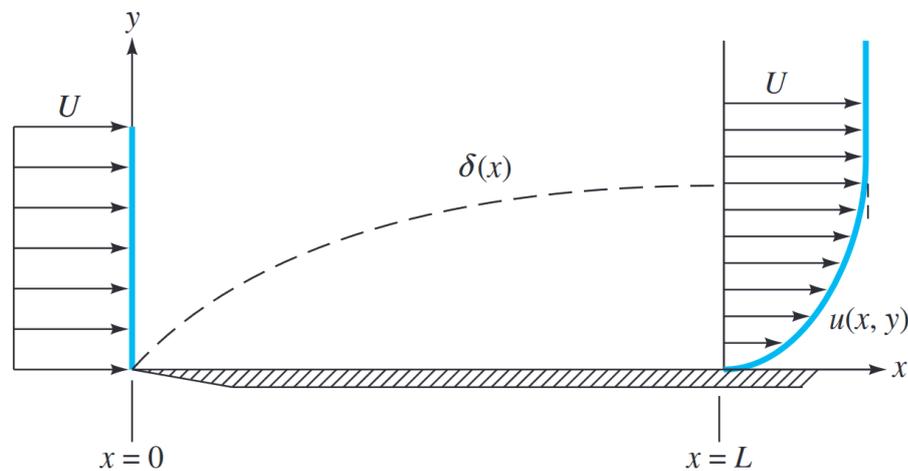
2. FUNDAMENTAÇÃO

De forma a garantir o entendimento deste trabalho, é necessário introduzir ao leitor os conceitos e equações que serviram de base para a realização desta pesquisa. Será introduzido primeiramente o conceito da camada limite atmosférica e sua importância na área de energia eólica. Em seguida, será realizada a apresentação das equações que governam o comportamento da camada limite atmosférica. Por último, será discutido o modelo de turbulência $k-\epsilon$ utilizado neste trabalho.

2.1 Camada Limite Atmosférica

O conceito da camada limite foi introduzido no início do século XX pelo físico alemão Ludwig Prandtl que, através de experimentos com escoamentos externos, verificou a existência de uma região próxima a superfície sólida que impõe uma condição de não-deslizamento ao fluido viscoso, resultando na sua desaceleração devido ao atrito com a superfície. Dessa forma, a camada limite estabelece a divisão do escoamento em duas regiões: uma região interna próxima a superfície do sólido na qual efeitos viscosos são levados em consideração, e uma região externa cujo escoamento pode ser considerado invíscido, ou seja, sem a presença de efeitos da viscosidade (WHITE, 2017). A Figura 1 ilustra o desenvolvimento da camada limite em uma superfície plana.

Figura 1 - Representação do desenvolvimento da camada limite em uma placa plana.

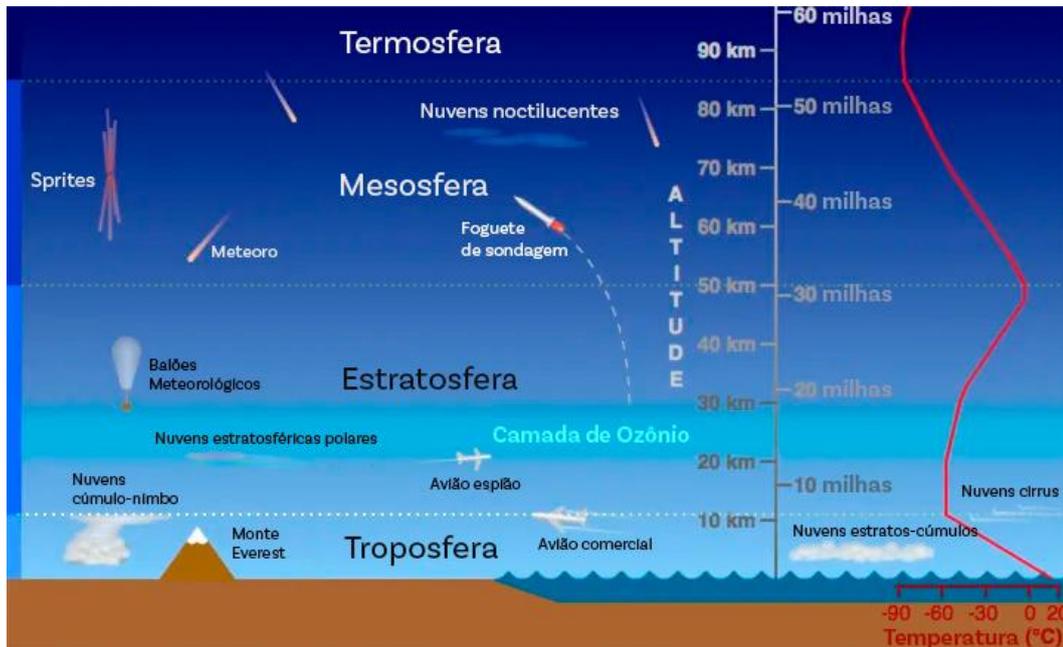


Fonte: adaptado de (WHITE, 2017)

A camada limite também pode ser estendida no estudo da dinâmica do vento com a superfície terrestre. A atmosfera terrestre é composta por diferentes massas de ar com temperaturas distintas e pode ser subdividida, a partir da superfície terrestre, nas seguintes camadas: troposfera, estratosfera, mesosfera e termosfera. A Figura 2 ilustra as diferentes subcamadas que compõem a atmosfera terrestre e suas respectivas temperaturas para uma dada altitude.

A troposfera, camada mais próxima da superfície terrestre, se estende aproximadamente até 10000 m de altitude e pode ser subdividida em duas subcamadas: a camada limite atmosférica (CLA) e a atmosfera livre. A camada limite atmosférica, que se estende entre 100 e 3000 m de altitude, é caracterizada por escoamentos turbulentos de massas de ar e pode ser definida 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 até uma hora (STULL, 1988). As forçantes que regem o comportamento da CLA são a intensidade do vento geostrófico, a rugosidade da superfície, os efeitos térmicos através da radiação solar e o efeito Coriolis devido a rotação da Terra (BURTON et al., 2011). Como as torres eólicas são instaladas na região que corresponde à CLA, a camada limite atmosférica é objeto de intenso estudo para a análise de potencial eólico.

Figura 2 - Divisão das subcamadas que compõem a atmosfera.



Fonte: adaptado de <https://scied.ucar.edu/learning-zone/atmosphere/layers-earths-atmosphere>. Acesso em 05 fev. 2023.

2.2 Estabilidade Térmica e Estratificação da Camada Limite Atmosférica

A atmosfera é composta por diferentes massas de ar com temperaturas e massas específicas distintas que sobem e descem de altitude de forma adiabática, isto é, sem troca de calor. Com a finalidade de avaliar a estratificação térmica dentro de uma CLA, pode-se utilizar a temperatura potencial como métrica de estabilidade (BARRIATO, 2018). Entende-se por temperatura potencial a temperatura que uma parcela de ar atingiria caso fosse expandida ou comprimida de forma adiabática a partir do seu estado de pressão e temperatura até uma pressão de referência. A temperatura potencial é definida pela Equação (1)

$$\theta = T \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{R}{c_p}} \quad (1)$$

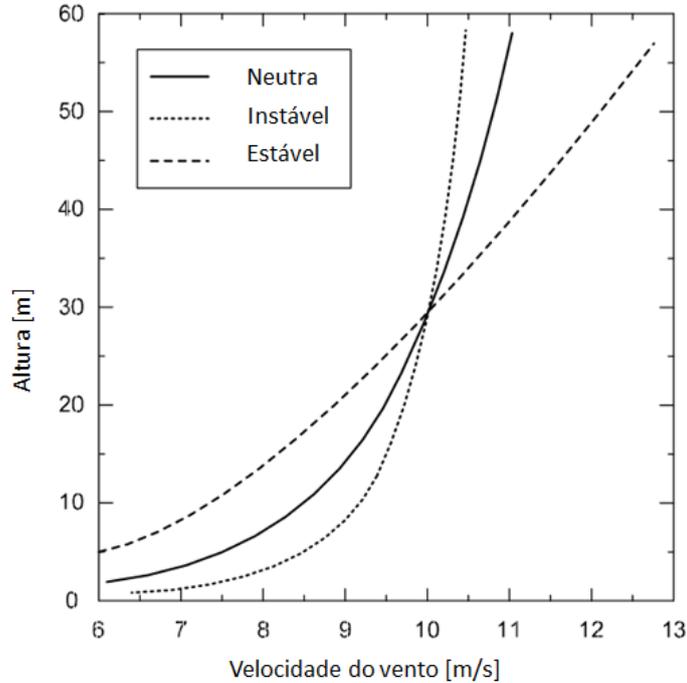
sendo θ a temperatura potencial, T a temperatura da parcela de ar, P a pressão da parcela de ar, P_0 a pressão de referência, geralmente tomada ao nível do mar, R a constante dos gases ideais para o ar e c_p o calor específico do ar seco à pressão constante.

A partir da taxa de variação vertical da temperatura potencial, isto é, tomando $\partial\theta/\partial z$, é possível definir três condições de estabilidade atmosférica: estável, instável e neutra. Quando a variação vertical da temperatura potencial é positiva ($\partial\theta/\partial z > 0$), a atmosfera é classificada como estável. Neste tipo de estabilidade o movimento vertical da massa de ar é suprimido, pois quando uma parcela de ar ascende adiabaticamente, ela se encontra mais fria que o ar ao seu entorno, tendendo a retornar para a sua posição original. Quando a variação vertical da temperatura potencial é negativa ($\partial\theta/\partial z < 0$), a atmosfera é classificada como instável e ocorre quando uma parcela de ar ascendente esfria, porém continua mais quente que o ar ao seu redor, intensificando o seu movimento vertical. Por último, quando a variação vertical da temperatura potencial é igual a zero ($\partial\theta/\partial z = 0$), a atmosfera é considerada como neutra e ocorre quando o resfriamento adiabático do ar à medida que ele sobe é tal que o ar permanece

em equilíbrio térmico com o seu entorno (BURTON et al., 2011). Para este trabalho, será realizada a simulação de uma CLA neutra.

Os perfis verticais de velocidade do vento para cada condição de estabilidade atmosférica podem ser visualizados pela Figura 3.

Figura 3 - Perfis de velocidade do vento para cada estabilidade atmosférica.



Fonte: adaptado de (GASCH; TWELE, 2012)

2.3 Equações Governantes

O escoamento do ar na camada limite atmosférica, assim como diversos fenômenos fluidodinâmicos, pode ser modelado através da equação da continuidade e das equações de Navier-Stokes, representadas em notação indicial, respectivamente, pelas Equações (2) e (3)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_v \quad (3)$$

sendo ρ a massa específica do ar, t o tempo, u_i e u_j as componentes de velocidade do ar nas respectivas direções de x_i e x_j (onde i e j possuem valores 1, 2 e 3, indicando os eixos x , y e z , respectivamente), p é a pressão estática do ar, μ a viscosidade dinâmica e S_v o termo fonte da quantidade de movimento do ar cujo valor engloba forças externas como por exemplo a aceleração da gravidade e o efeito Coriolis.

Embora as Equações (2) e (3) possam prever com precisão o comportamento de uma parcela de fluido de um escoamento, tais equações tornam-se computacionalmente inviáveis devido à sua extrema complexidade de resolução. Dessa forma, utilizam-se formulações e

modelos de turbulência nas simulações de escoamentos como alternativa a ter que resolver numericamente todas as escalas do problema (DUMONT, 2019).

As simulações de escoamentos turbulentos na camada limite atmosférica são frequentemente baseadas nas equações de Navier-Stokes com média de Reynolds, comumente conhecida por RANS, que permite analisar escoamentos turbulentos em um regime permanentemente “médio”. A formulação RANS é baseada na média das equações de Navier-Stokes após a decomposição de Reynolds, que consiste na separação dos campos de velocidade e pressão em duas parcelas: um valor médio através do tempo e uma componente flutuante (WILCOX, 2006). A decomposição da velocidade e da pressão é expressa, respectivamente, pelas Equações (4) e (5)

$$u_i = U_i + u'_i \quad (4)$$

$$p = P + p' \quad (5)$$

sendo U_i a velocidade média do fluido, u'_i a componente flutuante em torno da média, P a pressão média e p' a componente flutuante em torno da média.

Aplicando a decomposição de Reynolds em u e p nas Equações (2) e (3), obtém-se a equação da continuidade e as equações de Navier-Stokes com média de Reynolds (RANS) indicadas, respectivamente, pelas Equações (6) e (7)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u'_i u'_j}) + S_v \quad (7)$$

O termo $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ ao lado direito da Equação (7) representa os efeitos das flutuações turbulentas e é conhecido como *tensor de Reynolds*. A introdução deste termo resulta em mais incógnitas que equações para a solução do problema, assim, é necessário que este termo seja modelado para fechar o equacionamento, dando o nome de *problema de fechamento de turbulência* (POPE, 2000). Um método comum para resolver o fechamento do problema consiste em empregar a aproximação de Boussinesq (HINZE, 1975), que relaciona as tensões turbulentas aos gradientes locais do escoamento médio através do conceito da viscosidade turbulenta. A aproximação de Boussinesq é representada por

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

sendo μ_t a viscosidade turbulenta.

A 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 (RADÚNZ, 2018) presente na Equação (8). Diversos modelos de turbulência podem ser utilizados para a solução da equação, como o modelo Spalart-Allmaras, $k-\varepsilon$ e o modelo $k-\omega$. A aproximação de Boussinesq, utilizada nos modelos de turbulência acima citados, tem por vantagem apresentar um custo computacional relativamente baixo associado ao cálculo da viscosidade turbulenta (ANSYS, 2013). Neste trabalho, será utilizado o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ padrão.

2.4 Modelo $k-\varepsilon$

O modelo de turbulência $k-\varepsilon$ utiliza o conceito da viscosidade turbulenta, baseado na analogia entre a viscosidade molecular e o comportamento dos vórtices turbulentos (LAUNDER; SPALDING, 1974). Trata-se de um modelo semiempírico cujas equações são baseadas em considerações fenomenológicas e empíricas (ANSYS, 2013). Dentre os diversos modelos de turbulência utilizados na resolução de escoamentos turbulentos, o modelo $k-\varepsilon$ é conhecido por ser um modelo robusto, econômico e de eficiência razoável, sendo extensivamente utilizado ao longo dos anos nos campos de engenharia de vento e na avaliação de potência eólico (ANSYS, 2013; RODRIGO et al., 2008).

Juntamente com a equação da continuidade e das equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds e a aproximação de Boussinesq, o modelo $k-\varepsilon$ padrão realiza a modelagem utilizando as equações da energia cinética turbulenta k e da sua taxa de dissipação ε , sendo resolvidos, respectivamente, através das Equações (9) e (10)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon + S_k \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{\varepsilon 3} G_b) - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (10)$$

sendo σ_k e σ_ε os números de Prandtl turbulentos para as equações de transporte de k e ε , respectivamente, $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$ e $C_{\varepsilon 3}$ as constantes do modelo de turbulência, S_k o termo fonte para a equação do transporte de k e S_ε o termo fonte para a equação do transporte de ε , G_k e G_b os termos de produção de k por cisalhamento e por empuxo, respectivamente (ANSYS, 2013).

A viscosidade turbulenta pode então ser calculada em termos de k e ε através da Equação (11) (ANSYS, 2013).

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (11)$$

sendo C_μ uma constante adimensional.

As constantes utilizadas no modelo de turbulência $k-\varepsilon$ padrão são apresentadas através da Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Valores das constantes comumente utilizadas no modelo $k-\varepsilon$.

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

Fonte: ANSYS, 2013.

Para escoamentos atmosféricos, Katul et al. (2004) estabelecem o valor de C_μ como sendo 0,033, frequentemente utilizado para estes casos. A Equação (12) é utilizada para garantir que a solução do modelo apresente um perfil logarítmico para o vento com cisalhamento constante na região próxima ao solo.

$$\sigma_\varepsilon = \frac{\kappa^2}{C_\mu^{1/2} (C_{\varepsilon 2} - C_{\varepsilon 1})} \quad (12)$$

sendo κ a constante de von Kármán, cujo valor adimensional corresponde a 0,4187. Assim, utilizando os valores informados pela Tabela 2.1, juntamente com o novo valor de C_μ especificado, obtém-se o valor de $\sigma_\varepsilon = 2,01$.

A constante $C_{\varepsilon 3}$ da Equação (13) determina o grau no qual ε é afetado pelo empuxo e é calculado pela Equação (13). Observa-se que, à medida que o empuxo tende a crescer, $C_{\varepsilon 3}$ tende ao valor 1 e, à medida que o empuxo se torna desprezível, $C_{\varepsilon 3}$ tende ao valor 0.

$$C_{\varepsilon 3} = \tanh \left| \frac{v}{u} \right| \quad (13)$$

sendo v e u , respectivamente, as componentes de velocidade paralela e perpendicular com relação ao vetor de aceleração da gravidade (ANSYS, 2013). As novas constantes para a simulação de escoamentos atmosféricos estão resumidas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Valores das constantes atualizadas no modelo k - ε para a simulação de escoamentos atmosféricos.

C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	σ_k	σ_ε
0,033	1,44	1,92	1,0	2,01

Fonte: Katul et al. (2004).

3. METODOLOGIA

Esta seção abordará as etapas realizadas para a elaboração deste trabalho. De modo geral, a resolução de problemas em CFD dividem-se nas seguintes etapas: pré-processamento, simulação e pós-processamento (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). A etapa de pré-processamento consiste na definição do problema a ser resolvido através de CFD, na modelagem do domínio computacional e da geração da malha, na definição das propriedades físicas do fluido a ser simulado e na especificação das condições de contorno do domínio. A etapa de simulação consiste na configuração dos métodos de solução, nos esquemas de discretização e na definição do critério de convergência para a simulação do escoamento. A última etapa, o pós-processamento, envolve a análise dos resultados obtidos pela simulação realizada na etapa anterior através da geração de gráficos 2D e 3D, gráficos de contorno, animações do escoamento, bem como a exportação dos dados para a utilização em softwares terceiros.

3.1 Desenvolvimento das Geometrias e Domínio Computacional

Para o escoamento livre da CLA, definiu-se uma geometria prismática com dimensões de 2000 m de comprimento no eixo longitudinal na direção Y, 360 m de largura no eixo transversal na direção X e 500 m de altitude na direção Z. Para a modelagem do domínio computacional para o escoamento da CLA com a presença da FPSO, utiliza-se um domínio externo com as mesmas dimensões do escoamento livre com a inserção de uma região interna contendo a geometria da FPSO. Isto é realizado para que exista uma região com volumes de malha que mais se adequem a geometria da plataforma e permita um maior refinamento próximo à superfície da plataforma, de forma a apresentar cálculos mais precisos sem comprometer com o custo computacional. Para realizar a simulação da CLA com a presença da FPSO, utilizou-se como base a FPSO Pioneiro de Libra da Petrobras. A FPSO Pioneiro de Libra é um navio-plataforma com capacidade de produção de 50 mil barris de petróleo por dia e de compressão

de 4 milhões de m³ de gás natural por dia, podendo operar em lâmina d'água de até 2400 m (PETROBRAS, 2021). A Tabela 3.1 apresenta as principais características da FPSO.

Tabela 3.1 - Características da FPSO Pioneiro de Libra.

Comprimento [m]	Largura [m]	Profundidade [m]	Casco [m]
310,15	50,5	22,4	15,5

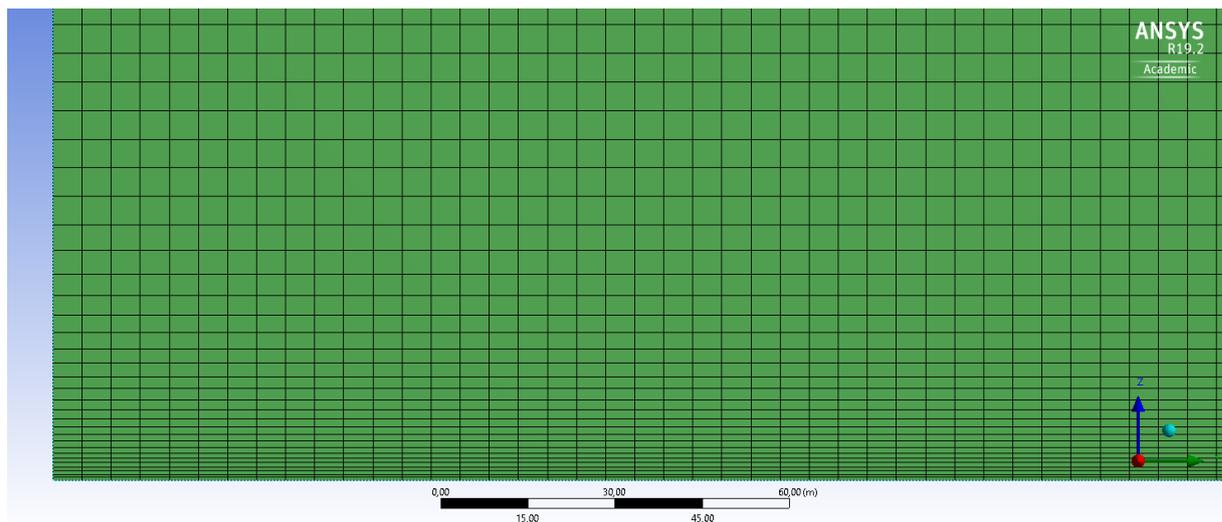
Fonte: O autor.

Um primeiro modelo 3D aproximado da FPSO em escala real foi criado para ser utilizado dentro do escoamento da CLA modelado previamente, no qual buscou-se representar as estruturas montadas em cima da FPSO, como andaimes, torres e estruturas que englobam maquinários e tubulações. Entretanto, uma representação muito próxima da plataforma demandaria um poder de processamento muito alto por parte do computador durante a simulação. Dessa forma, optou-se por simplificar as estruturas em cima da FPSO com blocos de geometrias simples. Embora a FPSO possua profundidade de 22,4 m, parte do casco se encontra submerso a 15,5 m de profundidade, assim, como a interação entre a CLA e a parte submersa é inexistente, parte da geometria do casco foi removida, resultando em uma diferença de altura de 6,9 m do nível do mar até o piso da FPSO. O detalhamento da construção da geometria da FPSO e dos domínios computacionais para os dois estudos de caso, além de uma fotografia da FPSO Pioneiro de Libra é apresentado no APÊNDICE A.

3.1.1 Malha Gerada para o Escoamento Livre

A malha para o escoamento livre da CLA neutra pode ser observada pela Figura 4.

Figura 4 – Vista aproximada da malha computacional utilizada para simulação da CLA neutra sem a presença da FPSO.



Fonte: O autor.

Durante a geração da malha do escoamento livre, para definir a quão refinada a mesma precisa ser para apresentar uma solução aceitável, aplicou-se o método de convergência de malha (GCI). Assim, diminuiu-se progressivamente o tamanho dos volumes e a zona de inflação para cada malha. Para a taxa de crescimento da altura dos volumes, definiu-se o valor

de 1,1 para todas as malhas. A Tabela 3.2 resume os parâmetros utilizados para a geração de cada malha. Os resultados do GCI são apresentados ao final desta seção.

Tabela 3.2 – Parâmetros das malhas utilizados em cada simulação. A malha M1 é a malha mais refinada enquanto que a malha M3 é a menos refinada.

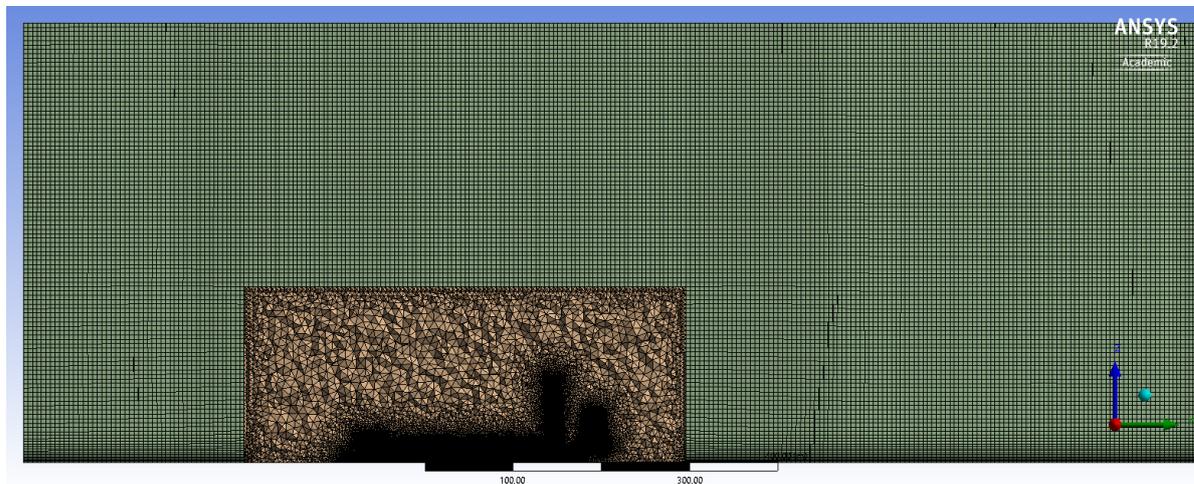
Malha	Tamanho do volume [m]	Z1 [m]	Nº de volumes
M3	10,0	1,00	475200
M2	7,5	0,75	1046976
M1	5,0	0,50	3340800

Fonte: O autor.

3.1.2 Malha Gerada para o Escoamento com a FPSO

Para a geração da malha com a FPSO, definiu-se um tamanho de volume de 5 m para o domínio externo de geometria hexaédrica. Para o crescimento da altura dos volumes, definiu-se a altura do primeiro volume como sendo 0,5 m, utilizando a mesma taxa de crescimento de 1,1. Para o domínio interno, optou-se por utilizar volumes tetraédricos, pois melhor se adaptavam na superfície da plataforma. A estruturação da malha pode ser vista pela Figura 5. É possível ver a FPSO na região mais sombreada dentro do domínio interno, onde há maior refinamento da malha. A malha possui no total 7677388 volumes.

Figura 5 – Malha computacional utilizada para a simulação da CLA neutra com a FPSO.



Fonte: O autor.

3.2 Condições de Contorno

Para resolver as equações descritas na fundamentação teórica, as condições de contorno precisam ser especificadas e implementadas corretamente no software empregado. Na fronteira de entrada do domínio, os perfis de velocidade, energia cinética turbulenta e sua taxa de dissipação para a CLA neutra podem ser calculados através das Equações (14), (15) e (16), de acordo com a Teoria de Similaridade de Monin-Obukov (RODRIGO et al., 2008). As equações são implementadas no Ansys Fluent através de uma *User Defined Function* (UDF) escritas em linguagem C. O código é disponibilizado no APÊNDICE B. A velocidade $U(z)$ é prescrita para a direção Y do escoamento

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (14)$$

$$k(z) = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (15)$$

$$\varepsilon(z) = \frac{u_*^3}{\kappa z} \quad (16)$$

sendo u_* a velocidade de fricção e z_0 a altura de rugosidade, utilizadas pela Equação (14). Para a CLA neutra, utilizou-se os valores como sendo $z_0 = 2,7 \times 10^{-4} \text{ m}$ e $u_* = 0,380 \text{ m/s}$, obtidos através do trabalho de Sehn (2021)

$$z_0 = 0,0185 \frac{u_*^2}{g} \quad (17)$$

Na fronteira de saída do domínio, prescreveu-se a pressão manométrica como sendo zero e a energia cinética de turbulência k e sua taxa de dissipação ε igual à da fronteira de entrada em caso de escoamento reverso. A superfície do mar foi considerada como parede com condição de não-deslizamento, além disso, o valor de z_0 não foi especificado para a parede, pois foi utilizada a função de parede de Menter-Lechner. Para as laterais e o topo da malha, foi considerada a condição de contorno de simetria.

3.3 Configurações do Software de Simulação

Para a simulação dos escoamentos, o algoritmo *Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations* (SIMPLE) foi utilizado como método de solução para resolver as equações de quantidade de movimento e pressão. Para os esquemas de discretização, utilizou-se o esquema *second order* para a pressão e para a quantidade de movimento. Para a energia cinética turbulenta e a taxa de dissipação, foi utilizado o esquema *second order upwind*. Para o escoamento livre, os resíduos foram configurados para 10^{-7} , enquanto que para o escoamento com a presença da FPSO, os resíduos foram configurados na para 10^{-5} , embora o ε não tenha atendido totalmente ao critério, se mantendo na ordem de 10^{-4} , fazendo-se necessário um aprimoramento da malha computacional para futuros trabalhos.

3.4 Pós-processamento e Comparação dos Resultados

Após realizadas as simulações, os dados foram tratados através do pacote CFD-Post do Ansys Fluent. Foram geradas cinco linhas orientadas no eixo Z, equidistantes uma das outras na extensão do eixo longitudinal, resultando nas posições $y = 0 \text{ m}$, $y = 500 \text{ m}$, $y = 1000 \text{ m}$, $y = 1500 \text{ m}$ e $y = 2000 \text{ m}$ dentro do domínio computacional. Configuradas para ler até 250 amostras ao longo de seu comprimento, as linhas possuem intervalos de leituras de 2 m. Essas linhas são utilizadas para obter a evolução dos perfis verticais para uma determinada variável de interesse, como a velocidade, a energia cinética turbulenta e sua taxa de dissipação.

Além das linhas verticais, foram definidos 8 pontos de medição nas alturas $z = 40 \text{ m}$, $z = 60 \text{ m}$, $z = 80 \text{ m}$, $z = 100 \text{ m}$, $z = 120 \text{ m}$, $z = 140 \text{ m}$, $z = 160 \text{ m}$ e $z = 180 \text{ m}$, cujos

pontos simulam as alturas de medições realizadas a partir do local de instalação do sensor LiDAR e serão utilizados para comparar os valores lidos pelo instrumento e calcular o erro relativo entre as medições nos dois casos de escoamento. A escolha destas alturas é devido aos limites do LiDAR, no qual a distância mínima para medição é de 40 m e as medições são realizadas em intervalos de 20 m. Para este trabalho, optou-se por fixar o instrumento na parte superior da região central da ponte³ do FPSO.

3.5 Estudo da Qualidade da Malha

O estudo da malha para o escoamento da CLA neutra sem a presença da FPSO foi realizado de acordo com o trabalho realizado por Roache (1994). Pela Tabela 3.3, são apresentados os valores da propriedade de interesse. Neste caso, utilizou-se a média das velocidades obtidas através dos diferentes pontos de medição do LiDAR definidos no pós-processamento. Por último a solução exata obtida pela extrapolação de Richardson V_R é apresentada na tabela.

Tabela 3.3 - Velocidade média do vento atmosférico obtidas para cada malha utilizado no estudo de convergência.

Malha	Quantidade de volumes	Velocidade média [m/s]
M3	475200	11,8712234
M2	1046976	11,8708933
M1	3340800	11,8708646
V_R	-	11,8708636

Fonte: O autor.

Pela tabela, é possível observar que a velocidade média apresentada pela malha M1 possui valor próximo da solução exata obtida pela extrapolação de Richardson, apresentando erro absoluto de aproximadamente 0,00286%. Os valores do GCI são apresentados pela Tabela 3.4. Por não ter sido realizado um estudo da qualidade da malha com a presença da FPSO e, apesar de todas as malhas apresentem resultados próximos da solução exata, optou-se por utilizar a configuração da malha mais refinada para o domínio computacional com a presença da FPSO para que seja possível a comparação dos resultados de ambos os casos.

Tabela 3.4 – Índice de Convergência de Malha.

Índice de Convergência	
GCI_{32}	3,1007e-6
GCI_{21}	1,0535e-7

Fonte: O autor.

4. RESULTADOS

Esta seção apresentará os resultados obtidos pelas simulações numéricas da CLA neutra para os dois casos. Primeiramente, são apresentados os dados obtidos pela simulação da CLA sem a presença da FPSO, no qual é avaliado o desenvolvimento dos perfis de velocidade,

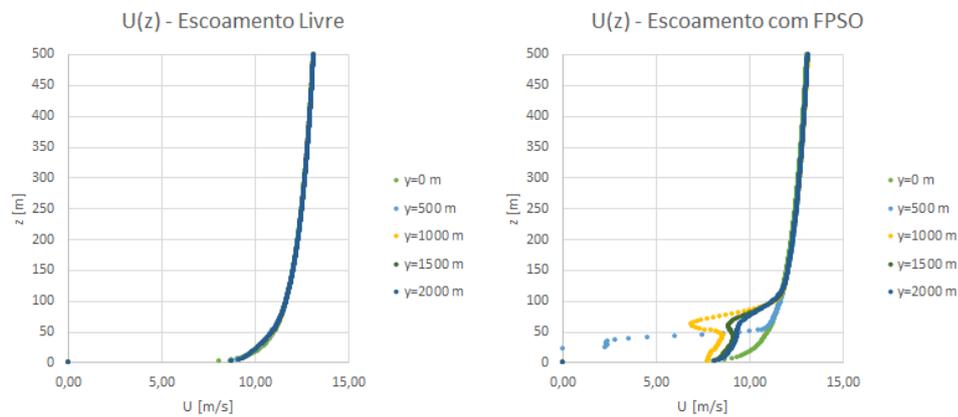
³ Local onde está localizada a cabine de controle, alojamento e demais compartimentos utilizados pelos tripulantes.

energia cinética turbulenta e sua taxa de dissipação ao longo do domínio computacional, e que serve de base para comparação com os dados obtidos pela simulação do segundo caso. Ao lado direito dos gráficos do primeiro caso, são apresentados os dados obtidos pela simulação da CLA com a presença da FPSO, sendo avaliado também o desenvolvimento dos perfis das mesmas propriedades, realizando uma comparação com o primeiro caso. Por último, é realizado uma comparação numérica entre os pontos de medição que seriam lidos pelo sensor LiDAR em ambos os escoamentos. Para melhor entendimento sobre a interação entre a CLA e a FPSO oriunda da simulação, gráficos de contorno da velocidade do vento sobre a FPSO e as linhas de corrente podem ser vistos no ANEXO A e no ANEXO B, respectivamente

4.1 Análise do Desenvolvimento dos Perfis ao Longo do Escoamento

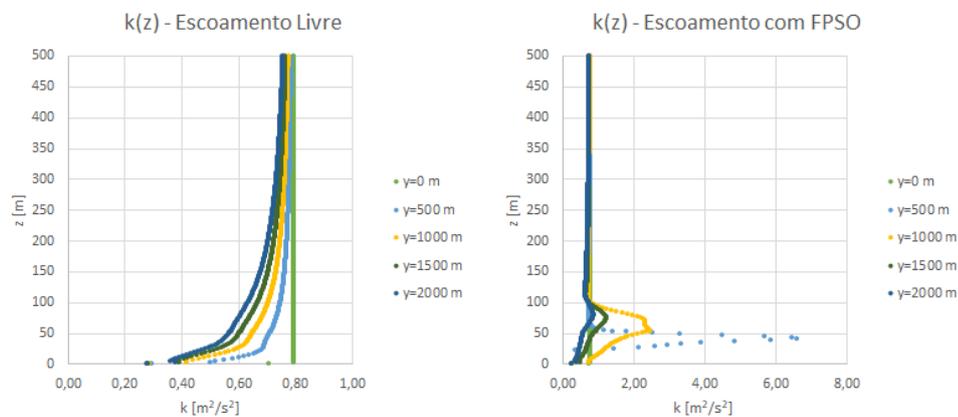
As Figuras 6, 7 e 8 exibem, respectivamente, o comportamento dos perfis de velocidade, energia cinética turbulenta e sua taxa de dissipação ao longo do domínio computacional para a CLA neutra para os dois casos. A hipótese do escoamento atmosférico horizontalmente homogêneo é utilizada para validar o escoamento em ambiente offshore. Pode-se verificar que há uma distorção localizada dos perfis até 100 m de altitude, região que compreende a presença da FPSO. Após os 100 m, o comportamento dos perfis permanece inalterado.

Figura 6 – Comparação entre os perfis de velocidade do vento $U(z)$ obtidos pela simulação da CLA neutra para os dois casos.



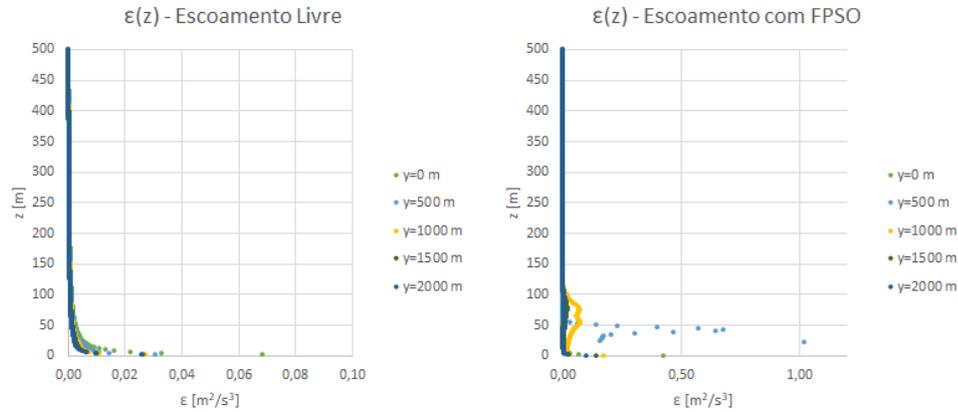
Fonte: O autor.

Figura 7 - Comparação entre os perfis da energia cinética turbulenta $k(z)$ do vento obtidos pela simulação da CLA neutra para os dois casos.



Fonte: O autor.

Figura 8 – Comparação entre os perfis de taxa de dissipação cinética turbulenta $\epsilon(z)$ do vento obtidos pela simulação da CLA neutra para os dois casos.



Fonte: O autor.

4.2 Comparação com os Pontos de Medição

A Tabela 4.1 exibe o valor da velocidade obtida pelos pontos que simulando a leitura do sensor LiDAR nos dois casos de escoamento. Pela tabela, é possível observar que o maior erro percentual referente à velocidade do vento encontra-se à 40 m de distância do sensor LiDAR, apresentando desvios menores que 3%. Pode-se averiguar também que, à medida que o instrumento realiza medições em alturas cada vez maiores, menor são os desvios. Por último, constata-se que as componentes de velocidade u e v apresentaram baixos desvios, com erros na ordem de 10^{-2} . O escoamento simulado apresenta velocidade predominante ao longo da coordenada y . A direção do vetor velocidade foi avaliada considerando-se o eixo x como referência e também se manteve praticamente inalterada ao longo das alturas de medição.

Tabela 4.1 - Dados da velocidade obtidos pelos diferentes pontos de medição.

Z [m]	U [m/s]			Escoamento Livre			Escoamento FPSO			E.R.
	Livre	FPSO	E.R.	v [m/s]	u [m/s]	θ	v [m/s]	u [m/s]	θ	
40 m	11,277	11,598	2,851%	11,276	0	90	11,568	0,006	89,970	0,0337%
60 m	11,516	11,713	1,713%	11,516	0	90	11,705	0,003	89,987	0,0149%
80 m	11,704	11,844	1,193%	11,704	0	90	11,841	0,005	89,976	0,0271%
100 m	11,860	11,969	0,919%	11,860	0	90	11,967	0,004	89,983	0,0189%
120 m	11,993	12,085	0,773%	11,992	0	90	12,084	0,003	89,984	0,0182%
140 m	12,108	12,190	0,675%	12,108	0	90	12,189	0,003	89,985	0,0162%
160 m	12,211	12,286	0,614%	12,211	0	90	12,285	0,003	89,987	0,0143%
180 m	12,303	12,372	0,567%	12,303	0	90	12,372	0,002	89,989	0,0119%

Fonte: O autor.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho realizou-se um estudo da influência da geometria da FPSO no perfil de velocidades do vento de uma CLA neutra em alto mar com o objetivo de verificar se os dados

lidos pelo sensor LiDAR podem apresentar valores distorcidos. Para o estudo, foram realizadas duas simulações: um escoamento livre e outro escoamento com a FPSO, usando como base a FPSO Pioneiro de Libra. O processo de desenvolvimento das geometrias e do domínio computacional através do uso do software SpaceClaim foi abordado na seção de metodologia. Utilizando a formulação RANS e o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ no software de simulação Ansys Fluent, foi possível obter dados de ambos os casos, como o perfil de velocidade do vento, a energia cinética turbulenta e a sua taxa de dissipação. Ao final, foi realizada uma análise comparativa entre os dois casos simulados.

A análise dos dados obtidos pelo software numérico permitiu obter informações relevantes a respeito da interação do escoamento atmosférico com a geometria da FPSO. Pode-se verificar que existe uma distorção localizada dos perfis de velocidade, energia cinética turbulenta e sua taxa de dissipação entre o nível do mar até 100 m de altitude, região afetada pela presença da FPSO. Após os 100 m de altitude, os perfis apresentaram distorção mínima. Por último, foi realizada uma comparação entre os dados lidos pelo sensor LiDAR em diferentes pontos de medição e constatou-se que o maior desvio ocorreu à 40 m de distância do equipamento de medição, apresentando desvios menores que 3%. Além disso, pode-se observar que à medida que as medições eram realizadas para alturas cada vez maiores, menores foram os desvios apresentados. Com relação às componentes de velocidade u e v , observou-se pouca alteração na direção do vento nos pontos de medição do LiDAR, apresentando erros percentuais na ordem de 10^{-2} . A partir da comparação do desenvolvimento dos perfis ao longo do escoamento para os dois casos, além dos dados obtidos pelos pontos de medição, pode-se inferir que para regiões afastadas da plataforma, o perfil de velocidades do vento não sofre influência significativa da geometria da FPSO.

Para trabalhos futuros, sugere-se a simulação com a geometria mais detalhada da FPSO com a finalidade de se obter com maiores detalhes a interação entre a geometria da plataforma e a CLA, analisando juntamente o desenvolvimento dos perfis de velocidade, energia cinética turbulenta e sua taxa de dissipação ao longo do escoamento. Para a validação da simulação da CLA neutra com a presença da FPSO, recomenda-se a realização de experimentos em túnel de vento para verificar se os valores obtidos pela simulação numérica estão de acordo com os valores obtidos experimentalmente. Além das simulações realizadas neste trabalho sobre uma CLA neutra, sugere-se a realizar um estudo comparativo com simulações realizadas nas condições de CLA estável e instável. A realização das simulações com diferentes modelos de turbulência como o modelo $k-\omega$ também é sugerido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEEÓLICA - Associação Brasileira de Energia Eólica. **Boletim Anual de Geração Eólica 2021**. 2022. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/>. Acesso em: 24 jan. 2023.

ANSYS. **ANSYS Fluent Theory Guide**. Release 15. Novembro, 2013.

BARRIATTO, L. **Efeitos Da Estabilidade Atmosférica Na Modelagem Do Escoamento Para Aplicações No Setor De Energia Eólica**. 2018.

BRAGA, C. B. **Avaliação do Desempenho no Ponto de Projeto de Turbinas a gás em operação na Bacia de Campos**. 2013. 74 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Naval e Oceânica, Centro de Tecnologia Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10007501.pdf>. Acesso em: 19 set. 2019.

BURTON, T.; JENKINS, N.; SHARPE, D. **Wind Energy Handbook**, Second Edition

DUMONT, G. B. **Análise do Potencial Eólico de um Terreno Complexo Empregando Modelagem Numérica da Camada Limite Atmosférica via OpenFOAM**. 2019. 40 f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/200099>. Acesso em: 26 jan. 2023

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Roadmap Eólica Offshore Brasil**. 2020

GASCH, R.; JOCHEN TWELE. **Wind Power Plants : Fundamentals, Design, Construction and Operation**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012.

GOIT, J. P.; YAMAGUCHI, A.; ISHIHARA, T. Measurement and Prediction of Wind Fields at an Offshore Site by Scanning Doppler LiDAR and WRF. **Atmosphere**, v. 11, n. 5, p. 442, 28 abr. 2020.

GOTTSCHALL, J.; GRIBBEN, B.; STEIN, D; WÜRTH, I. Floating lidar as an advanced offshore wind speed measurement technique: current technology status and gap analysis in regard to full maturity. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment**, v. 6, n. 5, p. e250, 9 maio 2017.

HASAGER, C. B.; STEIN, D.; COURNTEY, M.; PEÑA, A.; MIKKELSEN, T.; STICKLAND, M.; OLDROYD, A. Hub Height Ocean Winds over the North Sea Observed by the NORSEWInD Lidar Array: Measuring Techniques, Quality Control and Data Management. **Remote Sensing**, v. 5, n. 9, p. 4280–4303, 5 set. 2013.

HINZE, J. O. **Turbulence McGraw-Hill**. New York, 1975

IEA WIND - International Energy Agency Wind Technology Collaboration. **Annual Report**. 2020

KATUL, G. G.; MAHRT, L.; POGGI, D.; SANZ, C. **One- and two-equation models for canopy turbulence**. Boundary Layer Meteorology, 2004.

LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B., The numerical computation of turbulent flows. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 3, 1974.

ORTIZ, G. P.; KAMPEL, M. **Potencial de Energia Eólica offshore na margem do Brasil**. In: V SIMPÓSIO BRASILEIRO DE OCEANOGRAFIA. 2011, Santos. Anais [...] São Paulo: SBO, 2011. p. 1-4. Disponível em: <http://mtc-m16d.sid.inpe.br>. Acesso em: 24 jan. 2023.

PETROBRAS, **Programa de Descomissionamento de Instalações Marítimas, FPSO Pioneiro de Libra (Campo de Mero)**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/seguranca-operacional-e-meio-ambiente/arq/ppdi/pdi-conceitual-fpso-spa2.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2023.

POPE, S. B., **Turbulent Flows**. Cambridge University Press, 1ª edição, 2000.

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.

ROACHE, P. J. Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies. **Journal of Fluids Engineering**, v. 116, n. 3, p. 405–413, 1 set. 1994.

RODRIGO, J.; MARTINEZ, D.; PÉREZ, I.; PATILLA, P.; VAN BEECK, J. **Numerical CFD modelling of non-neutral atmospheric boundary layers for offshore wind resource assessment based on Monin-Obukhov theory**. Disponível em: <https://oa.upm.es/20944/>. Acesso em: 2 abr. 2023.

SEHN, I. G. **Modelagem da Camada Limite Atmosférica Termicamente Estratificada Via Ansys Fluent Para Aplicação em Análise do Potencial Eólico Offshore**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SIMÃO, R. **Caracterização do Escoamento Atmosférico em Terreno Complexo com Dispositivo de Medição Remota LIDAR**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

STICKLAND, M.; FABRE, S.; SCANLON, T.; OLDROYD, T.; MICKELSON, T.; ASTRUP, P. CFD Technique for Estimating Flow Distortion Effects on Lidar Measurements When Made in Complex Flow Fields. Engineering Applications of **Computational Fluid Mechanics**, v. 7, n. 3, p. 324–333, jan. 2013.

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

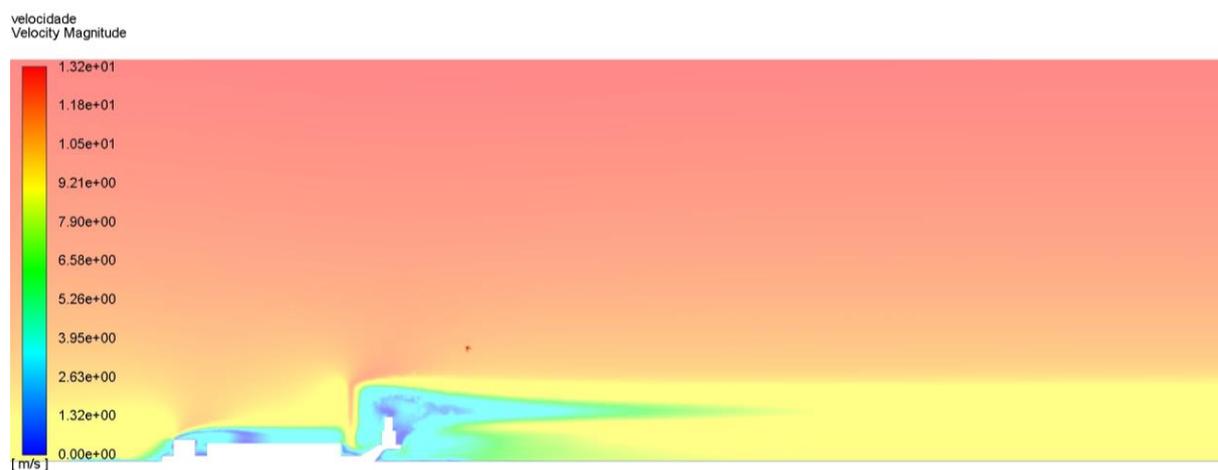
TABASNIK, M. M. **Estudo Energético e Ambiental de Parque Eólico Offshore Como Suplemento à Turbina a Gás Para Fornecimento de Energia a Plataformas de Petróleo**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

VERSTEEG, H. K.; WEERATUNGE MALALASEKERA. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. Harlow: Pearson Education, 2007.

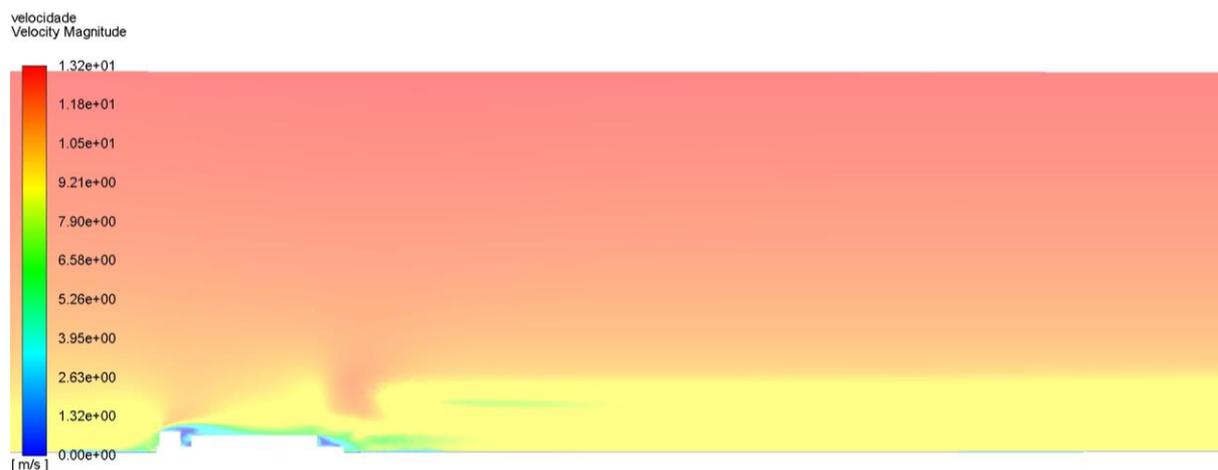
WHITE, F. M. **Fluid mechanics**. New York, Ny: Mcgraw-Hill Education, 2017.

ANEXO A – Gráfico de Contorno da Velocidade Sobre a FPSO

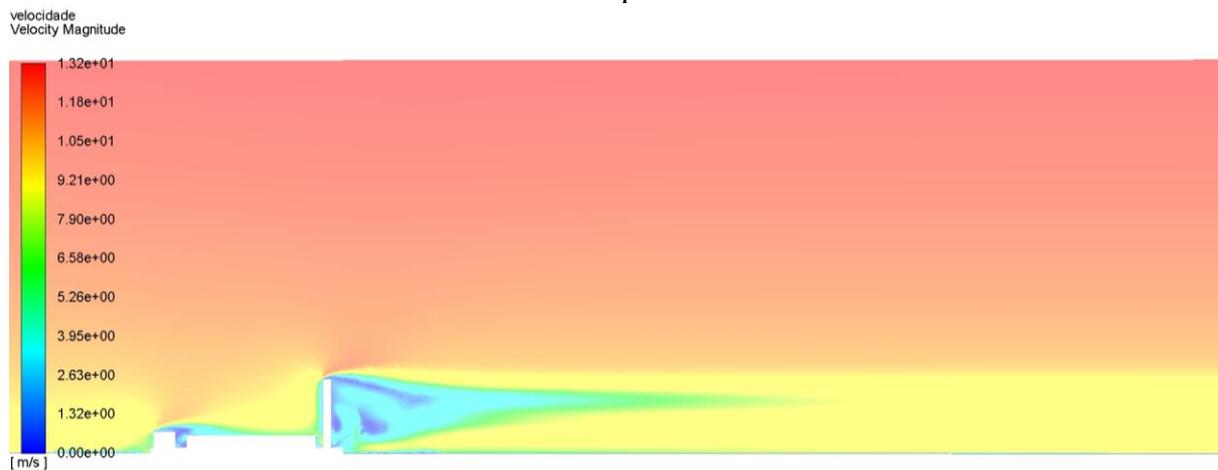
Centro



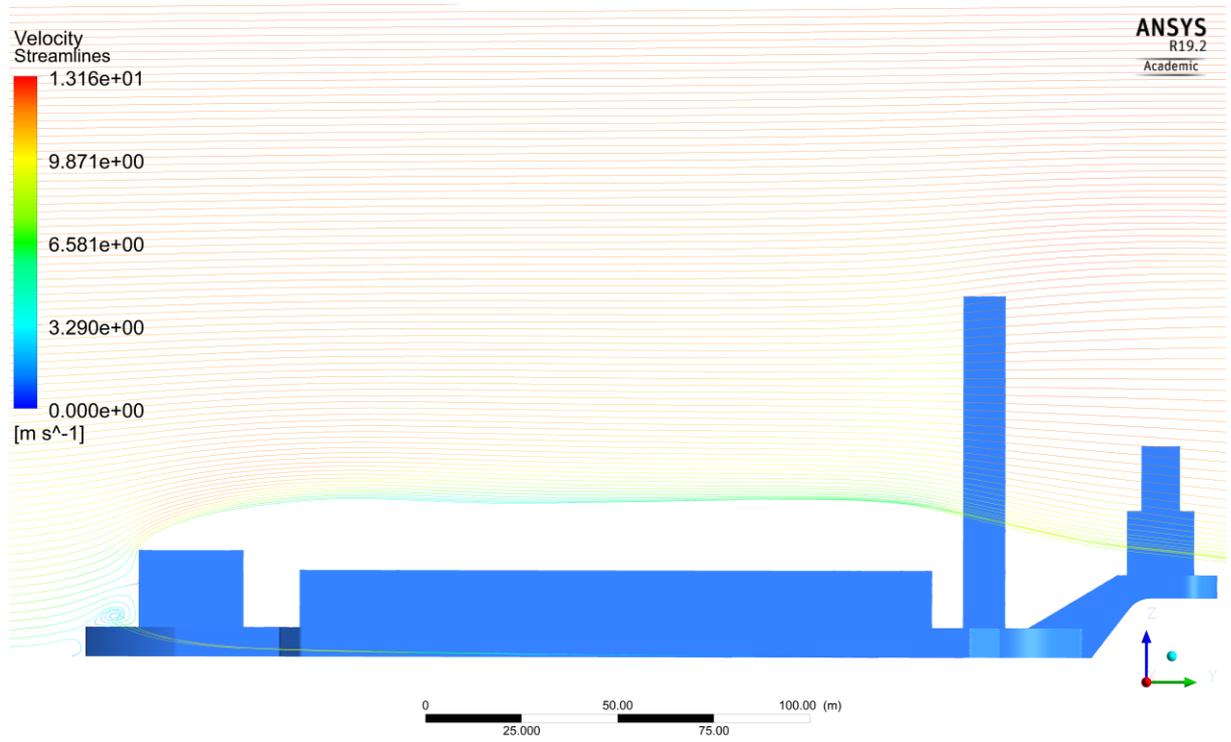
20 m ao lado direito da FPSO



20 m ao lado esquerdo da FPSO

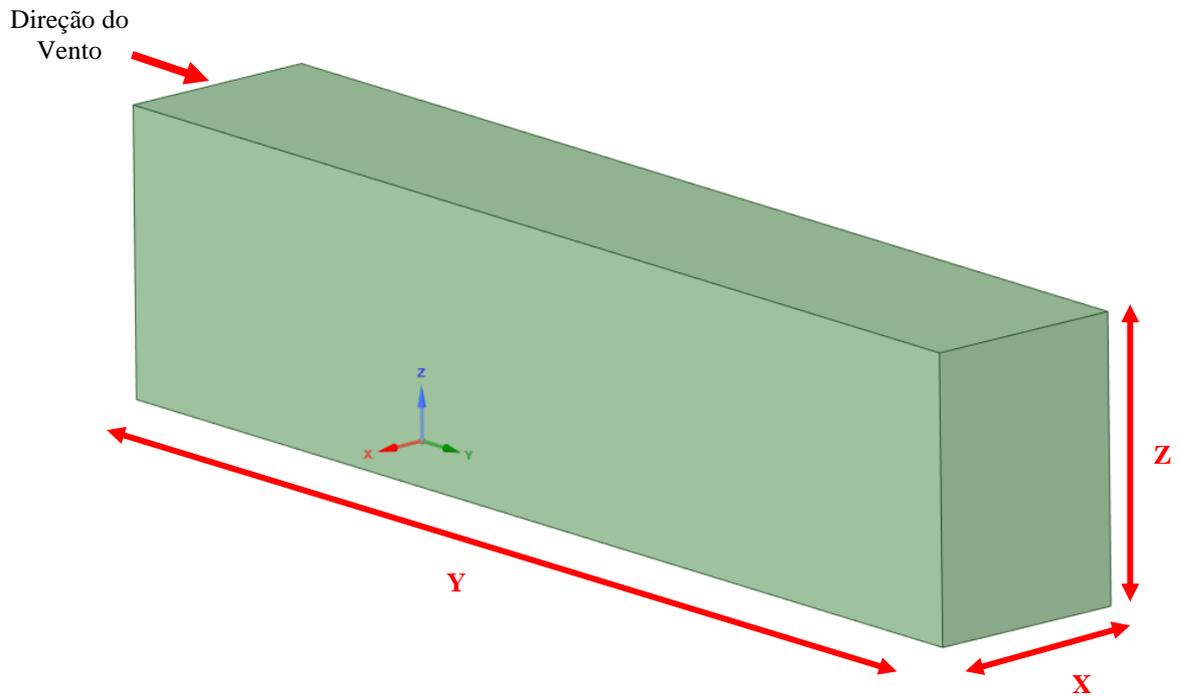


ANEXO B – Linhas de Corrente Sobre a FPSO



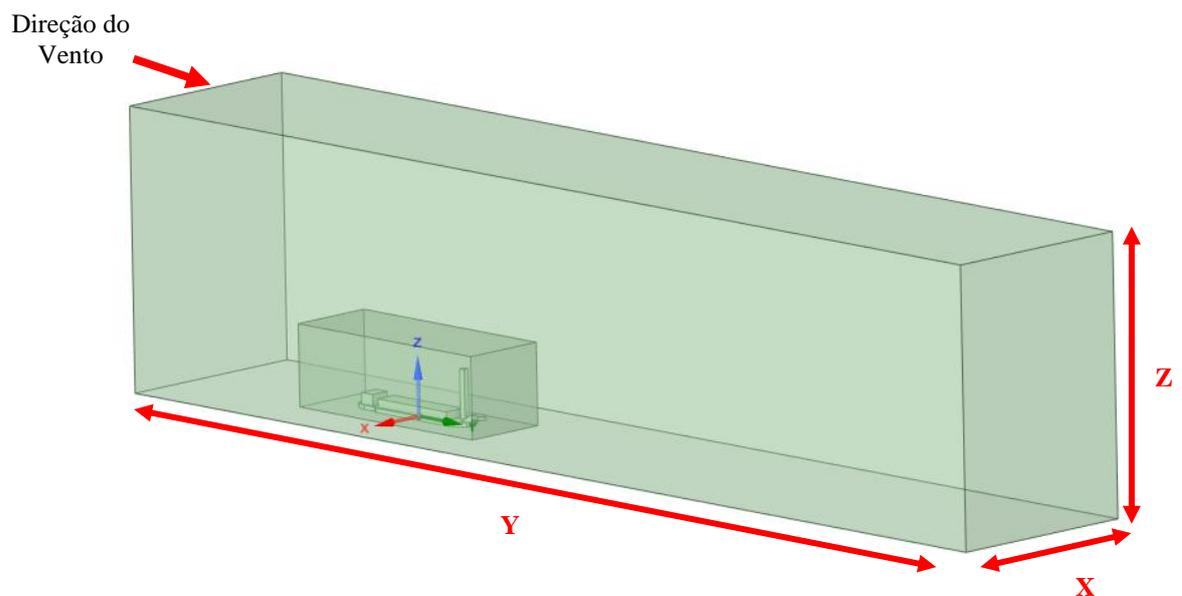
APÊNDICE A – Modelagem dos Domínios Computacionais

Figura A.1 - Geometria 3D do domínio computacional para o escoamento livre da CLA.



Fonte: O autor.

Figura A.2 - Geometria 3D do domínio computacional para o escoamento da CLA com a FPSO.



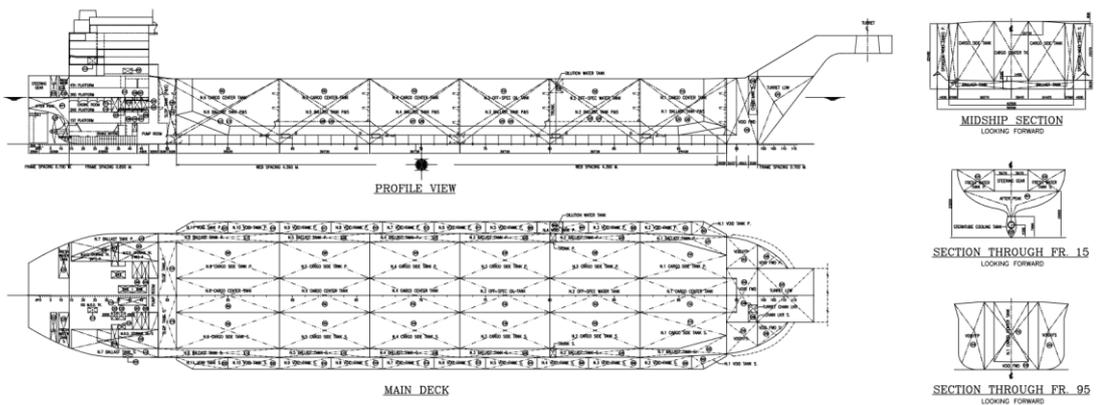
Fonte: O autor.

Figura A.3 - FPSO Pioneiro de Libra.



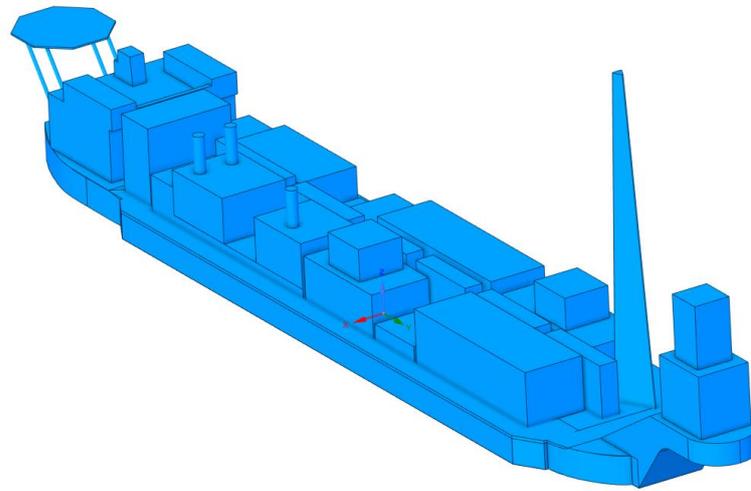
Fonte: (PETROBRAS, 2021)

Figura A.4 - Desenho técnico da FPSO Pioneiro de Libra.

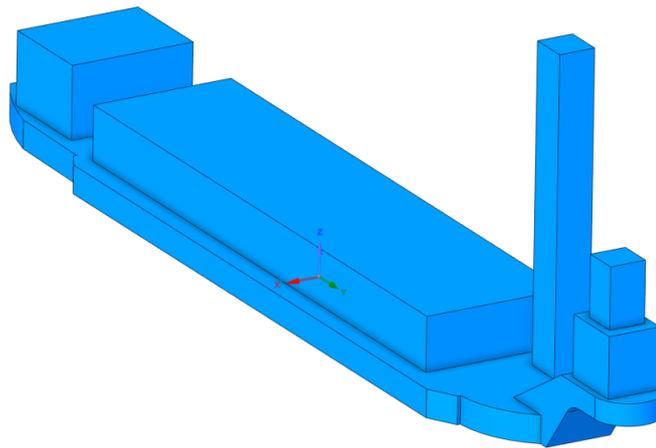


Fonte: (PETROBRAS, 2021)

Figura A.5 - Modelos 3D da FPSO Pioneiro de Libra. (a) Modelo aproximado.
(b) Modelo simplificado.



(a)



(b)

Fonte: O autor.

APÊNDICE B – User Defined Function Para 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[2];
        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[2];
        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[2];
        F_PROFILE(f, thread, position) = pow(u_estrela,2) / sqrt(cmu) ;
    }
    end_f_loop(f, thread)
}

```