



APLICAÇÃO DE CFD NA AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA DE
HELICÓPTEROS OFFSHORE SOB EMISSÃO DE GASES QUENTES

Igor Maiello Maia

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Gustavo Rabello dos Anjos

Rio de Janeiro
Outubro de 2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Departamento de Engenharia Mecânica

DEM/POLI/UFRJ

Politécnica
UFRJ

APLICAÇÃO DE CFD NA AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA DE
HELICÓPTEROS OFFSHORE SOB EMISSÃO DE GASES QUENTES

Igor Maiello Maia

PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO MECÂNICO.

Aprovado por:

Prof. Gustavo Rabello dos Anjos, Ph.D

Prof. Raquel Jahara Lobosco, D.Sc.

Prof. Gabriel Lisbôa Verissimo, D.Sc

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

OUTUBRO DE 2025

Maiello Maia, Igor

Aplicação de CFD na Avaliação da Segurança de Helicópteros Offshore sob Emissão de Gases Quentes/ Igor Maiello Maia. – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2025.

XX, 70 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Gustavo Rabello dos Anjos

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Mecânica, 2025.

Referências Bibliográficas: p. 66 – 70.

1. CFD. 2. Helicóptero. 3. Offshore. 4. Gases quentes. 5. Mecânica dos Fluidos. I. Rabello dos Anjos, Gustavo. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Curso de Engenharia Mecânica. III. Aplicação de CFD na Avaliação da Segurança de Helicópteros Offshore sob Emissão de Gases Quentes.

*A tudo e a todos que me fazem
querer estar vivo.*

Agradecimentos

À minha mãe Simone e ao meu pai Eduardo, que tornaram essa graduação possível, através de confiança, apoio e suporte. Vocês são minha referência em termos de dedicação, perseverança e luta. Amo vocês, e muito obrigado.

Aos meus amigos que me acompanham desde o Ensino Fundamental em diante: João Vitor Marques, Gabriel Andrade, Daniel Oliveira, Daniel Maia, Erick Bomfim, Diana Tabach, Rafaela Amitrano e Giovana Zandonadi. Mesmo em universidades e campi diferentes, foi um prazer dividir essa época das nossas vidas com vocês.

Aos amigos que fiz graças à UFRJ: Caio Souza, Camael Garcia, Ciro Riomar, Davi Cabral, Eduardo Sousa, Fernando Coelho, Gabriel Antunes, Igor Mercês, Joyce Paulino, João Pedro Campos, Lucas Gaspar, Luís Fernando Julião, Maria Fernanda Rocha, Nathalia Casanova, Pedro Corais, Pedro Henrique Silva, Thiago Louzada, Victor Duran e Vinícius Brasil. Que privilégio poder chamar todos vocês de amigos.

Às atividades extracurriculares que participei durante a graduação — Minerva Aerodesign, ASME UFRJ e Núcleo Interdisciplinar de Dinâmica dos Fluidos —, agradeço pela oportunidade e por todo o desenvolvimento pessoal e profissional que me proporcionaram.

À Petrobras, agradeço pela oportunidade de estagiar nessa grande empresa, por me apresentar a tantas pessoas importantes que contribuíram para a minha formação e por ter marcado o início da minha carreira profissional.

Aos professores e funcionários da universidade, em especial ao professor Gustavo Rabello, que embora eu só o tenha conhecido no meu último semestre da graduação, foi uma honra ser orientado por ele. Muito obrigado a todos.

Finalmente, obrigado ao sistema público de educação pela oportunidade, em especial à Universidade Federal do Rio de Janeiro, por abrir as suas portas para mim e promover tantas possibilidades e aprendizados na minha vida.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico

APLICAÇÃO DE CFD NA AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA DE HELICÓPTEROS OFFSHORE SOB EMISSÃO DE GASES QUENTES

Igor Maiello Maia

Outubro/2025

Orientador: Gustavo Rabello dos Anjos

Programa: Engenharia Mecânica

Este trabalho apresenta, por meio da metodologia de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), uma avaliação dos riscos das operações de helicópteros em plataformas *offshore* com emissão de gases quentes. Com a crescente expansão da exploração de petróleo no país, o helicóptero se tornou o modal mais utilizado para o transporte de pessoas para plataformas *offshore*, devido à sua maior eficiência, rapidez e segurança. Para o estudo, primeiramente, a geometria foi construída com base em dimensões reais de uma plataforma do tipo semissubmersível, e a malha foi gerada. A metodologia empregada para a resolução do escoamento foi o Método dos Volumes Finitos, através do *software* Ansys/CFX. Além disso, foi utilizado o modelo de turbulência *Shear Stress Transport* (SST) para a obtenção dos resultados. Os casos analisados variaram de acordo com a direção e magnitude do vento. Para cada caso de direção do vento (Sul-sudeste, Sudeste e Leste-sudeste), foram testadas as velocidades 1, 7 e 15 metros por segundo, mantendo-se as mesmas condições de emissão dos gases quentes nos turbogeradores. A análise dos resultados foi conduzida conforme a norma NORSOK-C004, que estabelece critérios para a segurança das operações aéreas em plataformas *offshore*. Nenhuma das condições simuladas atingiu a zona vermelha de restrição operacional, confirmando o adequado posicionamento das chaminés e a consistência das simulações realizadas.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Mechanical Engineer

CFD APPLICATION IN THE SAFETY ASSESSMENT OF OFFSHORE
HELICOPTERS UNDER HOT AIR FLOW

Igor Maiello Maia

October/2025

Advisor: Gustavo Rabello dos Anjos

Department: Mechanical Engineering

This work presents, through the Computational Fluid Dynamics (CFD) methodology, a risk assessment of helicopter operations on offshore platforms with hot gas emissions. With the growing expansion of oil exploration in Brazil, helicopters have become the most used mode of transport for personnel to offshore platforms due to their greater efficiency, speed, and safety. For the study, the geometry was initially constructed based on the real dimensions of a semi-submersible type platform, and the mesh was generated. The methodology employed to solve the flow was the Finite Volume Method, using the Ansys/CFX software. Additionally, the Shear Stress Transport (SST) turbulence model was used to obtain the results. The cases analyzed varied according to wind direction and magnitude. For each wind direction case (South-southeast, Southeast, and East-southeast), wind speeds of 1, 7, and 15 meters per second were tested, maintaining the same hot gas emission conditions from the turbogenerators. The analysis of the results was conducted in accordance with the Norsok-C004 standard, which establishes criteria for the safety of aerial operations on offshore platforms. None of the simulated conditions reached the operational restriction red zone, confirming the proper positioning of the turbogenerators and the consistency of the simulations performed.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiv
Lista de Símbolos	xv
Lista de Abreviaturas	xx
1 Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.2 Objetivo	3
1.3 Estrutura	3
2 Fundamentação teórica	4
2.1 Histórico	4
2.2 Plataformas Offshore	5
2.2.1 Turbogeneradores	6
2.2.2 Operações com helicópteros	7
2.3 Normas marítimas	8
2.4 Dinâmica dos Fluidos Computacional	11
2.5 Métodos numéricos	15
2.5.1 Método de Diferenças Finitas	15
2.5.2 Método de Elementos Finitos	16
2.5.3 Método de Volumes Finitos	17
3 Modelo matemático	18
3.1 Equações de Conservação	19

3.1.1	Conservação da massa	20
3.1.2	Conservação da quantidade de movimento	20
3.1.3	Conservação de energia	21
3.2	Turbulência	22
3.2.1	Equações de Navier-Stokes Médias de Reynolds (RANS)	23
3.2.2	Modelo Duas Equações	25
3.3	Condições de contorno na forma contínua	30
4	Modelo de simulação	32
4.1	Construção da geometria	32
4.2	Condições de contorno do problema	33
4.2.1	Superfície superior	34
4.2.2	Superfície inferior	34
4.2.3	Superfície lateral	35
4.2.4	Superfície da plataforma	37
4.3	Condições operacionais e do escoamento	37
4.3.1	Turbogeradores	37
4.3.2	Direções e intensidades de vento	39
4.4	Geração da malha	39
4.5	Critérios de convergência	44
5	Resultados	46
5.1	Critérios de avaliação	46
5.2	Extração de resultados	48
5.3	Avaliação de pluma térmica	49
5.3.1	Velocidade de vento: 1 m/s	49
5.3.2	Velocidade de vento: 7 m/s	53
5.3.3	Velocidade de vento: 15 m/s	58
6	Conclusões	63
	Referências Bibliográficas	66

Lista de Figuras

1.1	Helicóptero em voo <i>offshore</i> . Fonte: [1]	1
1.2	Representação da pluma térmica nas operações de voo. Fonte: Elaborado pelo autor.	2
2.1	Tipos de plataforma de petróleo e suas finalidades. Fonte: [5]	5
2.2	Módulos de turbinas com WHRU destinados a um FPSO. Fonte: [7]	7
2.3	Exemplo de helideque em plataforma <i>offshore</i> . Fonte: [11]	8
2.4	Exemplo de malha unidimensional do método de diferenças finitas. Fonte: Elaborado pelo autor.	16
2.5	Exemplo de malha bidimensional do método de diferenças finitas. Fonte: Elaborado pelo autor.	16
2.6	Exemplo de uma malha bidimensional não estruturada para o método de elementos finitos. Fonte: [32]	17
2.7	Exemplo de um volume de controle típico do método de volumes finitos, para uma malha tridimensional. Fonte: [32]	17
3.1	Variação no tempo da velocidade em um experimento. Adaptado de [34].	24
4.1	Modelo geométrico da plataforma utilizado na simulação, com medidas aproximadas. Fonte: Elaborado pelo autor.	33
4.2	Condições de contorno aplicadas no problema. Fonte: Elaborado pelo autor.	34
4.3	Ângulo θ de incidência do vento em relação à plataforma. Fonte: Elaborado pelo autor.	36

4.4	Identificação das chaminés e as saídas de gases quentes. Fonte: Elaborado pelo autor.	38
4.5	Rosa dos ventos e direções escolhidas para simulação de pluma térmica. Fonte: Adaptado de [39].	39
4.6	Volumes de controle para discretização da malha computacional. Fonte: Elaborado pelo autor.	40
4.7	Vista laterais dos resultados das 4 malhas. Fonte: Elaborado pelo autor.	41
4.8	Vista superiores dos resultados das 4 malhas. Fonte: Elaborado pelo autor.	42
4.9	Vista lateral em corte do domínio da malha 3 escolhida. Fonte: Elaborado pelo autor.	43
4.10	Vista lateral em corte com foco no domínio da plataforma e do helideque. Fonte: Elaborado pelo autor.	43
4.11	Vista lateral em corte com foco no domínio da plataforma e dos turbogeradores. Fonte: Elaborado pelo autor.	44
5.1	Exemplo de Matriz de Gradiente de Temperatura de uma pluma de ar quente sobre um helideque. Fonte: [25]	47
5.2	Matriz TGM com recomendações dependendo da temperatura atingida. Fonte: Adaptado de [25]	48
5.3	Volumes cilíndricos para extração de resultados do modelo. Fonte: Elaborado pelo autor.	48
5.4	Vista lateral para intensidade de vento de 1 m/s, na direção Leste-sudeste (ESE). Fonte: Elaborado pelo autor.	49
5.5	Vista superior para intensidade de vento de 1 m/s, na direção Leste-sudeste (ESE). Fonte: Adaptado de [39].	50
5.6	Vista lateral para intensidade de vento de 1 m/s, na direção Sudeste (SE). Fonte: Elaborado pelo autor.	50
5.7	Vista superior para intensidade de vento de 1 m/s, na direção Sudeste (SE). Fonte: Adaptado de [39].	51
5.8	Vista lateral para intensidade de vento de 1 m/s, na direção Sul-sudeste (SSE). Fonte: Elaborado pelo autor.	51

5.9	Vista superior para intensidade de vento de 1 m/s, na direção Sul-sudeste (SSE). Fonte: Adaptado de [39].	52
5.10	Matriz TGM para intensidade de vento de 1 m/s, para as direções Leste-sudeste (ESE), Sudeste (SE) e Sul-sudeste (SSE). Fonte: Adaptado de [25].	53
5.11	Vista lateral para intensidade de vento de 7 m/s, na direção Leste-sudeste (ESE). Fonte: Elaborado pelo autor.	53
5.12	Vista superior para intensidade de vento de 7 m/s, na direção Leste-sudeste (ESE). Fonte: Adaptado de [39].	54
5.13	Vista lateral para intensidade de vento de 7 m/s, na direção Sudeste (SE). Fonte: Elaborado pelo autor.	54
5.14	Vista superior para intensidade de vento de 7 m/s, na direção Sudeste (SE). Fonte: Adaptado de [39].	55
5.15	Vista lateral para intensidade de vento de 7 m/s, na direção Sul-sudeste (SSE). Fonte: Elaborado pelo autor.	55
5.16	Vista superior para intensidade de vento de 7 m/s, na direção Sul-sudeste (SSE). Fonte: Adaptado de [39].	56
5.17	Matriz TGM para intensidade de vento de 7 m/s, para a direção Leste-sudeste (ESE). Fonte: Adaptado de [25].	56
5.18	Matriz TGM para intensidade de vento de 7 m/s, para a direção Sudeste (SE). Fonte: Adaptado de [25].	57
5.19	Matriz TGM para intensidade de vento de 7 m/s, para a direção Sul-sudeste (SSE). Fonte: Adaptado de [25].	57
5.20	Vista lateral para intensidade de vento de 15 m/s, na direção Leste-sudeste (ESE). Fonte: Elaborado pelo autor.	58
5.21	Vista superior para intensidade de vento de 15 m/s, na direção Leste-sudeste (ESE). Fonte: Adaptado de [39].	58
5.22	Vista lateral para intensidade de vento de 15 m/s, na direção Sudeste (SE). Fonte: Elaborado pelo autor.	59
5.23	Vista superior para intensidade de vento de 15 m/s, na direção Sudeste (SE). Fonte: Adaptado de [39].	59

5.24	Vista lateral para intensidade de vento de 15 m/s, na direção Sul-sudeste (SSE). Fonte: Elaborado pelo autor.	60
5.25	Vista superior para intensidade de vento de 15 m/s, na direção Sul-sudeste (SSE). Fonte: Adaptado de [39].	60
5.26	Matriz TGM para intensidade de vento de 15 m/s, para a direção Leste-sudeste (ESE). Fonte: Adaptado de [25].	61
5.27	Matriz TGM para intensidade de vento de 15 m/s, para a direção Sudeste (SE). Fonte: Adaptado de [25].	61
5.28	Matriz TGM para intensidade de vento de 15 m/s, para a direção Sul-sudeste (SSE). Fonte: Adaptado de [25].	62

Lista de Tabelas

3.1	Constantes do modelo $\kappa - \epsilon$	26
3.2	Constantes do modelo $\kappa - \omega$	27
3.3	Constantes típicas dos modelos $\kappa - \omega$, $\kappa - \epsilon$ SST	29
4.1	Tamanho dos elementos de malha para cada volume de controle do problema	40
4.2	Número de nós e elementos para cada malha considerada	41

Lista de Símbolos

$CD_{\kappa\omega}$	Termo de difusão cruzada, p. 28
$C_{\epsilon 1}$	Constante de produção da dissipação, p. 26
$C_{\epsilon 2}$	Constante de destruição da dissipação, p. 26
C_{μ}	Constante empírica da viscosidade turbulenta, p. 26
D	Comprimento característico, p. 19
F_1	Função de mistura primária, p. 27
F_2	Função de mistura secundária, p. 27
P_{κ}	Termo de produção da energia cinética turbulenta, p. 26
Re	Número de Reynolds, p. 19
S	Intensidade escalar da taxa de deformação, p. 27
S_{ij}	Tensor de taxa de deformação, p. 27
T	Temperatura, p. 21
T'	Flutuação da temperatura, p. 25
T_0	Temperatura de referência, p. 22
T_{∞}	Temperatura do fluido ambiente, p. 30
U	Componente de velocidade no contorno lateral na direção X , p. 37

$U(z)$	Velocidade horizontal em função da altura z acima da superfície do mar, p. 37
U_i	Componente da velocidade na direção x_i , p. 27
U_j	Componente da velocidade na direção x_j , p. 27
U_{ref}	Velocidade de referência, p. 37
V	Componente de velocidade no contorno lateral na direção Y , p. 37
W	Componente de velocidade no contorno lateral na direção Z , p. 37
Γ	Fronteira do domínio, p. 30
Γ_D	Subconjunto da fronteira onde se aplica a condição de contorno de Dirichlet, p. 30
Γ_N	Subconjunto da fronteira onde se aplica a condição de contorno de Neumann, p. 30
Γ_R	Subconjunto da fronteira onde se aplica a condição de contorno de Robin, p. 30
Ω	Propriedade qualquer, p. 24
Ω'	Flutuações da propriedade, p. 24
α	Constante de produção de ω , p. 27
$\bar{\mathbf{u}}$	Componente média do campo de velocidades, p. 25
\bar{u}	Componente média da velocidade na direção X , p. 25
\bar{v}	Componente média da velocidade na direção Y , p. 25
\bar{w}	Componente média da velocidade na direção Z , p. 25
β	Coefficiente de expansão térmica, p. 22

β	Constante de destruição de ω , p. 27
β^*	Constante de dissipação de ω , p. 27
ϵ	Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta, p. 26
κ	Energia cinética turbulenta, p. 26
\mathbf{u}	Campo de velocidades, p. 21
μ	Viscosidade dinâmica, p. 19
μ_t	Viscosidade turbulenta, p. 26
∇	Operador Gradiente, p. 21
∇^2	Operador Laplaciano, p. 21
ν	Viscosidade cinemática, p. 19
ω	Frequência específica de turbulência, p. 27
\bar{T}	Valor médio da temperatura, p. 25
$\bar{\Omega}$	Valor médio da propriedade, p. 24
$\overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'}$	Tensor de Reynolds, p. 25
$\overline{\mathbf{u}'T'}$	Fluxo turbulento de calor, p. 25
∂	Derivada parcial, p. 20
ϕ	Constante qualquer das equações de transporte, p. 28
ϕ_1	Constante correspondente ao modelo $\kappa - \omega$, p. 28
ϕ_2	Constante correspondente ao modelo $\kappa - \epsilon$, p. 28
ρ	Massa específica do fluido, p. 19
ρ_0	Densidade de referência do fluido, p. 22
σ_ϵ	Número de Prandtl turbulento associado ao transporte de ϵ , p. 26

σ_κ	Número de Prandtl turbulento associado ao transporte de κ , p. 26
σ_ω	Número de Prandtl turbulento associado ao transporte de ω , p. 27
θ	Ângulo de incidência do vento em relação à plataforma, p. 37
\vec{U}	Vetor velocidade média, p. 26
a_1	Parâmetro de limitação de cisalhamento, p. 27
arg	Argumento usado dentro das funções de mistura F_1 e F_2 , p. 27
c_p	Calor específico, p. 21
g	Força da gravidade, p. 21
h	Coefficiente de convecção, p. 30
k	Condutividade térmica, p. 21
n	Direção normal de um escoamento, p. 30
n	Vetor normal unitário à superfície na direção para fora do domínio, p. 30
p	Pressão, p. 21
t	Tempo, p. 25
u	Componente da velocidade na direção X, p. 20
v	Componente da velocidade na direção Y, p. 20
v	Velocidade característica, p. 19
w	Componente da velocidade na direção Z, p. 20
x_i	Coordenada espacial, p. 27
x_j	Coordenada espacial, p. 27
y	Distância até a parede, p. 28

z Altura acima da superfície do mar, p. 37

Lista de Abreviaturas

AAFD	Área de Aproximação Final e Decolagem, p. 10
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil, p. 7
CAA	Civil Aviation Authority, p. 13
CFD	Computational Fluid Dynamics, p. vi
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo, p. 9
DNS	Direct Numerical Simulation, p. 23
EI	Energy Institute, p. 5
FPSO	Floating Production Storage and Offloading, p. 7
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, p. 5
KGM	Turbulence Kinetic Energy Gradient Matrix, p. 13
LES	Large Eddy Simulation, p. 23
NORMAM	Normas da Autoridade Marítima, p. 9
NORSOK	The Norwegian Shelf's Competitive Position, p. 3
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes, p. 14
SST	Shear Stress Transport, p. vi
TGM	Temperature Gradient Matrix, p. 13
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro, p. v
WHRU	Waste Heat Recovery Unit, p. 7

Capítulo 1

Introdução

Com o intuito de verificar potenciais impactos na disponibilidade de um heli-deque *offshore* para a operação de aeronaves, este trabalho tem como foco realizar uma análise da influência da elevação da temperatura provocada pela exaustão de gases quentes da plataforma. Portanto, a fim de avaliar o impacto da pluma térmica nas operações de voo, foram realizadas análises de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) com o *software* Ansys - módulo CFX. Os resultados foram comparados às recomendações de normas internacionais e nacionais de helideques *offshore*.

De maneira geral, a operação de helicópteros em plataformas *offshore* constitui um aspecto crítico da segurança operacional no setor de óleo e gás, e o helideque deve garantir condições adequadas de pouso e decolagem mesmo em ambientes adversos. A Figura 1.1 ilustra uma operação de decolagem de um helicóptero *offshore*.



Figura 1.1: Helicóptero em voo *offshore*. Fonte: [1]

As análises CFD permitem uma compreensão detalhada da interação entre o vento e a geometria complexa das plataformas, possibilitando a identificação de regiões que podem comprometer a estabilidade de um helicóptero durante as fases mais sensíveis do voo. Entretanto, a modelagem apresenta diversos desafios, como a necessidade de representar com fidelidade a geometria da plataforma, a definição adequada das condições de contorno e do tamanho do domínio, o elevado custo computacional das simulações e a determinação de critérios objetivos para avaliação do risco às operações aéreas. A Figura 1.2 ilustra de forma resumida o problema analisado.

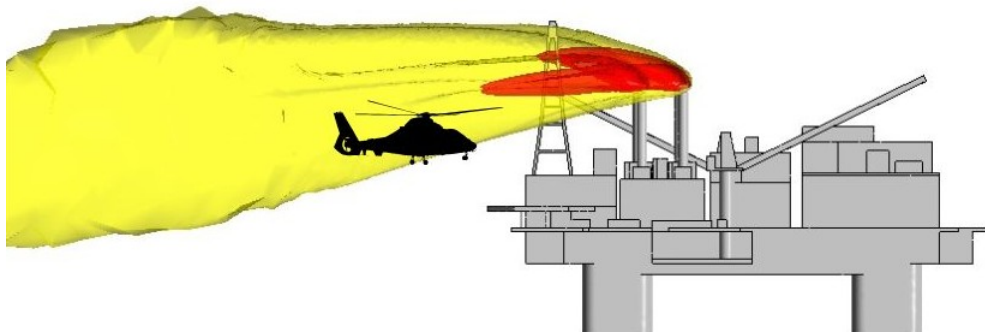


Figura 1.2: Representação da pluma térmica nas operações de voo. Fonte: Elaborado pelo autor.

1.1 Motivação

O cenário mundial atual é marcado por uma elevada demanda por energia, o que mantém a exploração de recursos fósseis, como petróleo e gás natural, em ritmo constante. Nesse contexto, o transporte de pessoas para trabalho embarcado é parte essencial da rotina das plataformas *offshore*. Este trabalho, portanto, tem como motivação avaliar a segurança das operações de transporte de passageiros em helicópteros, considerando o funcionamento dos turbogeradores de energia dessas unidades, por meio de simulações computacionais e comparação com normas regulamentadoras.

1.2 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo identificar, entre os cenários analisados, quais apresentam risco para a operação de helicópteros em função da elevação da temperatura decorrente do funcionamento dos turbogeradores. Para isso, os resultados serão avaliados conforme a metodologia estabelecida na norma NORSOK C-004 [2].

1.3 Estrutura

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: inicialmente, apresenta-se a fundamentação teórica e matemática do projeto. Em seguida, descreve-se a metodologia de análise numérica empregada, detalhando cada etapa. Por fim, são apresentados os resultados obtidos e a conclusão, com a respectiva análise.

Capítulo 2

Fundamentação teórica

Neste capítulo, apresenta-se uma revisão dos principais aspectos teóricos relacionados a este trabalho, com o objetivo de fornecer a base necessária para a obtenção dos resultados.

2.1 Histórico

Segundo Morais (2013) [3], as primeiras explorações de petróleo em áreas distantes da costa ocorreram nas décadas de 1940 e 1950, no Golfo do México, Estados Unidos, e resultaram na descoberta de jazidas de difícil extração no mar. Para viabilizar essa exploração, as empresas petrolíferas, em associação com instituições científicas, universidades e outras empresas, investiram fortemente em tecnologia, desenvolvendo inovações que permitiram o acesso a recursos fósseis antes considerados inviáveis devido às condições climáticas, ambientais e marítimas.

No cenário brasileiro, ainda de acordo com o autor [3], a primeira descoberta de petróleo em alto-mar ocorreu em 1968, no litoral de Sergipe. Apenas a partir de 1974 a exploração *offshore* passou a ganhar destaque no país, com a revelação do potencial da Bacia de Campos, nos estados do Espírito Santo e Rio de Janeiro. Em 2007, a descoberta do pré-sal na Bacia de Santos, no litoral de São Paulo, colocou o Brasil em posição estratégica frente à crescente demanda mundial por energia. A expansão da exploração e produção de petróleo impulsionou portanto as atividades de suporte às plataformas, como o transporte de trabalhadores por helicópteros.

Em 2024, o Brasil ocupou a 8^a posição entre os maiores produtores de petróleo

do mundo, com uma produção média de 3,4 milhões de barris de petróleo (óleo e gás) por dia, representando 4% da produção mundial total, segundo dados do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP) em parceria com o *Energy Institute* (EI) [4]. Atualmente, a Petrobras é a maior empresa petrolífera do país e uma das maiores do mundo, fundada em 1953.

2.2 Plataformas Offshore

Plataformas de petróleo *offshore* são grandes estruturas utilizadas na exploração e produção de petróleo e gás natural no oceano. Quanto à sua função, podem ser destinadas à perfuração do solo marítimo, à produção de petróleo e gás natural ou desempenhar ambas as funções, dependendo da profundidade da lâmina d'água em que operam. A Figura 2.1 abaixo mostra os tipos de plataformas *offshore* e suas respectivas finalidades.



Figura 2.1: Tipos de plataforma de petróleo e suas finalidades. Fonte: [5]

No caso das plataformas semissubmersíveis, modelo utilizado para as simulações neste trabalho, elas podem ser projetadas tanto para perfuração quanto para produção, e são capazes de operar em lâminas d'água com profundidades de até 2.000 metros. Essas plataformas possuem um ou mais conveses apoiados por colunas flutuantes submersas, e sua estabilidade é assegurada por sistemas de ancoragem, como âncoras, cabos e correntes, ou por meio de posicionamento dinâmico, utilizando propulsores instalados no casco quando empregadas em operações de perfuração [5].

2.2.1 Turbogeneradores

Em uma plataforma *offshore*, a geração de energia elétrica é realizada principalmente por meio de turbogeneradores, que consistem na associação de uma turbina a gás ou a vapor, a um gerador elétrico. O combustível utilizado costuma ser o próprio gás natural extraído na unidade, ou em alguns casos óleo combustível. Esse combustível é queimado na câmara de combustão da turbina, produzindo gases quentes de alta pressão que acionam o rotor. O movimento mecânico resultante é transmitido ao eixo do gerador, convertendo a energia mecânica em eletricidade, responsável por alimentar todos os sistemas da plataforma, desde bombas, compressores, iluminação, acomodações e sistemas de segurança. Esses equipamentos são projetados para garantir alta confiabilidade, suportando condições adversas como salinidade, vibrações e variações térmicas. É comum que haja redundância, com dois ou mais turbogeneradores em operação ou em espera, de modo a evitar a interrupção da geração de energia em caso de falha [6].

Associado aos turbogeneradores, é frequente o uso do *Waste Heat Recovery Unit* (WHRU). Trata-se de um sistema instalado na saída dos gases de exaustão da turbina, com a função de aproveitar a energia térmica que seria descartada na atmosfera. Esse calor recuperado é transferido, por meio de trocadores de calor, para fluidos de processo como água ou óleo, podendo ser utilizado em aquecimento, redução de viscosidade do petróleo ou mesmo geração de vapor para acionar uma turbina a vapor auxiliar. Dessa forma, esse conjunto aumenta a eficiência energética e reduz o consumo de combustível e a emissão de gases de efeito estufa [6]. Na Figura 2.2 abaixo, são mostrados dois módulos de turbinas a gás com WHRU, destinadas a uma plataforma do tipo FPSO.



Figura 2.2: Módulos de turbinas com WHRU destinados a um FPSO. Fonte: [7]

Assim, essas turbinas geram plumas térmicas que podem alcançar temperaturas próximas de $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esses fluxos de ar apresentam comportamento flutuante, instável e de difícil previsão em função das variações de temperatura. O ar aquecido e turbulento tende a se elevar, mistura-se ao ar ambiente, perde gradualmente seu impulso e, em seguida, passa a ser transportado pela direção predominante do vento. Em plataformas fixas, como a analisada neste estudo, a pluma pode atingir o helideque conforme a orientação do vento, sendo sua extensão influenciada principalmente pela altura da exaustão, pela temperatura dos gases e pela velocidade do vento. [8]

2.2.2 Operações com helicópteros

O transporte de passageiros para plataformas *offshore* é realizado, majoritariamente, por helicópteros, devido à sua flexibilidade, velocidade e à capacidade de operar em áreas restritas sem a necessidade de pistas convencionais. Nas unidades marítimas, essas operações ocorrem em áreas específicas chamadas helideques, definidos pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) como aeródromos destinados a pousos e decolagens de helicópteros localizados em estruturas sobre a água, também chamados de helideques *offshore* [9].

No Brasil, a utilização de helicópteros em operações *offshore* intensificou-se a

partir da década de 1970, com o início da exploração na Bacia de Campos pela Petrobras. Inicialmente, era adotada uma combinação dos modais aéreo e marítimo para o transporte de trabalhadores, mas, a partir dos anos 1990, estudos internos demonstraram que o modal aéreo apresentava maior eficiência em termos de tempo e custo, consolidando o helicóptero como principal meio de acesso às plataformas. Atualmente, a aviação *offshore* é considerada indispensável para a indústria do petróleo, desempenhando papel fundamental na continuidade das atividades produtivas e na segurança do transporte de passageiros [10]. Um exemplo de helideque pode ser visualizado na Figura 2.3.



Figura 2.3: Exemplo de helideque em plataforma *offshore*. Fonte: [11]

2.3 Normas marítimas

As operações aéreas em plataformas *offshore* são regidas por normas internacionais e nacionais que estabelecem requisitos de segurança para helideques. Entre elas, destacam-se a NORSOK C-004 [2], desenvolvida na Noruega, que define padrões de projeto, dimensões, posicionamento e critérios de segurança, e a NORMAM-27 [12], da Autoridade Marítima Brasileira, que regulamenta a aprovação e o uso desses espaços em unidades marítimas. Ambas têm como objetivo assegurar pousos e decolagens com segurança, reduzindo riscos associados à turbulência, obstáculos, condições ambientais e situações de emergência. O cumprimento dessas normas é fundamental para a padronização internacional, a proteção da tripulação e profissi-

onais embarcados, e a confiabilidade das atividades de apoio aéreo na indústria de petróleo e gás.

No Brasil, além da Marinha, há também órgãos aeronáuticos, como a ANAC, responsável pela regulamentação das operações aéreas e da segurança de voo, e o DECEA, que atua no controle e gerenciamento do tráfego aéreo sobre as áreas marítimas.

O posicionamento do helideque na plataforma é um fator crítico para a segurança, uma vez que a proximidade com grandes estruturas pode gerar turbulência e correntes de ar imprevisíveis, aumentando os riscos durante as manobras de pouso e decolagem. Além disso, os voos *offshore* impõem desafios adicionais, como condições meteorológicas adversas e restrições de espaço, exigindo dos pilotos habilidades específicas que diferem das operações aéreas em terra.

O helideque pode variar quanto sua forma geométrica, dimensão e material, dependendo do local de instalação e do tipo de aeronave. No Brasil, o projeto estrutural de um helideque é regido pelas NORMAM-27 [12], que estabelece várias restrições, onde duas estão destacadas abaixo. Quando algum parâmetro não é atendido determinam-se restrições às operações das aeronaves.

- A Área de Aproximação Final e Decolagem (AAFD) deve ser localizada de forma a minimizar a ocorrência de turbulência sobre o helideque, originada pelo escoamento do vento nas estruturas da instalação. Para os novos projetos de construção, iniciados a partir de 2018, as plataformas devem possuir um estudo do ambiente eólico sobre o helideque em que os helicópteros deverão operar;
- Não devem existir, sobre o helideque, gases da combustão de queimadores ou de outros equipamentos que possam despejar gases quentes que alterem os parâmetros ambientais para os quais o voo foi planejado. Aumentos repentinos na temperatura ambiente podem causar diminuição de desempenho do motor e da eficácia do rotor em um estágio crítico da operação do helicóptero. Os projetistas devem, portanto, tomar muito cuidado com a localização e com a elevação das descargas de gases em relação à AAFD. As plataformas devem realizar testes em túnel de vento ou de Dinâmica dos Fluidos Computacional

(CFD) do helideque para determinar os parâmetros eólicos para o pouso e decolagens de aeronaves.

Como mencionado por ambas as normas, a turbulência de ar quente é geralmente causada pelo ar aquecido das emissões de exaustão de turbogeradores e outros tipos de maquinário da instalação. O fluxo de ar quente, combinado com uma mudança súbita na temperatura do ar, pode gerar dois efeitos principais no desempenho do helicóptero:

- Possível estol momentâneo dos motores, devido à diminuição súbita da densidade do ar como resultado do aumento da temperatura, ao atravessar os compressores da turbina;
- Redução significativa da capacidade de sustentação do helicóptero.

Dessa forma, de acordo com SILVA e PAGOT [13], as turbinas apresentam elevada sensibilidade à variação da vazão mássica de ar admitido, de modo que sua potência disponível na saída pode ser significativamente reduzida mesmo diante de um aumento de apenas alguns graus na temperatura do ar de entrada. Assim, quando o helicóptero admite ar mais quente nas turbinas, ocorre uma diminuição da potência disponível, resultando em menor torque no rotor e em uma súbita perda de altitude da aeronave. Em ambiente aberto, essa redução, ainda que de poucos metros, pode ser prontamente compensada pelo piloto. Entretanto, em operações *offshore*, tal comportamento pode levar a colisões com obstáculos presentes nas plataformas, configurando um risco elevado.

Cabe ressaltar que o helicóptero não apresenta limitações para operar em diferentes faixas de temperatura ambiente, contudo, não é capaz de suportar variações rápidas na temperatura do ar admitido pela turbina sem que ocorra uma queda abrupta da potência de saída. Esse fenômeno, portanto, apresenta menor previsibilidade e pode representar uma ameaça significativa à segurança das operações aéreas com helicópteros.

2.4 Dinâmica dos Fluidos Computacional

De acordo com VERSTEEG e MALALASEKERA [14], Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) é a análise de escoamentos, transferência de calor e fenômenos relacionados, realizada por meio de simulação computacional. Trata-se de uma técnica poderosa e versátil, aplicada em diversos setores industriais e na pesquisa científica.

A principal vantagem dessa técnica é possibilitar a obtenção de resultados sem a necessidade de testes experimentais, que normalmente são mais custosos. Nesse sentido, diversos estudos relacionados à indústria *offshore* já foram realizados utilizando essa metodologia. Nota-se um grande número de estudos relacionados a turbinas eólicas *offshore*, setor em expansão impulsionado pela transição energética e pelo desenvolvimento sustentável. No contexto específico de helideques *offshore*, destacam-se pesquisas voltadas à análise dos modelos e efeitos de turbulência, além da influência da temperatura.

HAIDER et al [15] tiveram como objetivo revisar o uso de CFD no projeto de turbinas eólicas flutuantes *offshore*, destacando os principais desafios para a modelagem e análise. O estudo analisou diversos trabalhos que empregaram *softwares* como ANSYS Fluent, OpenFOAM e STAR-CCM+, abordando simulações de escoamento aerodinâmico, hidrodinâmico e interações fluido-estrutura. Foram discutidas diferentes abordagens e estratégias de refinamento de malha para capturar efeitos de vórtices e cargas dinâmicas na plataforma. Como conclusão, os autores apontaram que a CFD é uma ferramenta poderosa para prever o comportamento aerodinâmico e hidrodinâmico, embora a precisão dependa fortemente da escolha do modelo, condições de contorno e resolução da malha.

JOHNSON [16] teve como objetivo investigar as interações de vórtices em turbinas eólicas *offshore*, utilizando o *software* Ansys Fluent. O estudo simulou o escoamento de ar e as interações de vórtices gerados pelas lâminas das turbinas. A metodologia envolveu a aplicação de modelos de turbulência para capturar as características dinâmicas do escoamento. Os resultados indicaram que as interações dos vórtices têm um impacto significativo no desempenho das turbinas, afetando sua eficiência e durabilidade. As conclusões sugerem que a consideração desses efeitos é crucial para a operação das turbinas, visando otimizar o desempenho e reduzir os

custos operacionais.

SCARLATTI [17] desenvolveu e validou um modelo de CFD para turbinas eólicas *offshore* flutuantes, visando fornecer resultados confiáveis para análise de plataformas eólicas. O estudo utilizou o *software* OpenFOAM para simular o movimento da plataforma e o efeito das ondas e correntes, incluindo diferentes modelos de ancoragem. Os resultados mostraram que o modelo reproduz com precisão o comportamento hidrodinâmico da plataforma, servindo como ferramenta confiável para futuras simulações.

FAVATA [18] investigou como a presença de uma abertura no convés de plataformas flutuantes de turbinas eólicas *offshore* afeta seu comportamento. Por meio de simulações CFD com o *software* OpenFOAM, comparou modelos da plataforma com e sem a abertura, analisando movimentos da estrutura e forças geradas pelas ondas. Os resultados mostraram que a abertura influencia a estabilidade e o desempenho da plataforma, oferecendo informações úteis para o projeto de futuras unidades flutuantes.

ARGYLE [19] investigou como a estabilidade atmosférica afeta as perdas de energia causadas pelos vórtices das turbinas em grandes parques eólicos *offshore*. Utilizando simulações CFD com o *software* ANSYS CFX, o estudo analisou diferentes cenários de estabilidade atmosférica para prever as perdas de potência. Os resultados indicaram que condições atmosféricas estáveis podem aumentar significativamente as perdas de energia, fornecendo informações valiosas para o planejamento e otimização de parques eólicos *offshore*. Vale destacar que, neste estudo, o domínio de simulação é semelhante ao utilizado neste trabalho, consistindo em um cilindro de grande diâmetro com o objeto de interesse posicionado no centro.

LETZGUS et al. [20] tiveram como objetivo analisar as interações entre turbinas eólicas e o vento turbulento em terrenos irregulares. O estudo utilizou simulações CFD, considerando relevo e vegetação. Os resultados mostraram que esses fatores influenciam bastante o desempenho, as cargas e a turbulência atrás das turbinas, indicando que incluí-los é importante para otimizar a operação em terrenos complexos.

TRAN, KIM e SONG [21] realizaram uma análise CFD de um aerogerador *offshore* flutuante submetido a movimentos de inclinação da plataforma. O estudo

utilizou o *software* STAR-CCM+ com o modelo de turbulência SST, simulando o escoamento em um domínio em forma de paralelepípedo. Os resultados mostraram que as cargas sobre a plataforma variam conforme a inclinação, ressaltando a importância de considerar esses efeitos no projeto.

Ainda no contexto de aerogeradores, FERREIRA [22] teve como objetivo analisar o escoamento ao redor de um aerogerador de eixo horizontal utilizando Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). O estudo foi realizado com o auxílio do *software* Ansys CFX e os resultados indicaram que o desempenho do aerogerador é sensivelmente afetado pela configuração das lâminas e pela intensidade da turbulência no escoamento. As conclusões sugerem que a otimização do design das lâminas e o controle da turbulência podem melhorar a eficiência energética do aerogerador.

ERIKSSON [23] avaliou o uso de CFD no projeto de plataformas semi-submersíveis, utilizando os *softwares* OpenFOAM e Ansys Fluent. O estudo comparou os resultados das simulações com dados experimentais de túnel de vento e mostrou que algumas análises não reproduziram adequadamente a força de arrasto, indicando limitações na resolução da malha e na modelagem do escoamento.

GHAHREMANI [8] realizou uma simulação CFD das condições de vento e gradiente térmico ao redor de helideques *offshore*, através do *software* Ansys Fluent. Com um domínio em formato de paralelepípedo, e baseado no método dos volumes finitos, o estudo analisou a interação entre escoamentos de ar e efeitos térmicos em diferentes cenários de vento. Os resultados evidenciaram que a variação de temperatura entre a superfície do mar e a estrutura da plataforma influencia significativamente a formação de zonas de recirculação, afetando diretamente a segurança das operações aéreas.

SILVA et al. [24] realizaram simulações CFD em diferentes unidades *offshore* para avaliar turbulência e plumas de gás quente em helideques. Na análise térmica, foi adotada a abordagem da NORSOK C-004 [25], a matriz de gradiente de temperatura (TGM), a qual também será abordada no presente trabalho. Já para a turbulência, foi proposta uma matriz similar, de energia cinética turbulenta (KGM), baseada na variabilidade da componente vertical da velocidade, conforme as recomendações da norma CAP-437 [26], publicada pela Civil Aviation Authority (CAA) do Reino Unido.

BACCA [27] desenvolveu uma análise numérica da formação de vórtices em helideques localizados em plataformas FPSO. O estudo utilizou o *software* ANSYS Fluent, baseado no método dos volumes finitos e modelo de turbulência RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes), para simular o escoamento de ar incompressível em diferentes direções e magnitudes de vento. Os resultados mostraram que a formação de vórtices é mais intensa quando o vento incide pela proa, gerando regiões de esteira sobre o helideque e aumentando o risco operacional. O domínio computacional foi construído na forma de um paralelepípedo, envolvendo a região da popa da plataforma onde se localiza o helideque, de modo a reduzir a demanda computacional e permitir a análise do escoamento de ar em torno da estrutura.

KARIMI e SHABAKHTY [28] simularam o efeito do vão livre sob o piso do helideque na turbulência induzida pelo vento em plataformas *offshore*. As simulações foram realizadas utilizando um domínio cilíndrico e um modelo CFD validado. Os resultados indicaram que a presença desse vão de ar reduz significativamente a intensidade da turbulência nas proximidades da plataforma, melhorando as condições operacionais para pousos e decolagens de helicópteros.

MENTZONI e ERTESVÅG [29] investigaram critérios de turbulência para simulações numéricas de escoamento de vento e dispersão de gás nas proximidades de plataformas *offshore*. O estudo comparou diferentes abordagens para modelagem de turbulência, destacando a importância da escolha adequada do modelo para representar com precisão os fenômenos físicos envolvidos. Os resultados indicaram que a energia turbulenta é mais eficaz do que o desvio padrão da componente vertical da velocidade como critério para avaliar a intensidade da turbulência.

KHOSROSHAHI et al. [30] desenvolveram um método computacional para projetar helideques de alumínio em faróis *offshore*, considerando vento e pousos de helicópteros. O estudo testou diferentes estruturas para encontrar a configuração mais segura e eficiente, com menor material e esforço dentro do permitido. Com resultados promissores, conclui-se que o método pode ser usado no projeto de outras estruturas *offshore*.

FAUZI e SILALAHY [31] analisaram a estabilidade aerodinâmica de helideques em navios, considerando diferentes ângulos de incidência do vento. O estudo utilizou simulações computacionais de fluxo de ar e mostrou que certas condições de vento

podem gerar zonas de recirculação que desestabilizam o helicóptero. Os resultados destacam a importância de otimizar o projeto do helideque e aplicar estratégias de mitigação aerodinâmica para aumentar a segurança de voo, embora sejam necessários estudos adicionais com validação experimental.

2.5 Métodos numéricos

Métodos numéricos consistem em técnicas matemáticas utilizadas para obter soluções aproximadas de problemas que não admitem resolução analítica, como por exemplo equações diferenciais ordinárias e parciais. No contexto da dinâmica dos fluidos, essas técnicas permitem a discretização de equações por meio de diferenças finitas, volumes finitos e elementos finitos, métodos que viabilizam a análise computacional de escoamentos complexos e fenômenos físicos associados, e que são descritos abaixo (FERZIGER; PERIĆ, 2002) [32].

2.5.1 Método de Diferenças Finitas

O método das diferenças finitas é o método numérico mais antigo e de compreensão mais intuitiva. A principal vantagem desse método é a sua simplicidade e facilidade de implementação. Consiste basicamente em discretizar o domínio em uma malha de nós, nos quais as derivadas presentes nas equações matemáticas são aproximadas em torno deste nó e de seus vizinhos, utilizando expansões em série de Taylor. Dessa forma, é possível obter uma equação algébrica para cada nó da malha.

Entretanto, a aplicação em geometrias complexas torna-se difícil e, muitas vezes, inviável. Sua utilização, portanto, é mais adequada para domínios simples, como exemplificado nas malhas unidimensional e bidimensional abaixo, nas Figuras 2.4 e 2.5;



Figura 2.4: Exemplo de malha unidimensional do método de diferenças finitas.
 Fonte: Elaborado pelo autor.

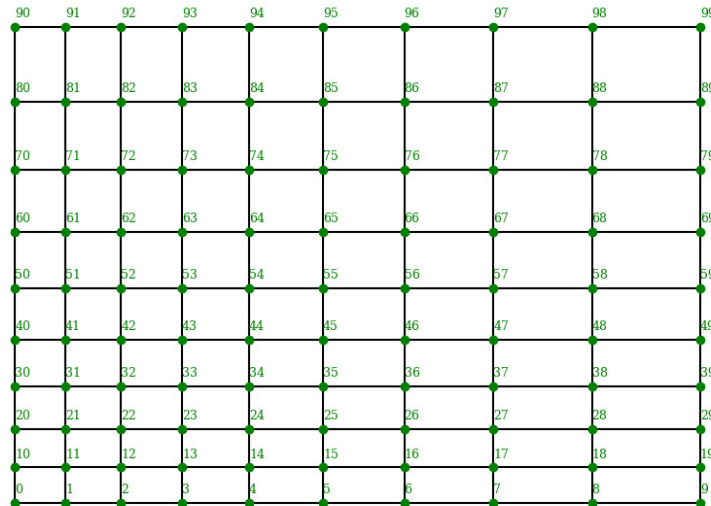


Figura 2.5: Exemplo de malha bidimensional do método de diferenças finitas. Fonte:
 Elaborado pelo autor.

2.5.2 Método de Elementos Finitos

O método dos elementos finitos baseia-se na discretização do domínio em elementos de dimensões finitas, sendo normalmente utilizados triângulos e quadriláteros para malhas bidimensionais, e tetraedros ou hexaedros para malhas tridimensionais. Nesse método, as equações governantes são multiplicadas por funções de forma e integradas ao longo do domínio, permitindo a formulação de um sistema de equações algébricas.

Uma das principais vantagens desse método em relação às diferenças finitas é justamente sua capacidade de lidar com geometrias complexas. Um exemplo é representado abaixo na Figura 2.6, de uma malha não estruturada.

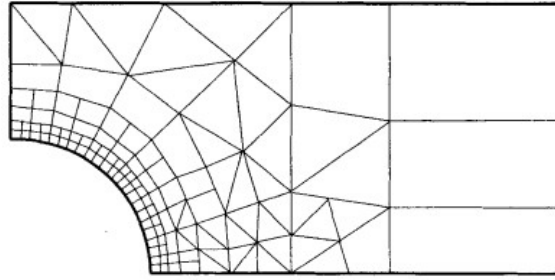


Figura 2.6: Exemplo de uma malha bidimensional não estruturada para o método de elementos finitos. Fonte: [32]

2.5.3 Método de Volumes Finitos

O método dos volumes finitos baseia-se na discretização do domínio em um número finito de volumes de controle, sobre os quais são calculadas as integrais das equações de conservação. O centróide de cada volume de controle é considerado um nó computacional, onde os resultados obtidos são armazenados. Sua principal vantagem é garantir a conservação das grandezas físicas, característica essencial em problemas de dinâmica dos fluidos.

A Figura 2.7 apresenta um exemplo típico de volume de controle, onde a forma integral das equações de conservação é resolvida para o volume considerado, e os resultados são avaliados no ponto P, localizado no centróide do volume.

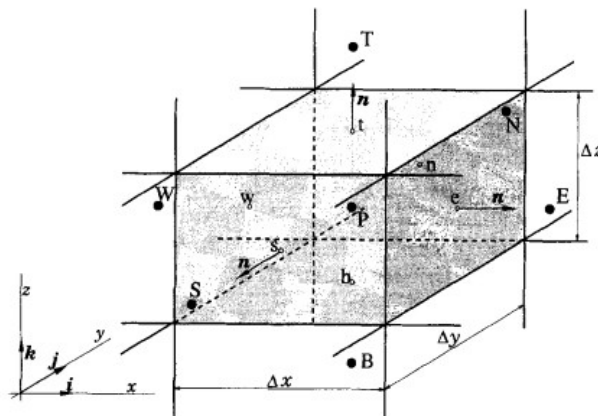


Figura 2.7: Exemplo de um volume de controle típico do método de volumes finitos, para uma malha tridimensional. Fonte: [32]

Capítulo 3

Modelo matemático

Neste capítulo são apresentadas as equações governantes do escoamento consideradas no problema. As principais premissas e condições adotadas para a modelagem são: regime permanente, escoamento incompressível, ação da gravidade e escoamento com turbulência plenamente desenvolvida.

Em relação à classificação do regime em todo o domínio, utiliza-se o número de Reynolds como parâmetro. Considerando a viscosidade cinemática do ar na temperatura ambiente, da ordem de 10^{-5} , conclui-se que o escoamento apresenta valores elevados de Reynolds, caracterizando um regime fortemente turbulento, como mostrado a seguir:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{v D}{\nu} \quad (3.1)$$

$$Re = \frac{1[m/s] \cdot 1500[m]}{1,5 \cdot 10^{-5}[m/s]} = 100.000.000 \quad (3.2)$$

$$Re = \frac{7[m/s] \cdot 1500[m]}{1,5 \cdot 10^{-5}[m/s]} = 700.000.000 \quad (3.3)$$

$$Re = \frac{15[m/s] \cdot 1500[m]}{1,5 \cdot 10^{-5}[m/s]} = 1.500.000.000 \quad (3.4)$$

Onde:

- ρ é a massa específica do fluido [kg/m^3];

- v é a velocidade característica [m/s], que no estudo assume os valores de 1, 7 e 15 m/s;
- D é o comprimento característico [m], definido como o diâmetro do domínio computacional, de 1500 metros;
- μ é a viscosidade dinâmica [Pa · s];
- $\nu = \mu/\rho$ é a viscosidade cinemática [m²/s], que para o ar em temperatura ambiente é aproximadamente $1,5 \cdot 10^{-5}$ [m²/s].

Dessa forma, o número de Reynolds calculado para o problema apresenta valores bem superiores ao limite crítico de $Re = 4000$, caracterizando o escoamento como altamente turbulento.

Com relação ao escoamento de ar nos turbogeradores, considera-se uma vazão mássica de ar seco de 80 kg/s a 510°C, correspondente a uma velocidade média de aproximadamente 46 m/s. A massa específica do ar a 500°C é cerca de 0,4567 kg/m³ e a viscosidade dinâmica aproximadamente $3,55 \cdot 10^{-5}$ Pa·s. Adotando como comprimento característico o diâmetro da chaminé, igual a 2,2 metros, o número de Reynolds é calculado como:

$$Re = \frac{0,4567 \cdot 46 \cdot 2,2}{3,55 \cdot 10^{-5}} \approx 1.302.000 \quad (3.5)$$

Assim como no escoamento do domínio principal, o escoamento nos turbogeradores também caracteriza-se como altamente turbulento.

3.1 Equações de Conservação

Em mecânica dos fluidos, o comportamento de um escoamento é descrito matematicamente pelas equações de conservação. De forma geral, são consideradas:

- Conservação da massa;
- Conservação da quantidade de movimento;
- Conservação de energia.

Assim, conforme [14], as equações de conservação são explicadas a seguir:

3.1.1 Conservação da massa

A lei de conservação da massa estabelece que a massa de um sistema fechado permanece constante, ou seja, a taxa de variação mássica é nula. Para o caso particular de um escoamento incompressível, no qual a massa específica é considerada constante no tempo e no espaço, obtém-se a equação diferencial da continuidade:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.6)$$

Onde u , v e w são as componentes de velocidades nas direções X , Y e Z .

3.1.2 Conservação da quantidade de movimento

A conservação da quantidade de movimento é descrita pela segunda lei de Newton, segundo a qual a taxa de variação do momento linear de um sistema é igual à soma das forças que atuam sobre ele. Essas forças podem ser classificadas em:

- Forças de corpo, que atuam em todo o volume do fluido, como a gravidade;
- Forças de superfície, que atuam sobre as áreas de controle, como a pressão e as tensões cisalhantes.

Aplicando esse princípio a um fluido newtoniano e combinando-o com a equação de conservação da massa, obtém-se as equações diferenciais da quantidade de movimento, conhecidas como equações de Navier–Stokes.

Admitindo que o escoamento ocorra em regime permanente e que o fluido seja incompressível, as equações de Navier–Stokes assumem a forma simplificada apresentada a seguir. Nessa forma, os termos de aceleração local são nulos e a densidade é considerada constante, restando apenas a contribuição convectiva, viscosa, de pressão e da gravidade. Em forma expandida para três dimensões:

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (3.7)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \quad (3.8)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \quad (3.9)$$

Em que p é a pressão, μ a viscosidade dinâmica e ρg representa as forças de corpo, como a gravidade.

3.1.3 Conservação de energia

A lei da conservação de energia estabelece que a energia total de um sistema fechado permanece constante, apenas transformada de uma forma em outra ou transferida entre corpos. No caso de fluidos, essa conservação se manifesta principalmente no transporte de calor, que se reflete em variações de temperatura. A energia interna de um elemento de fluido pode ser alterada por convecção, quando o próprio fluido transporta calor ao se mover, por condução, devido à difusão térmica, ou por fontes de calor internas. Dessa forma, o presente estudo da temperatura em uma pluma térmica está diretamente ligado ao balanço energético do fluido, sendo fundamental para descrever seu comportamento e evolução.

Para o presente estudo, não há geração volumétrica de calor, considerando-se apenas a mistura e difusão da pluma térmica com o ar ambiente. Aplicando este princípio a um elemento infinitesimal de fluido e adotando a forma térmica da equação de energia em regime permanente para fluido incompressível, o balanço térmico reflete o equilíbrio entre o transporte convectivo de energia e a difusão térmica:

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3.10)$$

Onde \mathbf{u} é o campo de velocidades com suas componentes em x , y e z , $\mathbf{u} \cdot \nabla T$ o termo convectivo, $\nabla^2 T$ o termo difusivo, c_p o calor específico, T a temperatura e k a condutividade térmica.

Para o caso de uma pluma térmica emitida a partir de uma fonte quente, é importante destacar que, além da convecção forçada associada à velocidade do jato, pode ocorrer convecção natural devido às diferenças de densidade causadas pela variação de temperatura.

Para representar matematicamente essa influência da flutuabilidade nas equações de movimento, emprega-se com frequência a aproximação de Boussinesq. Nessa aproximação, assume-se que todas as propriedades termofísicas do fluido permanecem constantes, exceto a densidade no termo de força de gravidade, onde sua variação com a temperatura é essencial para modelar o empuxo. Assim, a densidade é expressa como:

$$\rho = \rho_0[1 - \beta(T - T_0)] \quad (3.11)$$

Onde β é o coeficiente de expansão térmica, ρ_0 é a densidade de referência do fluido e T_0 uma temperatura de referência. Essa aproximação permite incorporar a convecção natural de forma consistente nas equações de movimento, mantendo a simplicidade da formulação para pequenas variações de temperatura.

3.2 Turbulência

SOUZA et al. [33] explicam que a turbulência é um regime de escoamento em que as variáveis instantâneas, como velocidade e temperatura, apresentam flutuações irregulares e aparentemente aleatórias, de modo que suas propriedades só podem ser descritas estatisticamente, o que torna o estudo desses escoamentos particularmente complexo.

Essas flutuações aumentam o transporte de quantidade de movimento, calor e massa, além de se tratar de escoamentos essencialmente dissipativos, exigindo um fornecimento contínuo de energia para compensar as perdas.

Assim, dada sua complexidade, a turbulência não pode ser tratada apenas de forma analítica, tornando simplificações extremamente úteis nos aspectos físicos, matemático e numérico. Por isso, diversas abordagens foram desenvolvidas para representá-la da forma mais realista possível, combinando equações diferenciais e constantes algébricas que, junto às equações de Navier–Stokes, permitem simular

seu comportamento. [8]

Embora não exista um modelo universal aplicável a todos os casos, três modelos são destacados abaixo:

- DNS (Simulação Numérica Direta): Este método resolve diretamente todas as escalas de turbulência no tempo e no espaço. Por isso, embora apresente uma precisão altíssima, requer um enorme poder computacional, tornando-se inviável para escoamentos complexos ou de grande escala;
- LES (Simulação de Grandes Escalas): Neste método, apenas as grandes escalas da turbulência são resolvidas diretamente, enquanto as pequenas escalas são modeladas por submodelos. Também exige um considerável esforço computacional, além de malhas bastante refinadas, mas consegue capturar com maior fidelidade as estruturas turbulentas significativas.
- RANS (Modelos Baseados nas Médias de Reynolds): Trata escoamentos turbulentos separando a velocidade em uma média temporal e uma flutuação turbulenta. Ao aplicar essa decomposição nas equações de Navier-Stokes e fazer a média, surgem termos adicionais chamados tensões de Reynolds, que representam os efeitos da turbulência sobre o escoamento médio. Essa abordagem, adotada nesse estudo, é amplamente utilizada em aplicações industriais, e não requer malhas tão refinadas quanto os modelos DNS ou LES.

3.2.1 Equações de Navier-Stokes Médias de Reynolds (RANS)

A Figura 3.1 representa o conceito explicado anteriormente de turbulência, caracterizada pela aleatoriedade de suas propriedades. Diante disso, POPE [34] utiliza análises estatísticas para representar as propriedades da turbulência.

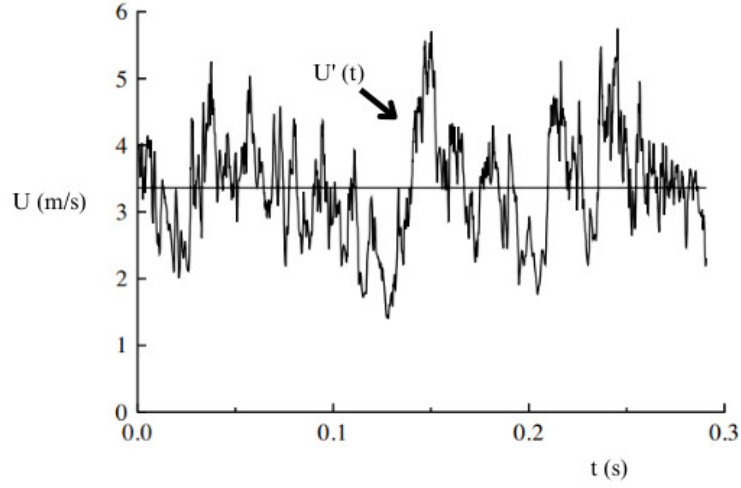


Figura 3.1: Variação no tempo da velocidade em um experimento. Adaptado de [34].

Em um escoamento turbulento, considerando uma propriedade Ω qualquer, que possui um comportamento aleatório, pode-se decompô-la em dois termos como na Equação 3.12:

$$\Omega = \bar{\Omega} + \Omega' \quad (3.12)$$

O primeiro termo da Equação 3.12 refere-se ao valor médio da propriedade e o segundo às flutuações derivadas da característica aleatória da turbulência.

Nesse estudo, as propriedades que são decompostas são a velocidade, nas direções X , Y e Z , a pressão e a temperatura. Assim, decompondo esses termos nas equações de conservação apresentadas anteriormente, obtém-se as equações médias de Reynolds:

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (3.13)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla \bar{\mathbf{u}} \right) = -\nabla \bar{p} + \mu \nabla^2 \bar{\mathbf{u}} - \rho \nabla \cdot \overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'} + \rho \mathbf{g} \quad (3.14)$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla \bar{T} \right) = k \nabla^2 \bar{T} - \rho c_p \nabla \cdot \overline{\mathbf{u}'T'} \quad (3.15)$$

Onde $\bar{\mathbf{u}}$ é a componente média do campo de velocidades com suas componentes em X , Y e Z , \bar{T} o valor médio da temperatura, t é o tempo, T' a flutuação da temperatura, $\overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'}$ o tensor de Reynolds e $\overline{\mathbf{u}'T'}$ o fluxo turbulento de calor.

3.2.2 Modelo Duas Equações

O modelo de duas equações baseia-se na resolução de duas equações diferenciais de transporte para descrever o comportamento do escoamento turbulento. Normalmente, uma equação governa a energia cinética turbulenta, enquanto a outra descreve sua taxa de dissipação ou a frequência associada, o que permite determinar tanto a escala de velocidade quanto a de comprimento da turbulência. Esse tipo de modelo é amplamente utilizado em simulações numéricas por oferecer um bom equilíbrio entre custo computacional e precisão dos resultados. [35]

Serão apresentados, a seguir, os principais modelos de duas equações: $\kappa - \epsilon$, $\kappa - \omega$ e *Shear Stress Transport* (SST). Todos eles relacionam as tensões de Reynolds aos gradientes de velocidade média, utilizando a viscosidade turbulenta definida a partir de comprimentos característicos da turbulência.

Modelo $\kappa - \epsilon$

O modelo $\kappa - \epsilon$ utiliza como variáveis a energia cinética turbulenta κ e sua taxa de dissipação ϵ , que é definida como a taxa na qual a velocidade das flutuações é dissipada. As duas variáveis são obtidas a partir das equações de transporte, dadas por:

$$\frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{U}\kappa) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \nabla\kappa \right] + P_\kappa - \rho\epsilon \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial(\rho\epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{U}\epsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla\epsilon \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\rho\epsilon}{\kappa} P_\kappa - C_{\epsilon 2} \frac{\rho\epsilon^2}{\kappa} \quad (3.17)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{\kappa^2}{\epsilon} \quad (3.18)$$

Onde ρ é a massa específica do fluido, κ é a energia cinética turbulenta [m^2/s^2], ϵ é a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta [m^2/s^3], \vec{U} é o vetor velocidade média, μ é a viscosidade, μ_t é a viscosidade turbulenta e P_κ é o termo de produção da energia cinética turbulenta, causada pelas forças viscosas e forças de flutuabilidade. Os valores das constantes C_μ , $C_{\epsilon 1}$, $C_{\epsilon 2}$, σ_κ e σ_ϵ são apresentados na Tabela abaixo:

Tabela 3.1: Constantes do modelo $\kappa - \epsilon$

C_μ	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	σ_κ	σ_ϵ
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

Esse modelo é amplamente empregado em aplicações de engenharia devido ao baixo custo computacional. Entretanto, apresenta desempenho limitado em regiões próximas a superfícies sólidas e em escoamentos com separação significativa da camada limite.

Modelo $\kappa - \omega$

No modelo $\kappa - \omega$, a segunda variável é a frequência específica da turbulência ω , relacionada à taxa de dissipação pela relação aproximada $\omega \approx \epsilon/\kappa$. As equações de transporte são:

$$\frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{U}\kappa) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \nabla\kappa \right] + P_\kappa - \beta^* \rho\kappa\omega \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{U}\omega) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla\omega \right] + \alpha \frac{\omega}{\kappa} P_\kappa - \beta \rho\omega^2 \quad (3.20)$$

$$\mu_t = \rho \frac{\kappa}{\omega} \quad (3.21)$$

Onde ρ é a massa específica do fluido, κ é a energia cinética turbulenta [m^2/s^2], ω é a frequência específica de turbulência [$1/\text{s}$], \vec{U} é o vetor velocidade média, μ é a viscosidade, μ_t é a viscosidade turbulenta e P_κ é o termo de produção da energia cinética turbulenta, causada pelas forças viscosas e forças de flutuabilidade. Os valores das constantes α , β , β^* , σ_κ e σ_ω são apresentados na tabela abaixo:

Tabela 3.2: Constantes do modelo $\kappa - \omega$

α	β	β^*	σ_κ	σ_ω
5/9	0.075	0.09	2.0	2.0

Esse modelo apresenta boa capacidade de prever escoamentos próximos à paredes sem a necessidade de funções de parede. No entanto, pode ser sensível às condições de contorno de ω , o que pode comprometer sua robustez em algumas aplicações.

Modelo Shear Stress Transport (SST)

O modelo SST, desenvolvido por MENTER [36], foi proposto para combinar as vantagens dos modelos $\kappa - \epsilon$ e $\kappa - \omega$, minimizando suas limitações. Sua formulação utiliza o modelo $\kappa - \omega$ nas regiões próximas à parede, onde este é mais confiável, e faz uma transição suave para o modelo $\kappa - \epsilon$ nas regiões afastadas da parede, onde apresenta maior estabilidade numérica. Dessa forma, esse foi o modelo de turbulência utilizado no presente estudo.

Assim, considerando também os efeitos de transporte da tensão cisalhante causada pela turbulência, obtém-se as seguintes equações:

$$\frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \kappa) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \nabla \kappa \right] + P_\kappa - \beta^* \rho \kappa \omega, \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \omega) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right] + (1 - F_1) \frac{2\rho}{\sigma_{\omega 2} \omega} \nabla \kappa \cdot \nabla \omega + \alpha \frac{\omega}{\kappa} P_\kappa - \beta \rho \omega^2, \quad (3.23)$$

$$\mu_t = \rho \frac{a_1 \kappa}{\max(a_1 \omega, S F_2)}, \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right). \quad (3.24)$$

Onde ρ é a massa específica do fluido, κ é a energia cinética turbulenta [m^2/s^2], ω é a frequência específica de turbulência [$1/\text{s}$], \vec{U} é o vetor velocidade média, μ é a viscosidade dinâmica, μ_t é a viscosidade turbulenta e P_κ é o termo de produção da energia cinética turbulenta, gerado principalmente pelo cisalhamento do escoamento

e eventualmente pela flutuabilidade. O parâmetro de limitação de cisalhamento a_1 tem valor igual a 0.31.

A função de mistura F_1 garante a transição entre os modelos $\kappa - \omega$ e $\kappa - \epsilon$. Próximo à parede, F_1 assume o valor de 1 e o modelo $\kappa - \omega$ descreve a turbulência. Enquanto que longe da parede, F_1 assume o valor de 0 e o modelo $\kappa - \epsilon$ faz a descrição da turbulência. Sua formulação é:

$$F_1 = \tanh(\text{arg}_1^4), \quad (3.25)$$

$$\text{arg}_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{\kappa}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4 \rho \sigma_{\omega 2} \kappa}{CD_{\kappa\omega} y^2} \right], \quad (3.26)$$

Onde y é a distância até a parede, $\nu = \mu/\rho$ é a viscosidade cinemática e $CD_{\kappa\omega}$ é o termo de difusão cruzada:

$$CD_{\kappa\omega} = \max \left(2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \nabla\kappa \cdot \nabla\omega, 10^{-20} \right). \quad (3.27)$$

No modelo SST, as constantes que aparecem nas equações de transporte são obtidas por interpolação entre os valores característicos de cada modelo, segundo a regra:

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2, \quad (3.28)$$

Onde ϕ_1 corresponde ao modelo $\kappa - \omega$ e ϕ_2 ao modelo $\kappa - \epsilon$. Assim, tem-se:

$$\alpha = \frac{5}{9} F_1 + 0.44(1 - F_1), \quad (3.29)$$

$$\beta = 0.075 F_1 + 0.0828(1 - F_1), \quad (3.30)$$

$$\sigma_\kappa = 2 F_1 + 1(1 - F_1), \quad (3.31)$$

$$\sigma_\omega = 2 F_1 + \frac{1}{0.856}(1 - F_1). \quad (3.32)$$

Portanto, quando $F_1 = 1$, recuperam-se os valores do modelo $\kappa - \omega$ e quando $F_1 = 0$, os valores do modelo $\kappa - \epsilon$.

Por fim, a função F_2 é usada apenas na definição da viscosidade turbulenta, de forma a suavizar a limitação por cisalhamento. Ela é dada por:

$$F_2 = \tanh(\text{arg}_2^2), \quad (3.33)$$

$$\text{arg}_2 = \max\left(\frac{2\sqrt{\kappa}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega}\right). \quad (3.34)$$

Os valores das constantes são resumidos na tabela 3.3 abaixo:

Tabela 3.3: Constantes típicas dos modelos $\kappa-\omega$, $\kappa-\epsilon$ SST

Constante	$k-\omega$	$k-\epsilon$	SST
α	$5/9 \approx 0.5556$	0.44	$\alpha = F_1 \cdot \frac{5}{9} + (1 - F_1) \cdot 0.44$
β	0.075	0.0828	$\beta = F_1 \cdot 0.075 + (1 - F_1) \cdot 0.0828$
β^*	0.09	0.09	0.09
σ_κ	2	1	$\sigma_\kappa = F_1 \cdot 2.0 + (1 - F_1) \cdot 1$
σ_ω	2	$1/0.856 \approx 1.167$	$\sigma_\omega = F_1 \cdot 2 + (1 - F_1) \cdot \frac{1}{0.856}$
a_1	–	–	0.31

Graças a essa formulação híbrida, o modelo SST tornou-se um dos mais utilizados em simulações de CFD, equilibrando precisão e estabilidade numérica. Sua aplicação é recomendada em problemas envolvendo separação de escoamento, efeitos de parede e condições complexas de gradiente de pressão.

3.3 Condições de contorno na forma contínua

As equações diferenciais que regem o escoamento incompressível e o transporte de energia requerem condições de contorno adequadas, fundamentais para a correta formulação do problema e para garantir que a solução numérica seja fisicamente consistente. De modo geral, essas condições são aplicadas sobre a fronteira do domínio, denotada por Γ , e podem ser classificadas segundo o tipo de informação prescrita:

$$\Gamma = \Gamma_D \cup \Gamma_N \cup \Gamma_R, \quad (3.35)$$

Os termos correspondem, respectivamente, às condições de Dirichlet, Neumann e Robin.

As condições de Dirichlet, também chamadas de essenciais, impõem diretamente o valor de uma variável na fronteira, como ocorre ao prescrever a velocidade $u = u_D$ ou a temperatura $T = T_D$ em Γ_D .

As condições de Neumann, ou naturais, especificam o valor do gradiente normal da variável, representando, por exemplo, um gradiente de pressão nulo na direção normal da saída de um escoamento.

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0. \quad (3.36)$$

As condições de Robin são combinações lineares das anteriores, relacionando o valor da variável e de seu gradiente, sendo típicas de trocas convectivas:

$$-k\nabla T \cdot \mathbf{n} = h(T - T_\infty), \quad \text{em } \Gamma_R, \quad (3.37)$$

Onde k é a condutividade térmica do fluido, h é o coeficiente de convecção, \mathbf{n} é o vetor normal unitário à superfície na direção para fora do domínio, e T_∞ é a temperatura do fluido ambiente.

Em termos físicos, as condições de contorno representam diferentes interações do fluido com seu entorno, explicadas abaixo de acordo com SOUZA et al [32].

Para fronteiras sólidas, utiliza-se a condição de parede, que pode assumir diferentes modelos. O mais comum é o de não escorregamento, em que a velocidade do fluido na superfície é igual à da parede, e geralmente nula, representando o efeito viscoso de aderência do fluido. Alternativamente, pode-se aplicar a condição de

escorregamento, em que o fluido não penetra na parede, mas não sofre resistência tangencial, hipótese associada à superfícies lisas.

Outro tipo importante de condição é a de simetria, que reduz o domínio computacional ao impor ausência de fluxo normal e gradiente nulo das variáveis na direção normal, sendo útil quando a geometria e o escoamento apresentam simetria.

As regiões denominadas de entrada prescrevem valores de velocidade ou pressão total. Já nas regiões de saída, adota-se tipicamente gradiente nulo para as variáveis de velocidade e pressão estática conhecida, desde que posicionado em uma região de escoamento bem desenvolvido.

Por fim, as fronteiras de abertura permitem entrada ou saída de fluxo conforme o gradiente local de pressão, sendo adequadas para domínios abertos e ambientes externos.

Na formulação variacional das equações (forma fraca), as condições de Dirichlet são tratadas como essenciais, pois definem o espaço de soluções admissíveis, enquanto as condições de Neumann e Robin são naturais, surgindo automaticamente nos termos de contorno após a integração por partes. Essa distinção é fundamental no método dos elementos finitos e nos esquemas de volumes finitos, pois determina como cada condição é implementada numericamente.

Capítulo 4

Modelo de simulação

As simulações foram realizadas com o uso do *software* ANSYS CFX (versão 2025 R1), que utiliza o método dos volumes finitos para o escoamento de fluidos. A geometria, condições do problema e convergência da malha são apresentadas nos itens abaixo.

4.1 Construção da geometria

O modelo geométrico foi elaborado a partir de uma unidade real, no módulo Discovery do Ansys. A Figura 4.1 apresenta algumas vistas do modelo geométrico.

Para a análise, com o intuito de evitar complicações na geração da malha do domínio, a geometria foi simplificada. Dessa forma, detalhes geométricos que tem pouco impacto sobre o helideque foram desconsiderados, como por exemplo a torre de flare e as baleeiras.

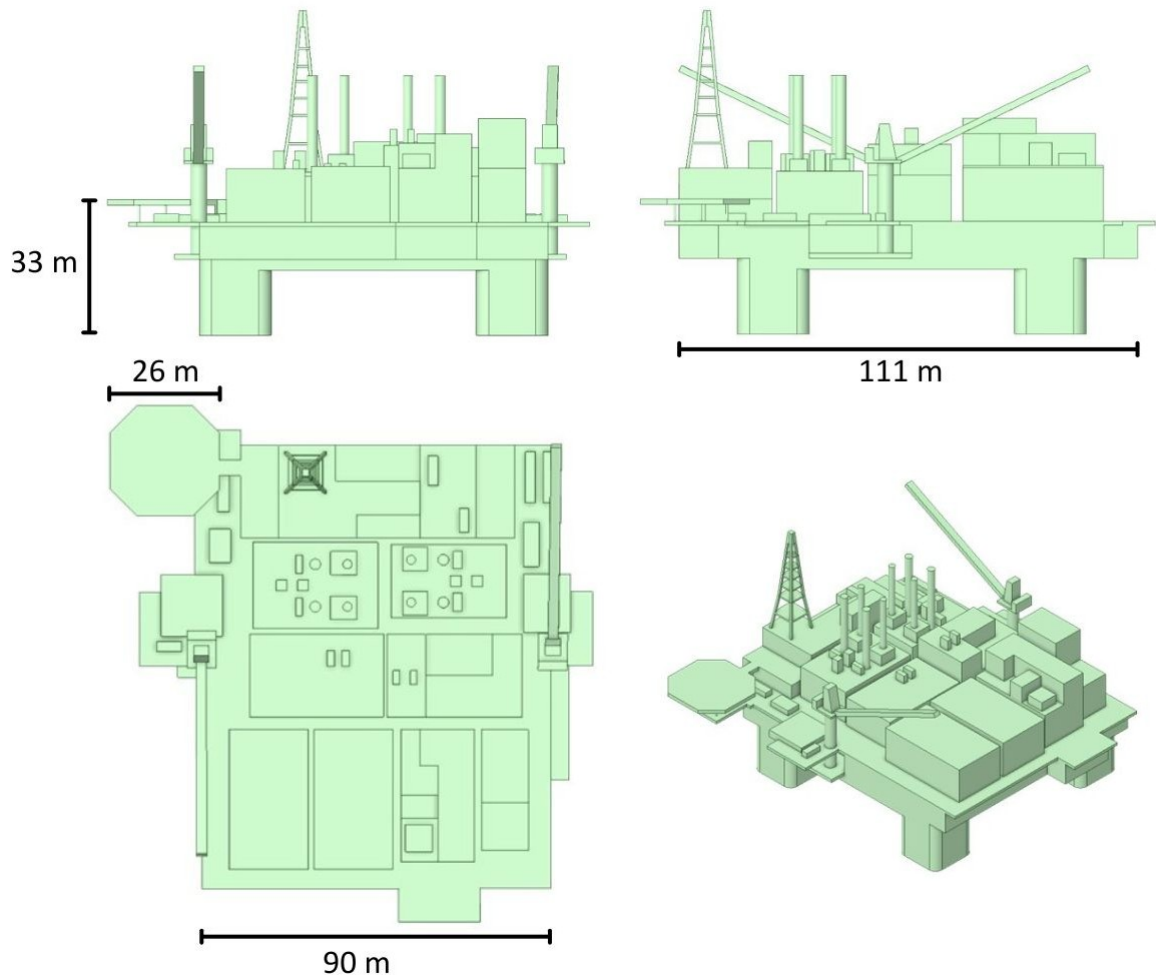


Figura 4.1: Modelo geométrico da plataforma utilizado na simulação, com medidas aproximadas. Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Condições de contorno do problema

As condições de contorno foram definidas de forma a representar o comportamento físico do escoamento e da pluma térmica sobre o helideque. Dessa forma, estabeleceu-se o domínio computacional, correspondente ao volume de fluido considerado nas simulações do Ansys CFX. Foi adotado um volume cilíndrico de 1500 metros de diâmetro ao redor da plataforma, assegurando que os efeitos de fronteira não interfiram no escoamento próximo à região de interesse. A altura do cilindro é de 200 metros, de modo que as perturbações geradas pela plataforma não alcancem o limite superior do domínio. Além disso, por se tratar de um domínio extenso e

circular, torna-se possível simular diferentes direções de vento utilizando a mesma malha. O domínio computacional é apresentado na Figura 4.2.

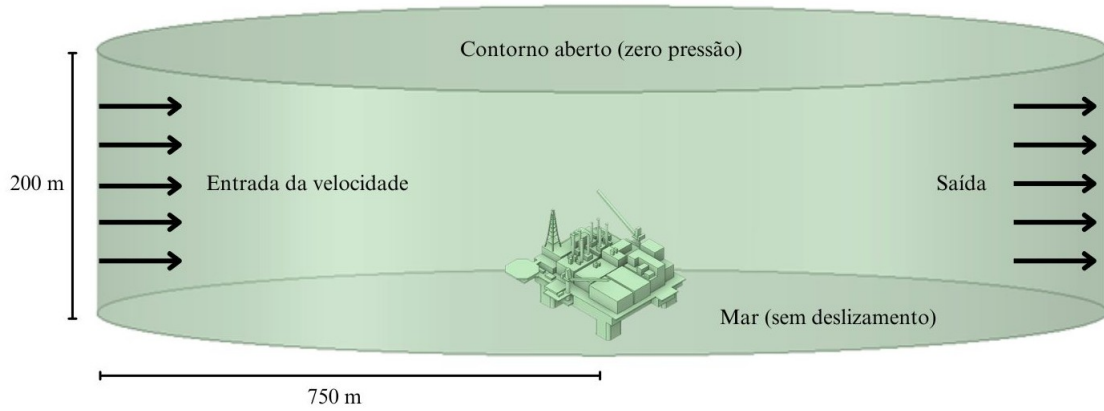


Figura 4.2: Condições de contorno aplicadas no problema. Fonte: Elaborado pelo autor.

As condições de contorno adotadas em cada região do domínio são descritas a seguir:

4.2.1 Superfície superior

Na superfície superior do domínio foi aplicada uma condição de saída, em que a pressão estática foi fixada em zero (condição de Dirichlet), enquanto as componentes de velocidade foram deixadas livres para se ajustarem conforme a solução numérica. Dessa forma, o fluido pode escoar para fora do domínio sem induzir reflexões artificiais no campo de escoamento.

$$\frac{\partial U}{\partial n} = \frac{\partial V}{\partial n} = \frac{\partial W}{\partial n} = 0, \quad p = 0. \quad (4.1)$$

4.2.2 Superfície inferior

A superfície inferior corresponde ao plano do mar. Considerando sua relevância para a formação da camada limite atmosférica, foi imposto o efeito de atrito característico de uma parede com condição de não escorregamento. No entanto, a rugosidade do mar não foi considerada explicitamente, visto que depende do estado

de agitação da superfície, embora influencie na transferência de quantidade de movimento entre o vento e o mar, podendo resultar no arraste de partículas de água e na modificação do perfil de velocidade próximo à interface.

No entanto, como o perfil de vento adotado considera a variação da velocidade em função da altura em relação à superfície do mar [13], optou-se por adotar uma condição de contorno idealizada, tratando o mar como uma superfície lisa, rígida e adiabática. Essa simplificação tende a resultar em maiores intensidades de velocidade do vento em comparação ao caso rugoso, configurando-se, portanto, como uma condição conservadora.

$$U = V = W = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (4.2)$$

4.2.3 Superfície lateral

Na superfície lateral foram prescritas as condições de contorno referentes ao escoamento incidente. Para cada caso de análise, definiu-se um perfil de velocidades específico, caracterizado por direção constante e intensidade variável com a altura, de modo a representar adequadamente o perfil atmosférico. Além disso, foi considerada temperatura ambiente uniforme de 25 °C em toda a fronteira. A fim de permitir flexibilidade na configuração do domínio e nas diferentes orientações do vento, essa condição de entrada foi implementada no ANSYS CFX como abertura, possibilitando que a fronteira atue de forma consistente tanto como entrada quanto, se necessário, como saída local de escoamento.

Dessa forma, essa fronteira define a velocidade prescrita em toda a circunferência, sendo que o sentido do vetor velocidade varia espacialmente conforme a orientação local da superfície e a direção do escoamento imposta.

$$T = 25 \text{ °C}, \quad \frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (4.3)$$

De acordo com SILVA e PAGOT [13], os ventos atmosféricos apresentam um perfil de velocidade vertical que deve ser nulo ao nível do mar e totalmente desenvolvido no topo da camada limite. Dessa forma, o perfil típico de vento estabelecido

é apresentado na Eq. 4.4 abaixo, em que $U(z)$ representa a velocidade horizontal em função da altura z acima da superfície do mar e U_{ref} a velocidade de referência, definida como a velocidade horizontal a 10 metros acima da superfície média do mar. Neste trabalho, foram consideradas três velocidades de referência: 1, 7 e 15 m/s.

$$U(z) = U_{ref} \left(\frac{z}{10} \right)^{0.11} \quad (4.4)$$

A partir da Eq. 4.4, determinam-se as componentes de velocidades no contorno lateral, nas direções X , Y e Z , em função do ângulo θ de incidência do vento em relação à plataforma:

$$U = U(z) \cos \theta \quad V = U(z) \sin \theta \quad W = 0 \quad (4.5)$$

Assim, para cada direção de vento investigada, foram definidos os ângulos de incidência correspondentes nas direções X e Y , conforme orientação mostrada na Figura 4.3.

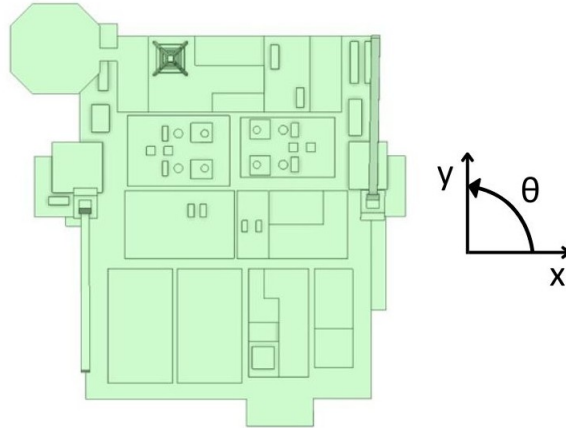


Figura 4.3: Ângulo θ de incidência do vento em relação à plataforma. Fonte: Elaborado pelo autor.

A componente vertical da velocidade (W) é considerada nula, pois o escoamento atmosférico de entrada é predominantemente horizontal. Assim, variações na direção vertical são desprezíveis na condição de contorno, sendo geradas apenas interna-

mente no domínio devido à interação com a plataforma e à evolução da pluma térmica.

4.2.4 Superfície da plataforma

A superfície da plataforma foi tratada como uma parede sólida rígida, lisa e adiabática. Nesse contorno, foram impostas as condições de impenetrabilidade e de não escorregamento, representando adequadamente a interação entre o escoamento atmosférico e a estrutura da plataforma.

$$U = V = W = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (4.6)$$

4.3 Condições operacionais e do escoamento

A seguir, são apresentadas as características dinâmicas da simulação, definidas de modo a tornar o problema o mais próximo possível da realidade e, conseqüentemente, validar os resultados obtidos. As condições consideradas para o escoamento foram:

- Intesidade de turbulência: 5%;
- Regime: estacionário;
- Fluido: ar a 25 °C;
- Transferência de calor ativada na forma de energia térmica;
- Modelo de turbulência: SST;
- Plataforma estática, sem qualquer movimento.

Adicionalmente, definiram-se as condições de vento e de operação dos turbogeradores, conforme descrito nas subseções 4.3.1 e 4.3.2.

4.3.1 Turbogeneradores

As fontes de gases quentes utilizadas na análise foram consideradas como provenientes dos turbogeradores, como mencionado no item 2.2.1. A vazão de gases

de exaustão considerada nas simulações foi de 288.000 kg/h (80 kg/s), com temperatura de saída de 510 °C, sem passar pela WHRU (*Waste Heat Recovery Unit*). Embora cada turbogerador possua duas chaminés de saída, sendo uma para o gás que passa pelo WHRU e outra para o gás que não passa, considerou-se a operação com apenas uma chaminé por turbogerador, totalizando quatro chaminés sem WHRU. Essa escolha decorre de uma premissa conservadora, adotando a vazão total de cada turbogerador concentrada na chaminé com maior temperatura.

Os valores adotados para vazão mássica e temperatura de exaustão estão em conformidade com dados da literatura de turbogeradores em plataformas *offshore*. Por exemplo, BAZALUK et al. [37] indicam temperaturas de exaustão entre 347 e 577 °C, justificando a escolha de 510 °C como uma condição conservadora de operação sem passagem pelo WHRU. Da mesma forma, o valor de 80 kg/s adotado para a vazão mássica pode ser considerado uma boa estimativa, com base em dados apresentados por KAMRANPEY [38].

Na Figura 4.4, em vermelho, estão indicadas as saídas e respectivas chaminés consideradas nas simulações. A superfície de cada chaminé é tratada como condição de contorno representando a entrada de ar à dada temperatura. Assim, para os propósitos desta análise, a composição do fluido não exerce influência significativa e, por simplicidade, assume-se que se trata de saídas de ar seco.

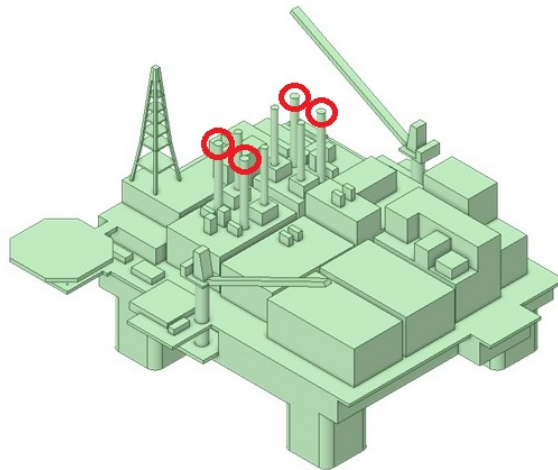


Figura 4.4: Identificação das chaminés e as saídas de gases quentes. Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.2 Direções e intensidades de vento

Com base em dados de vento de uma plataforma real, diferentes casos de magnitude e direção foram modelados e avaliados, visando identificar o impacto da pluma térmica gerada pelos turbogeradores na região do helideque. Considerando a plataforma com a proa orientada para o Norte, de acordo com a rosa dos ventos, verificou-se que os ventos de Leste-sudeste (ESE), Sudeste (SE) e Sul-sudeste (SSE) favorecem o deslocamento das plumas térmicas para a região do helideque.

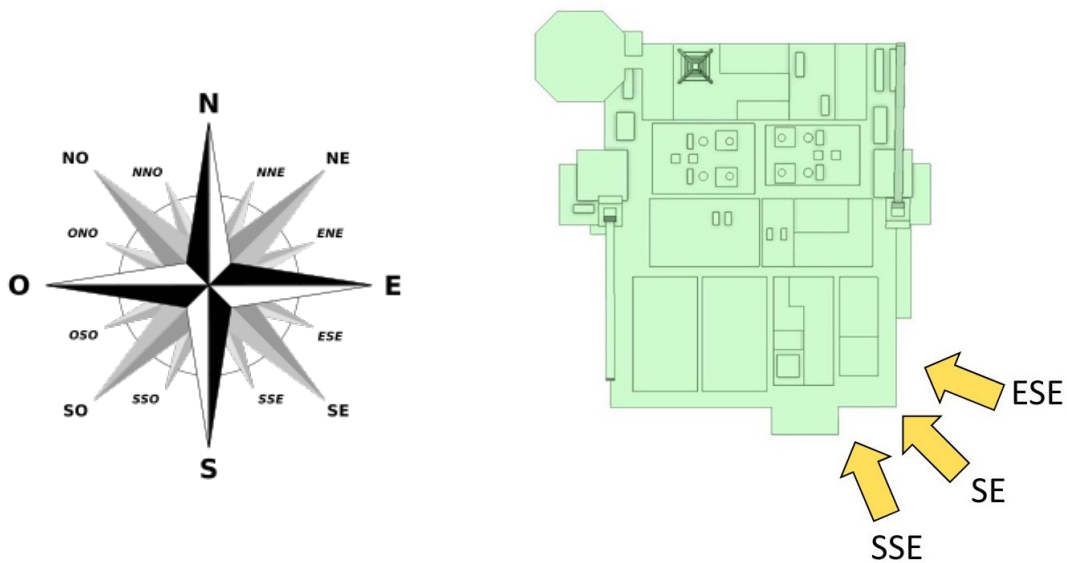


Figura 4.5: Rosa dos ventos e direções escolhidas para simulação de pluma térmica. Fonte: Adaptado de [39].

Para a escolha das velocidades de vento para a simulação, levou-se em consideração que, em média, os ventos variam entre 0 e 15 m/s, sendo que acima desse patamar ocorrem apenas regimes de eventos especiais. Este comportamento é comprovado pelo estudo de Xu et al. [40], que comparou diferentes produtos de vento com medições de boias meteorológicas na região da baía de Santos.

4.4 Geração da malha

Para a análise CFD do problema em questão, a geometria deve ser discretizada em volumes de controle, formando a malha computacional. Essa etapa é fundamental para garantir resultados acurados na simulação.

Foram definidos volumes de controle para a plataforma e para o escoamento, bem como regiões específicas no helideque e nos turbogeradores. Esses quatro conjuntos foram denominados domínio externo, domínio da plataforma, domínio do helideque e domínio dos turbogeradores. A Figura 4.6 apresenta a divisão adotada.

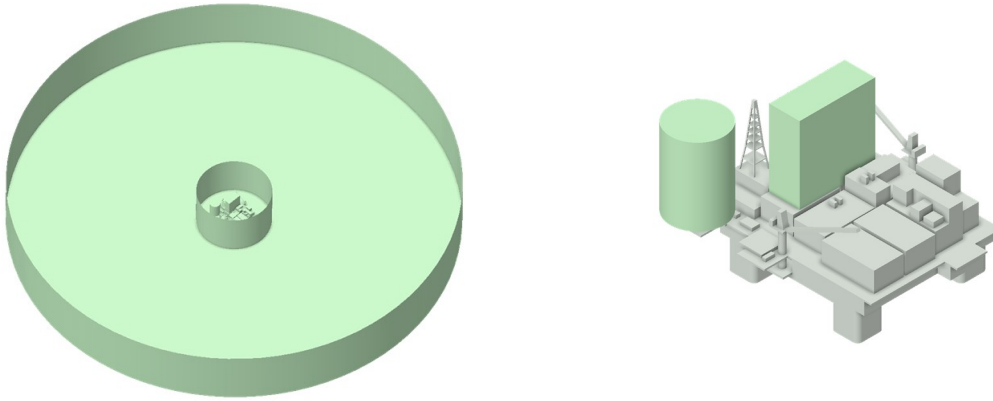


Figura 4.6: Volumes de controle para discretização da malha computacional. Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesse cenário, malhas mais refinadas tendem a fornecer maior acurácia, porém com maior custo computacional. Assim, torna-se necessário realizar o teste de convergência de malha, refinando-a até que os resultados apresentem variação desprezível, de modo a obter soluções válidas com o menor custo possível.

Foram analisadas quatro malhas distintas, denominadas Malha 1 (menos refinada) a Malha 4 (mais refinada). A Tabela 4.1 apresenta o tamanho dos elementos em cada domínio considerado.

Tabela 4.1: Tamanho dos elementos de malha para cada volume de controle do problema

	Externo	Plataforma	Helideque	Turbogeradores
Malha 1	40 m	6 m	2 m	2 m
Malha 2	20 m	3 m	1 m	1 m
Malha 3	12 m	1,8 m	0,6 m	0,6 m
Malha 4	10 m	1,5 m	0,5 m	0,5 m

As malhas geradas, portanto, forneceram os seguintes números de nós e elementos:

Tabela 4.2: Número de nós e elementos para cada malha considerada

Malha	Número de nós	Número de elementos
1	295.130	1.473.405
2	964.050	5.124.885
3	3.296.816	18.296.835
4	5.249.836	29.394.298

Para avaliação da qualidade da malha, foram analisados os resultados de cada uma para o mesmo caso simulado: vento a 7 m/s na direção Sudeste (SE). Os parâmetros para comparação foram o comprimento e o formato das plumas térmicas geradas. Essas plumas são representadas por isosuperfícies coloridas: as amarelas indicam aumento de 2 °C em relação à temperatura ambiente, enquanto a vermelha corresponde a um aumento de 30 °C.

A seguir, apresentam-se as vistas laterais e superiores obtidas para cada malha.

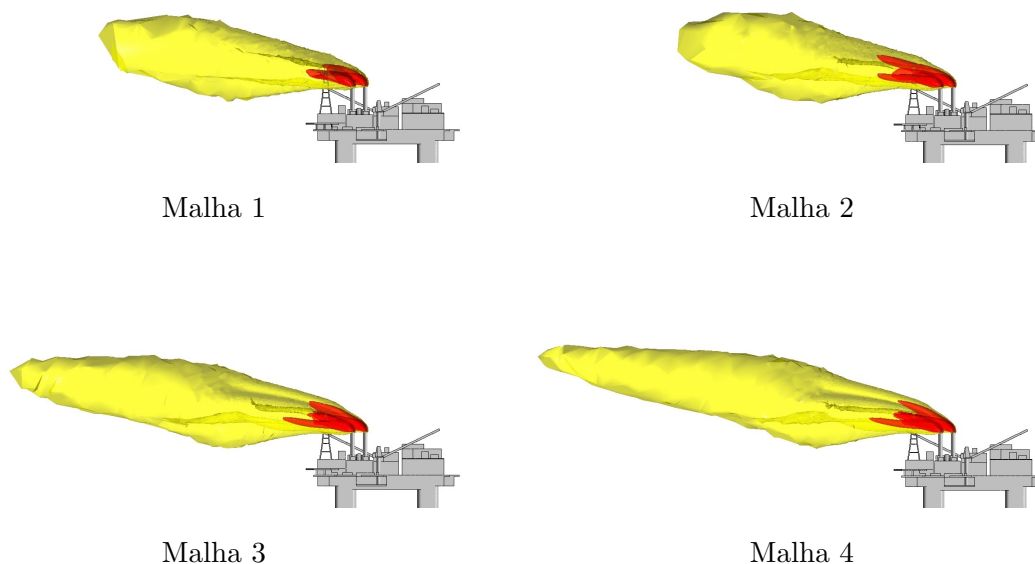


Figura 4.7: Vista laterais dos resultados das 4 malhas. Fonte: Elaborado pelo autor.

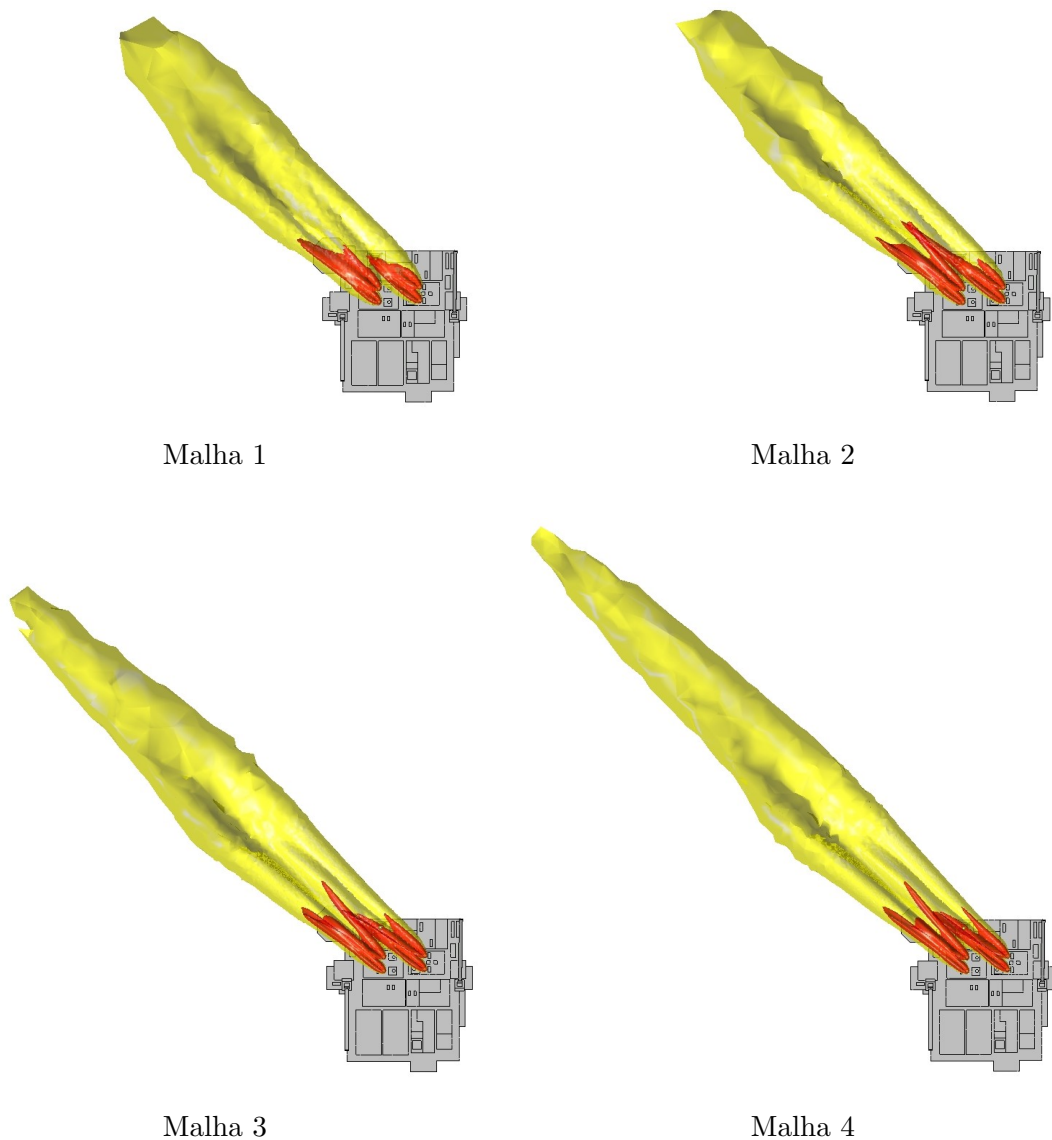


Figura 4.8: Vista superiores dos resultados das 4 malhas. Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nas imagens apresentadas, observa-se que as malhas 3 e 4, mais refinadas, resultaram em plumas de maior comprimento e atingiram números de nós e elementos compatíveis com os critérios de qualidade definidos para o estudo. Ambas apresentaram resultados semelhantes, indicando convergência, sobretudo nas isosuperfícies vermelhas, na região do helideque. A medição do comprimento aproximado das plumas térmicas reforça essa conclusão, com valores de 292, 308, 405 e

478 metros para as malhas 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Nota-se que o aumento do refinamento está associado a uma representação mais realista e contínua da pluma. Portanto, considerando a otimização do custo computacional, a malha 3 foi escolhida para as análises subsequentes.

As Figuras 4.9, 4.10 e 4.11 apresentam a configuração da malha 3, sendo uma vista lateral em corte de todo o domínio, uma vista lateral em corte com foco no domínio da plataforma e do helideque, e uma outra vista lateral em corte com foco no domínio da plataforma e dos turbogeradores.

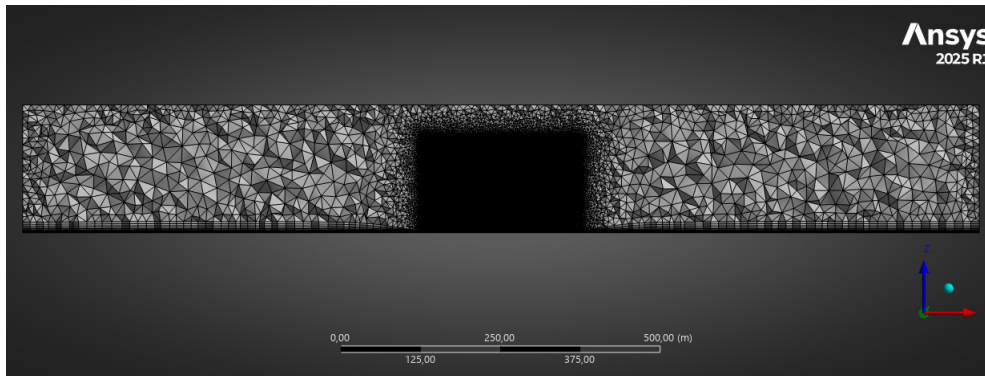


Figura 4.9: Vista lateral em corte do domínio da malha 3 escolhida. Fonte: Elaborado pelo autor.

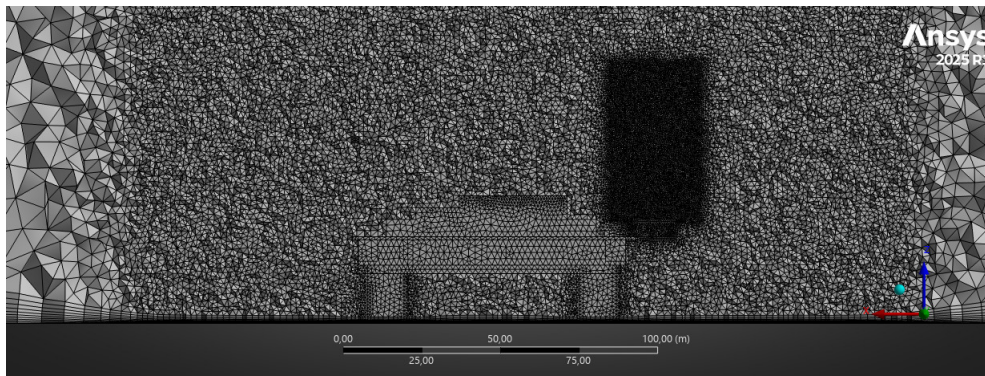


Figura 4.10: Vista lateral em corte com foco no domínio da plataforma e do helideque. Fonte: Elaborado pelo autor.

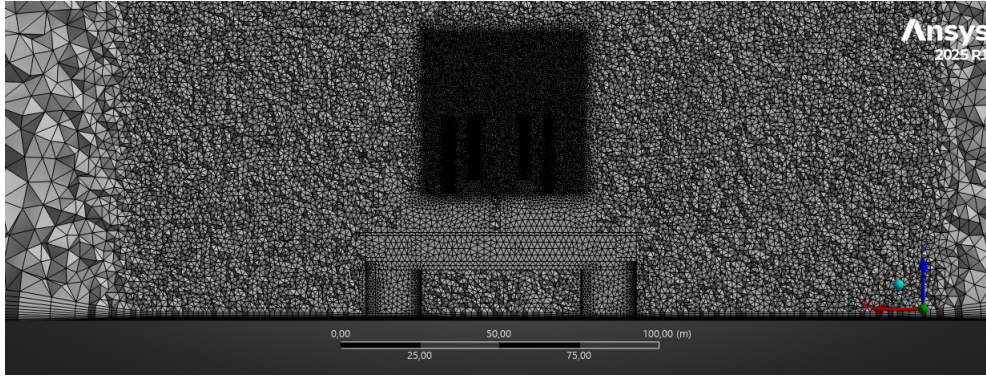


Figura 4.11: Vista lateral em corte com foco no domínio da plataforma e dos turbogeradores. Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 Critérios de convergência

Na resolução numérica de problemas não lineares, como os associados à dinâmica dos fluidos, métodos iterativos são empregados para aproximar a solução. Entre os mais utilizados estão o método de Picard, de iterações sucessivas, caracterizado por sua robustez e convergência linear mais lenta, e o método de Newton-Raphson, que apresenta convergência quadrática quando próximo da solução, porém com maior custo computacional. No caso do ANSYS CFX, utilizado neste trabalho, a abordagem empregada é baseada no método de Newton.

As simulações foram executadas buscando-se uma solução em regime permanente, o que constitui uma aproximação adequada para a avaliação de helideques, ao invés do regime transiente. O critério de convergência adotado consistiu na redução dos resíduos das equações governantes, compreendendo as equações de conservação da quantidade de movimento nas direções X, Y e Z, da conservação de massa, da conservação de energia e das equações adicionais do modelo de turbulência SST. A convergência foi considerada atingida quando os resíduos de todas essas equações apresentaram valores inferiores a 10^{-5} .

Devido à complexidade do fluxo em todo o domínio, esse critério de convergência requer um número muito grande de iterações. Portanto, além dos resíduos, monitorou-se também o escoamento na região de interesse sobre o helideque. Assim foi possível avaliar, por exemplo, a evolução ao longo da simulação da energia cinética turbulenta em um ponto próximo ao helideque. E como critério adicio-

nal, a solução foi considerada finalizada quando, após 1000 iterações, não houvesse variação significativa desse parâmetro.

Capítulo 5

Resultados

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos nas simulações, bem como os critérios de avaliação adotados.

5.1 Critérios de avaliação

Conforme discutido no item 2.3, normas internacionais estabelecem critérios para o escoamento sobre helideques. As plumas de gases quentes podem comprometer a segurança das operações aéreas, sobretudo devido à variação de potência dos motores, ocasionada pela admissão de ar aquecido no processo de combustão.

Além das normas já mencionadas, destaca-se também a norma britânica CAP 437 [26], que define um limite máximo de variação de 2°C acima da temperatura ambiente no espaço aéreo do helideque.

No que se refere à distribuição de temperaturas nessa região, a NORSOK C-004 [41] descreve três métodos aplicáveis à avaliação: o método 1, de caráter determinístico, e os métodos 2 e 3, fundamentados em análises de risco.

- **Método 1:** trata-se de uma aproximação conservadora recomendada para o desenvolvimento de novas instalações. Baseia-se na análise de dispersão da pluma e estabelece que o espaço sobre o helideque não deve ser exposto a um aumento de temperatura superior a 2°C (mesmo critério definido pela norma CAP 437 [26]). Caso este método seja inviável, impraticável ou incompatível, devem-se considerar os métodos 2 e 3, que utilizam abordagens baseadas em análises de risco;

- **Método 2:** constitui uma simplificação do método 3, aplicável a determinadas configurações de turbogeradores. Define alturas mínimas de chaminés em função da distância ao helideque e da potência da turbina. Quando não for adequado à situação em análise, recomenda-se a utilização do método 3;
- **Método 3:** corresponde a uma abordagem completa baseada em análise de risco, desenvolvida em conjunto com operadores de helicópteros *offshore*. Este método avalia os gradientes de temperatura no espaço aéreo acima do helideque por meio de medidas pré-definidas, associando-os a diferentes níveis de risco.

A quantificação dos riscos associados aos perfis verticais de temperatura pode ser realizada por meio da metodologia denominada Matriz de Gradiente de Temperatura (*Temperature Gradient Matrix – TGM*), conforme descrito em [25], e apresentada na Figura 5.1 abaixo.

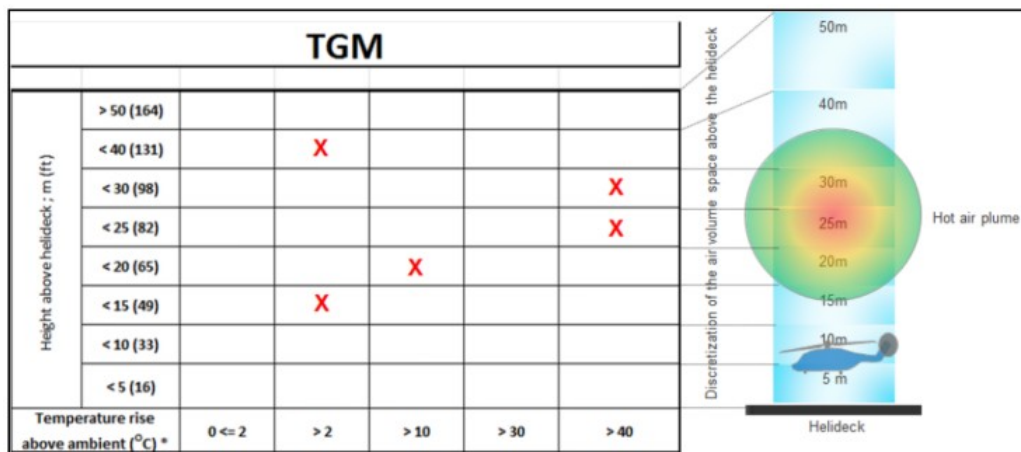


Figura 5.1: Exemplo de Matriz de Gradiente de Temperatura de uma pluma de ar quente sobre um helideque. Fonte: [25]

Nessa matriz, as colunas representam o aumento máximo de temperatura em relação ao ambiente (em °C), enquanto as linhas correspondem às alturas no espaço aéreo acima do helideque. O volume considerado é discretizado em intervalos de 5 metros até 30 metros de altura e, a partir desse ponto, em intervalos de 10 metros.

Os níveis de risco são então classificados e apresentados na Figura 5.2, com o seguinte padrão de cores para avaliação de risco: verde para operação normal, amarelo para operação com atenção e vermelho para restrição de operações.

Elevação em relação ao helideck (m)	> 50 m					
	< 40 m					
	< 30 m					
	< 25 m					
	< 20 m					
	< 15 m					
	< 10 m					
	< 5 m					
Elevação de temperatura máxima em relação à temperatura ambiente (°C)	0 - 2 °C	> 2 °C	> 10 °C	> 30 °C	> 40 °C	

Zona	Recomendação
	Sem operações
	Operação com atenção
	Operação normal

Figura 5.2: Matriz TGM com recomendações dependendo da temperatura atingida.

Fonte: Adaptado de [25]

5.2 Extração de resultados

Os valores de temperatura máxima foram obtidos em diferentes níveis de elevação acima do helideque. Para isso, definiram-se volumes cilíndricos com diâmetro suficiente para abranger toda a área do helideque. Em cada volume, extraiu-se o valor máximo de elevação de temperatura em relação à temperatura ambiente de 25 °C.

A Figura 5.3 apresenta os cilindros considerados, de acordo com os intervalos de altura definidos na Figura 5.1. A escala de cores segue o padrão em arco-íris apenas para fins ilustrativos, facilitando a identificação visual das diferentes faixas de altura.

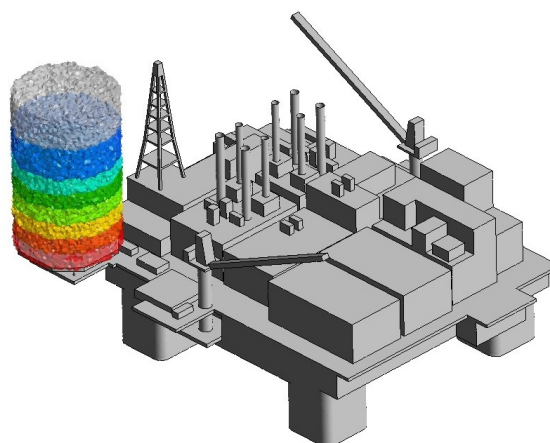


Figura 5.3: Volumes cilíndricos para extração de resultados do modelo. Fonte:

Elaborado pelo autor.

5.3 Avaliação de pluma térmica

A seguir, são apresentados os resultados para os casos analisados, separado por intensidade de vento, seguindo o critério de avaliação descrito no item 5.1. Foram calculados os valores máximos de elevação de temperatura em relação à temperatura ambiente em regiões cilíndricas acima do helideque, conforme ilustrado na Figura 5.3.

Como mencionado em 4.4, as plumas térmicas geradas são formadas por isosuperfícies amarelas, que correspondem a um aumento de 2 °C em relação à temperatura ambiente, e vermelhas, que representam um aumento de 30 °C. As diferenças de tonalidade observadas nas isosuperfícies, com regiões mais claras e mais escuras, são apenas efeitos visuais do sombreamento aplicado pelo *software*, não representando variações reais nas grandezas simuladas. Além da visualização das plumas, são também apresentadas as Matrizes de Gradiente de Temperatura (TGM).

5.3.1 Velocidade de vento: 1 m/s

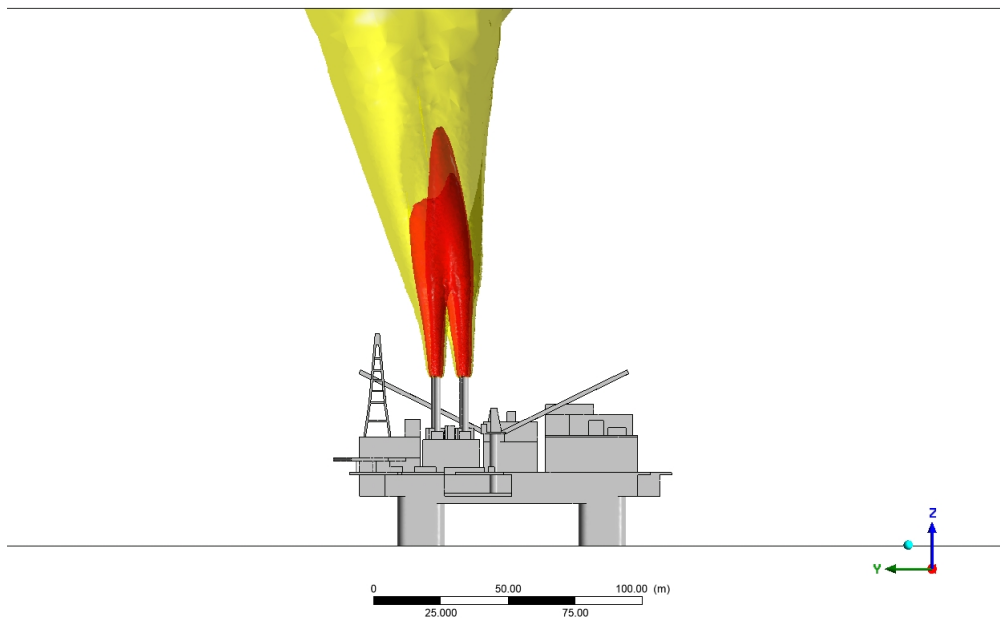


Figura 5.4: Vista lateral para intensidade de vento de 1 m/s, na direção Leste-sudeste (ESE). Fonte: Elaborado pelo autor.

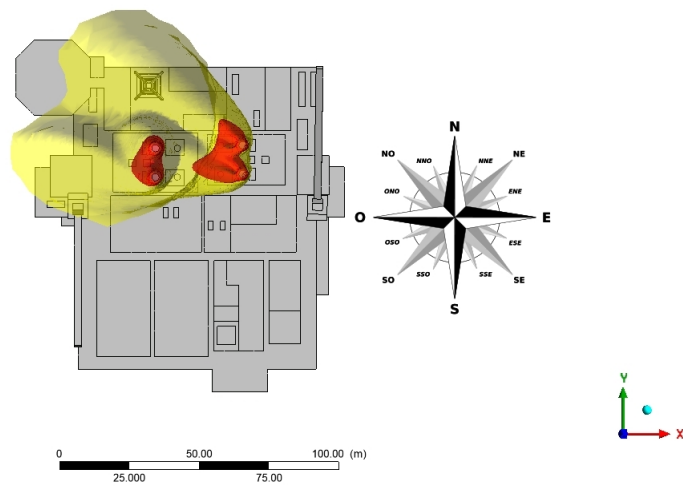


Figura 5.5: Vista superior para intensidade de vento de 1 m/s, na direção Leste-sudeste (ESE). Fonte: Adaptado de [39].

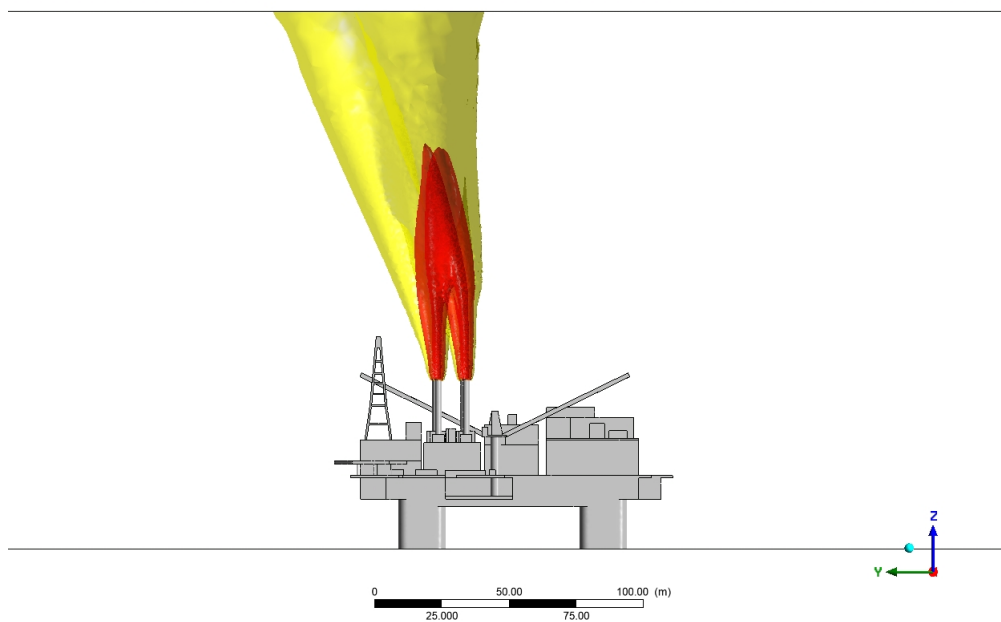


Figura 5.6: Vista lateral para intensidade de vento de 1 m/s, na direção Sudeste (SE). Fonte: Elaborado pelo autor.

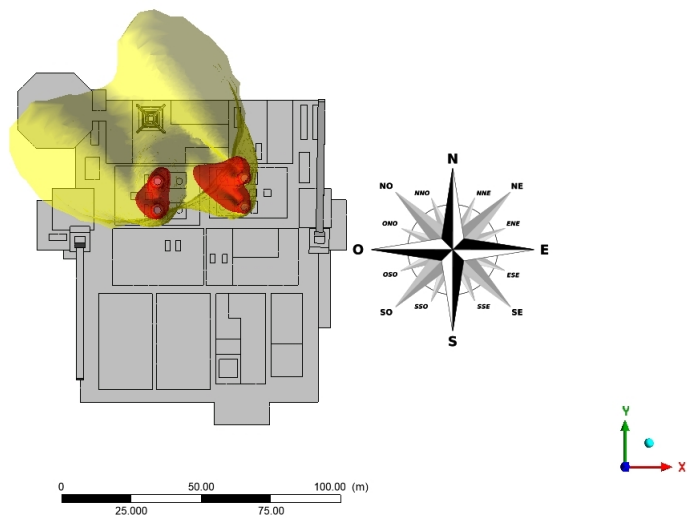


Figura 5.7: Vista superior para intensidade de vento de 1 m/s, na direção Sudeste (SE). Fonte: Adaptado de [39].

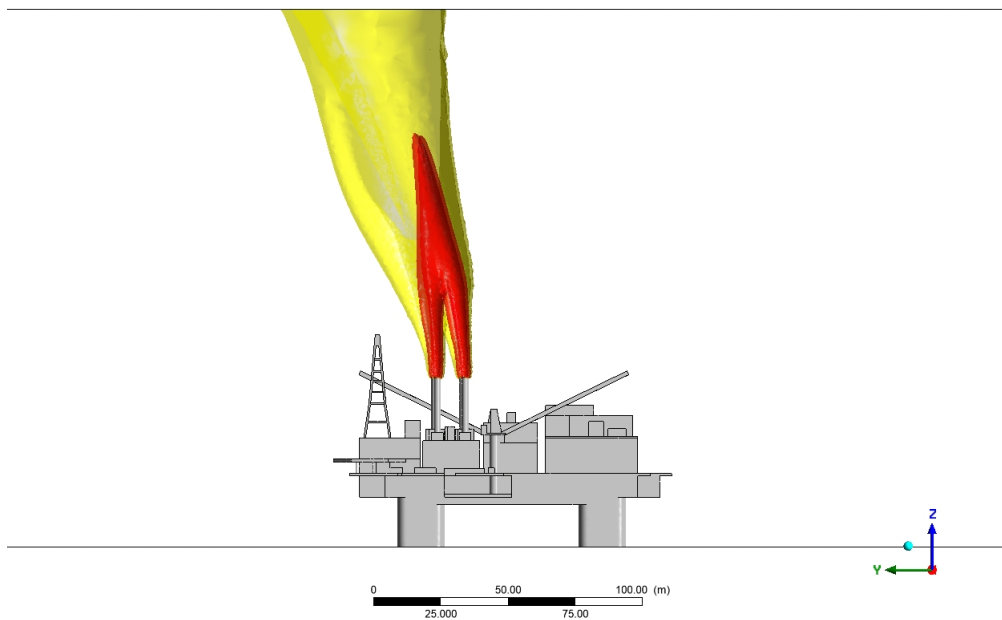


Figura 5.8: Vista lateral para intensidade de vento de 1 m/s, na direção Sul-sudeste (SSE). Fonte: Elaborado pelo autor.

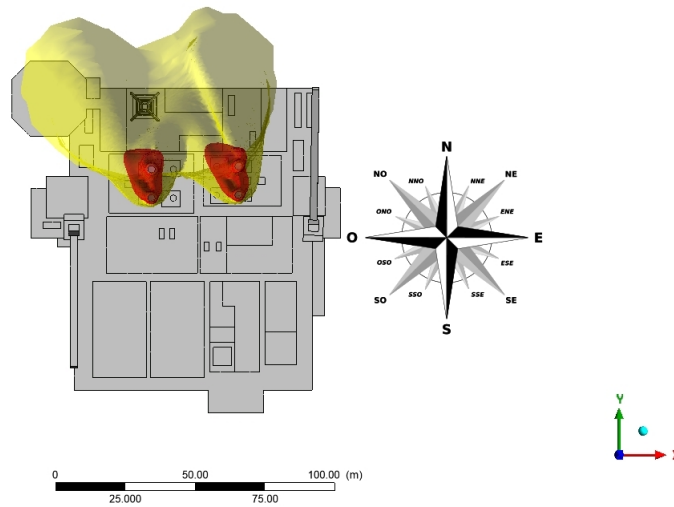


Figura 5.9: Vista superior para intensidade de vento de 1 m/s, na direção Sul-sudeste (SSE). Fonte: Adaptado de [39].

Como observado nas figuras acima, a velocidade de vento de 1 m/s não teve impacto no helideque, uma vez que em baixas velocidades, a pluma tende a se dissipar predominantemente na direção vertical, sem apresentar deflexão significativa em direção ao helideque. Dessa forma, a pluma mantém seu movimento ascendente natural e não sofre o rebaixamento induzido pela ação do escoamento.

Conseqüentemente, nas três direções analisadas não foi observado aumento significativo de temperatura em nenhuma elevação do helideque, resultando na matriz TGM apresentada na Figura 5.10.

Elevação em relação ao helideck (m)	> 50 m	X				
	< 40 m	X				
	< 30 m	X				
	< 25 m	X				
	< 20 m	X				
	< 15 m	X				
	< 10 m	X				
	< 5 m	X				
Elevação de temperatura máxima em relação à temperatura ambiente (°C)		0 - 2 °C	> 2 °C	> 10 °C	> 30 °C	> 40 °C

Zona	Recomendação
	Sem operações
	Operação com atenção
	Operação normal

Figura 5.10: Matriz TGM para intensidade de vento de 1 m/s, para as direções Leste-sudeste (ESE), Sudeste (SE) e Sul-sudeste (SSE). Fonte: Adaptado de [25].

5.3.2 Velocidade de vento: 7 m/s

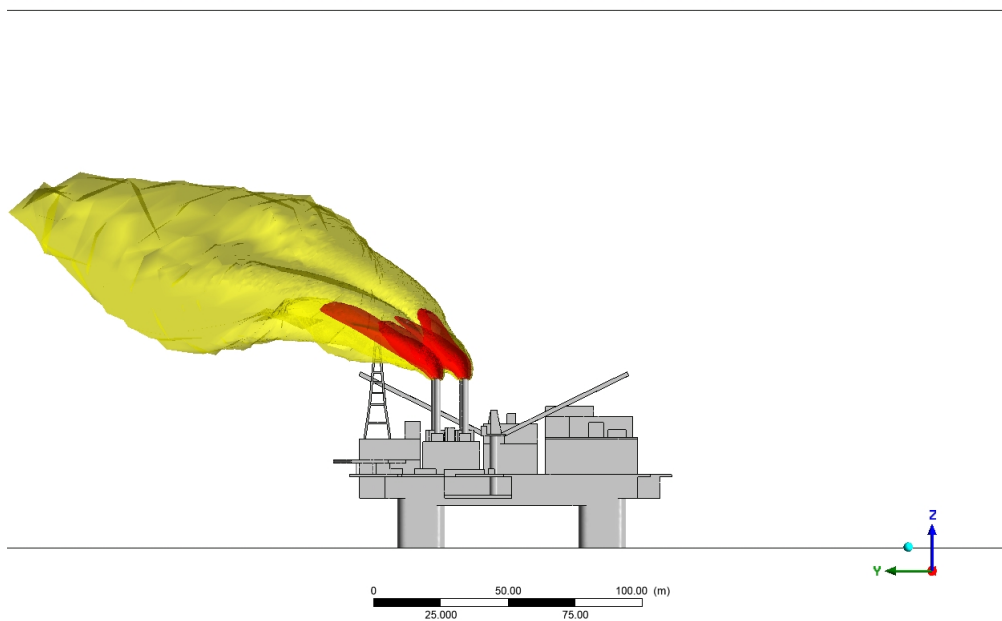


Figura 5.11: Vista lateral para intensidade de vento de 7 m/s, na direção Leste-sudeste (ESE). Fonte: Elaborado pelo autor.

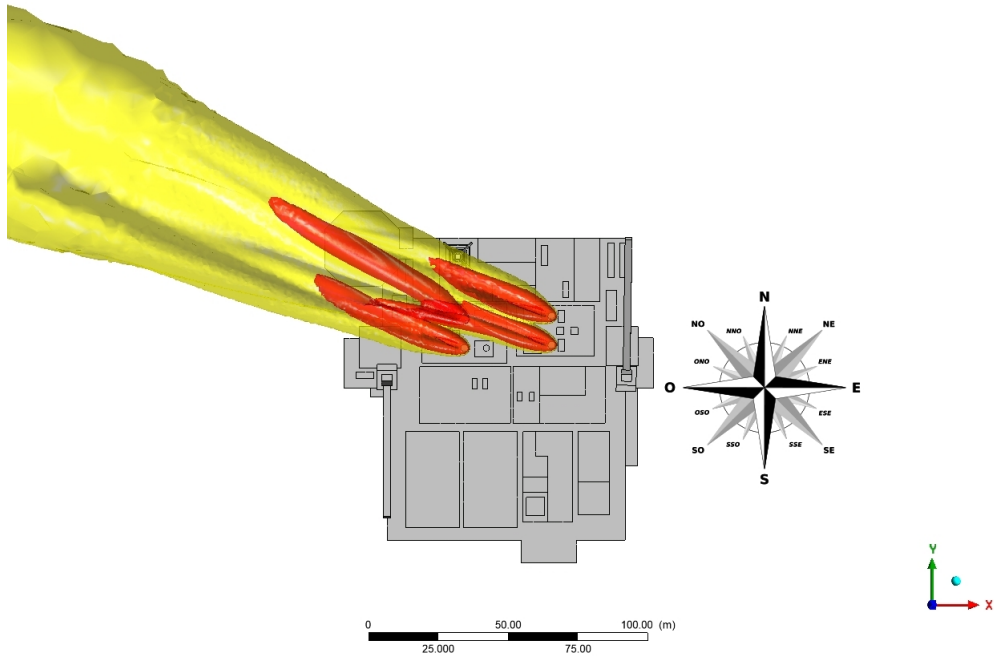


Figura 5.12: Vista superior para intensidade de vento de 7 m/s, na direção Leste-sudeste (ESE). Fonte: Adaptado de [39].

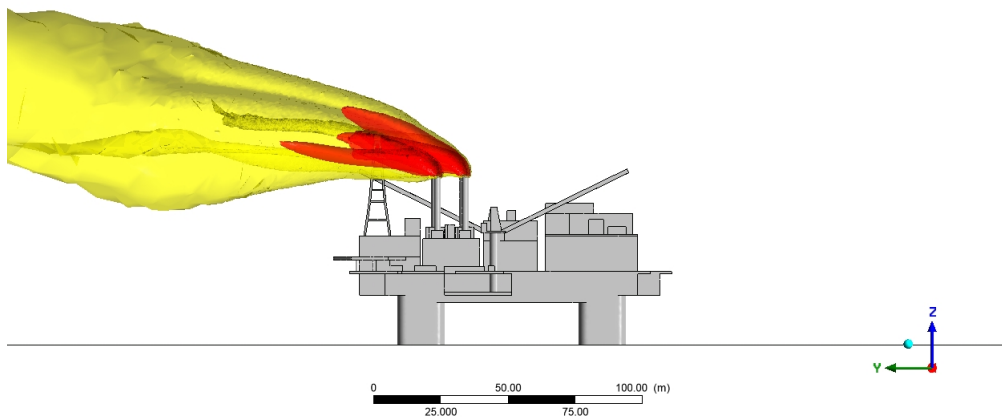


Figura 5.13: Vista lateral para intensidade de vento de 7 m/s, na direção Sudeste (SE). Fonte: Elaborado pelo autor.

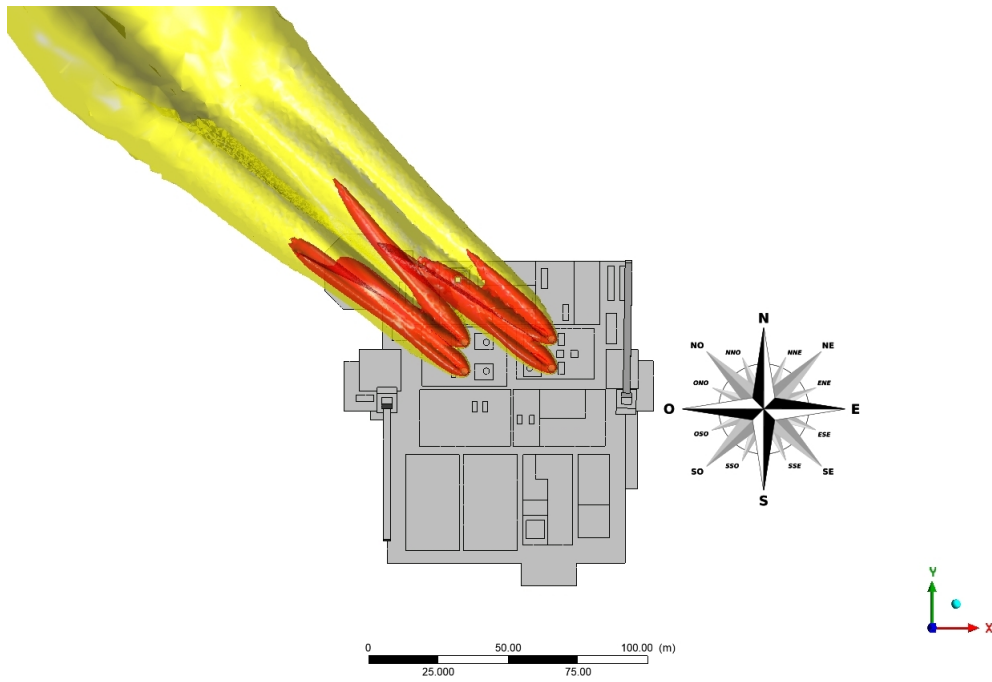


Figura 5.14: Vista superior para intensidade de vento de 7 m/s, na direção Sudeste (SE). Fonte: Adaptado de [39].

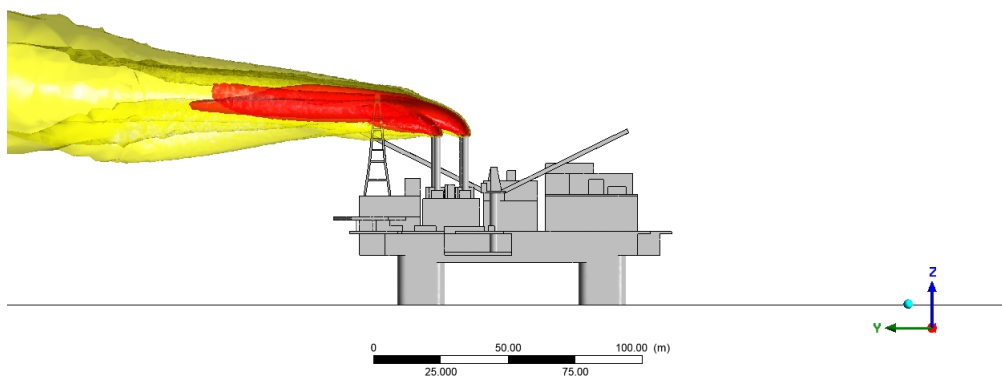


Figura 5.15: Vista lateral para intensidade de vento de 7 m/s, na direção Sul-sudeste (SSE). Fonte: Elaborado pelo autor.

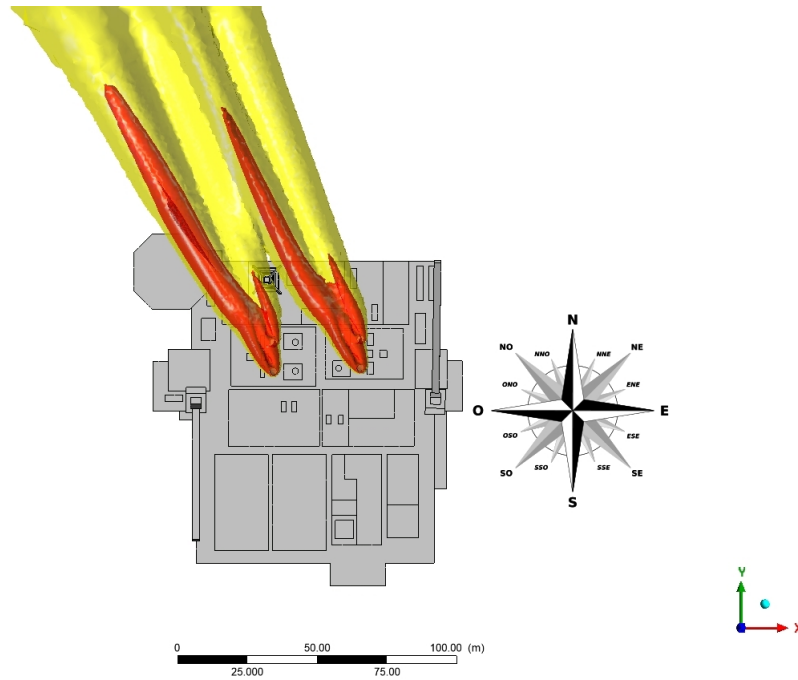


Figura 5.16: Vista superior para intensidade de vento de 7 m/s, na direção Sul-sudeste (SSE). Fonte: Adaptado de [39].

Em velocidades de vento mais elevadas, observa-se que a pluma térmica é defletida na direção do escoamento e tende a ser rebaixada em direção ao helideque. Nessa condição, o efeito do vento se torna mais forte do que a força de empuxo, fazendo com que a pluma perca seu caráter predominantemente ascendente.

As matrizes TGM para a intensidade de vento de 7 m/s são apresentadas a seguir:

Elevação em relação ao helideck (m)	> 50 m					X	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Zona</th> <th>Recomendação</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="background-color: red;"></td> <td>Sem operações</td> </tr> <tr> <td style="background-color: yellow;"></td> <td>Operação com atenção</td> </tr> <tr> <td style="background-color: green;"></td> <td>Operação normal</td> </tr> </tbody> </table>	Zona	Recomendação		Sem operações		Operação com atenção		Operação normal
	Zona	Recomendação													
		Sem operações													
		Operação com atenção													
		Operação normal													
	< 40 m					X									
	< 30 m	X													
	< 25 m	X													
< 20 m	X														
< 15 m	X														
< 10 m	X														
< 5 m	X														
Elevação de temperatura máxima em relação à temperatura ambiente (°C)	0 - 2 °C	> 2 °C	> 10 °C	> 30 °C	> 40 °C										

Figura 5.17: Matriz TGM para intensidade de vento de 7 m/s, para a direção Leste-sudeste (ESE). Fonte: Adaptado de [25].

Elevação em relação ao helideck (m)	> 50 m					X	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Zona</th> <th>Recomendação</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Red</td> <td>Sem operações</td> </tr> <tr> <td>Yellow</td> <td>Operação com atenção</td> </tr> <tr> <td>Green</td> <td>Operação normal</td> </tr> </tbody> </table>	Zona	Recomendação	Red	Sem operações	Yellow	Operação com atenção	Green	Operação normal
	Zona	Recomendação													
	Red	Sem operações													
	Yellow	Operação com atenção													
	Green	Operação normal													
	< 40 m					X									
	< 30 m			X											
	< 25 m	X													
< 20 m	X														
< 15 m	X														
< 10 m	X														
< 5 m	X														
Elevação de temperatura máxima em relação à temperatura ambiente (°C)		0 - 2 °C	> 2 °C	> 10 °C	> 30 °C	> 40 °C									

Figura 5.18: Matriz TGM para intensidade de vento de 7 m/s, para a direção Sudeste (SE). Fonte: Adaptado de [25].

Elevação em relação ao helideck (m)	> 50 m					X	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Zona</th> <th>Recomendação</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Red</td> <td>Sem operações</td> </tr> <tr> <td>Yellow</td> <td>Operação com atenção</td> </tr> <tr> <td>Green</td> <td>Operação normal</td> </tr> </tbody> </table>	Zona	Recomendação	Red	Sem operações	Yellow	Operação com atenção	Green	Operação normal
	Zona	Recomendação													
	Red	Sem operações													
	Yellow	Operação com atenção													
	Green	Operação normal													
	< 40 m					X									
	< 30 m	X													
	< 25 m	X													
< 20 m	X														
< 15 m	X														
< 10 m	X														
< 5 m	X														
Elevação de temperatura máxima em relação à temperatura ambiente (°C)		0 - 2 °C	> 2 °C	> 10 °C	> 30 °C	> 40 °C									

Figura 5.19: Matriz TGM para intensidade de vento de 7 m/s, para a direção Sul-sudeste (SSE). Fonte: Adaptado de [25].

Nessa velocidade, na direção Sudeste (SE) foi registrada uma elevação de temperatura superior a 10°C, atingindo 15.8°C na altura de 30 metros acima do helideque. Essa condição caracteriza operação em nível de atenção.

Vale destacar que, para todas as direções com velocidade de vento de 7 m/s, foram observadas elevações expressivas de temperatura, superiores a 40°C, nas alturas de 40 metros e 50 metros. Contudo, sem impacto direto para a operação do helideque.

5.3.3 Velocidade de vento: 15 m/s

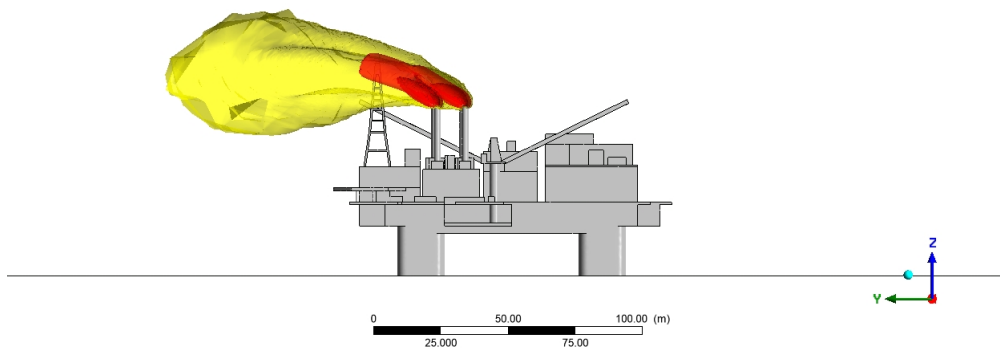


Figura 5.20: Vista lateral para intensidade de vento de 15 m/s, na direção Leste-sudeste (ESE). Fonte: Elaborado pelo autor.

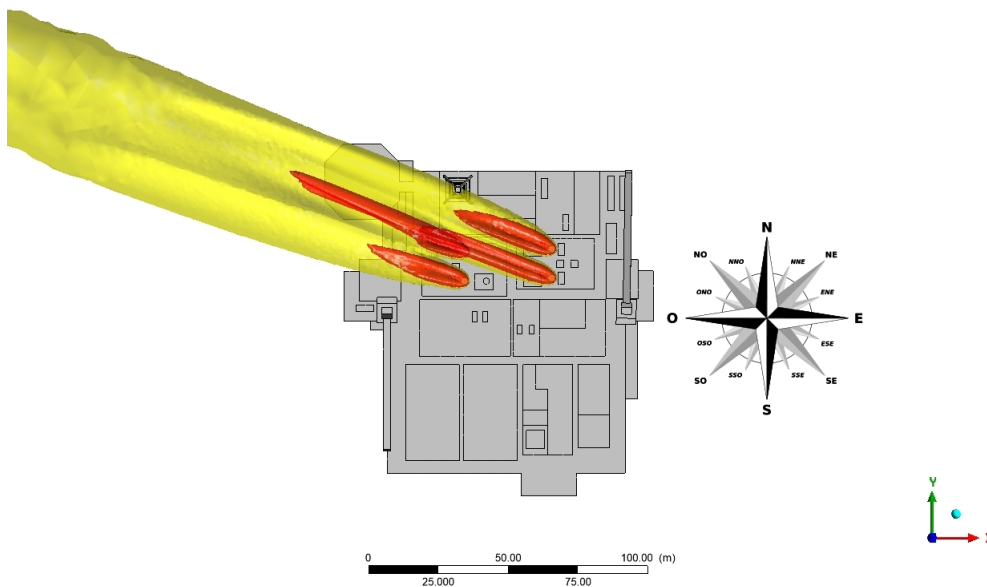


Figura 5.21: Vista superior para intensidade de vento de 15 m/s, na direção Leste-sudeste (ESE). Fonte: Adaptado de [39].

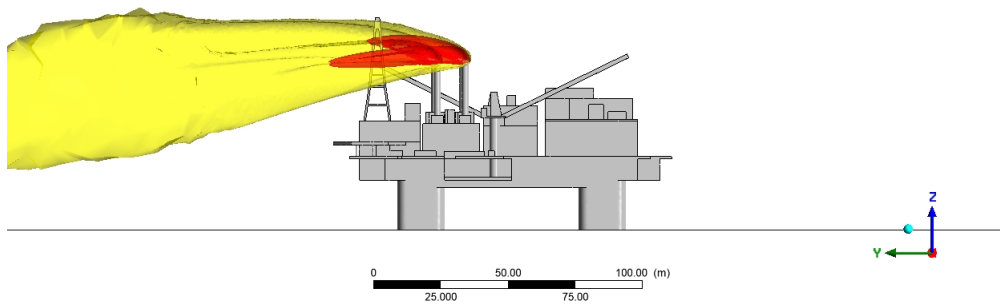


Figura 5.22: Vista lateral para intensidade de vento de 15 m/s, na direção Sudeste (SE). Fonte: Elaborado pelo autor.

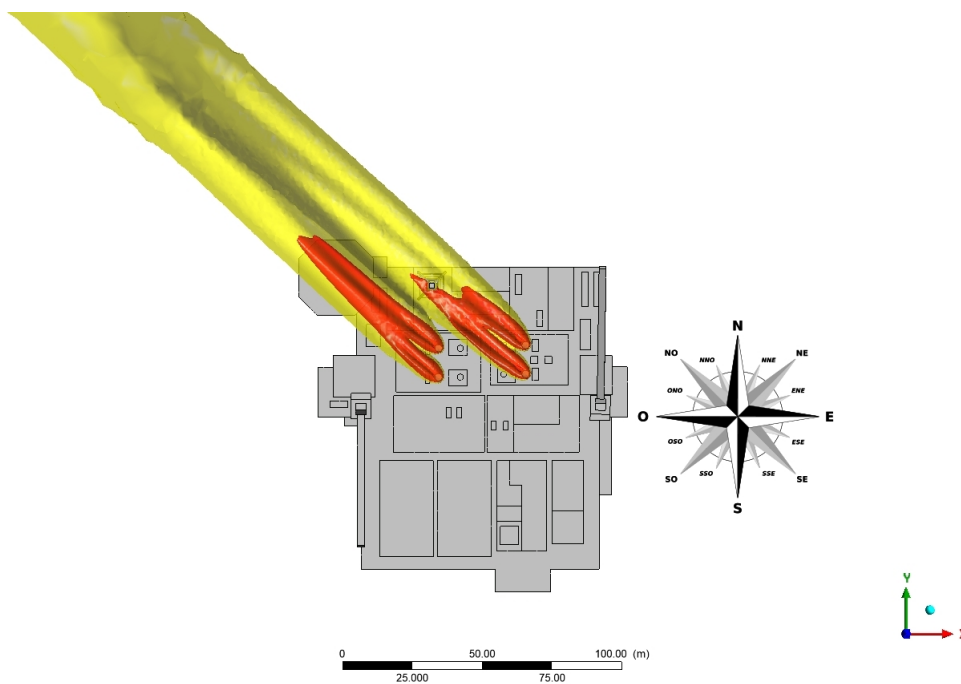


Figura 5.23: Vista superior para intensidade de vento de 15 m/s, na direção Sudeste (SE). Fonte: Adaptado de [39].

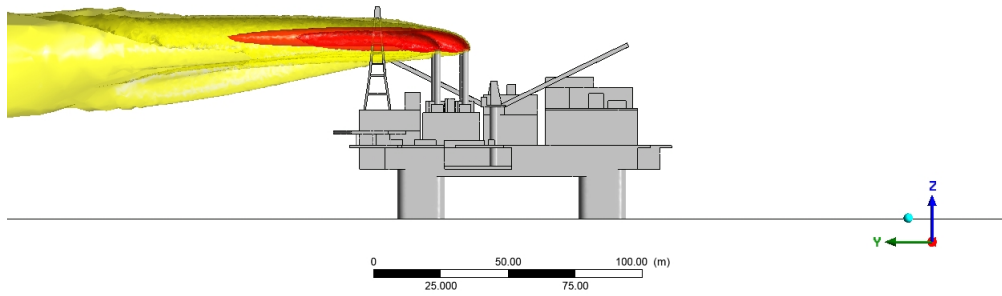


Figura 5.24: Vista lateral para intensidade de vento de 15 m/s, na direção Sul-sudeste (SSE). Fonte: Elaborado pelo autor.

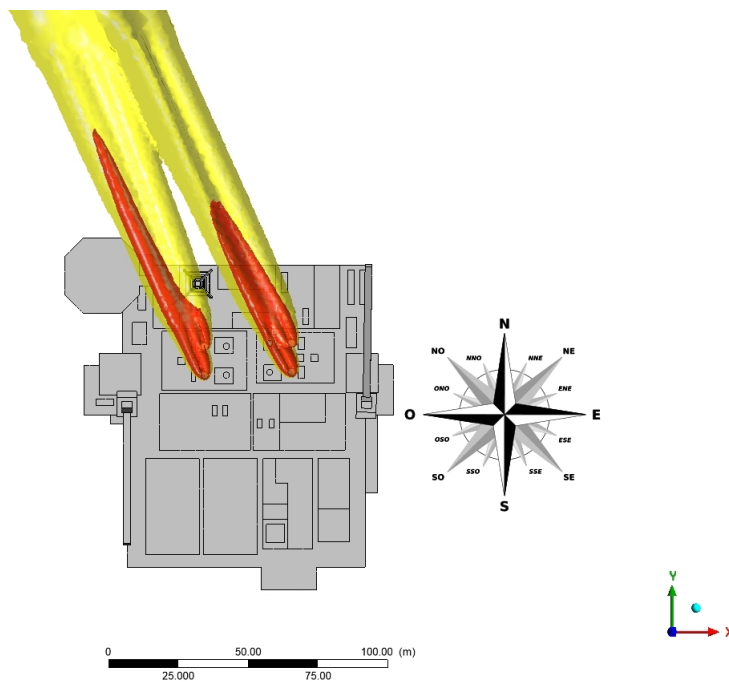


Figura 5.25: Vista superior para intensidade de vento de 15 m/s, na direção Sul-sudeste (SSE). Fonte: Adaptado de [39].

Para a velocidade de 15 m/s, o efeito do vento intensifica ainda mais o rebaixamento da pluma, que é rapidamente transportada na direção do escoamento e atinge o espaço aéreo sobre o helideque de forma mais acentuada.

As matrizes TGM para a intensidade de vento de 15 m/s são apresentadas a seguir:

Elevação em relação ao helideck (m)	> 50 m					X	<table border="1"> <tr> <th>Zona</th> <th>Recomendação</th> </tr> <tr> <td style="background-color: red;"></td> <td>Sem operações</td> </tr> <tr> <td style="background-color: yellow;"></td> <td>Operação com atenção</td> </tr> <tr> <td style="background-color: green;"></td> <td>Operação normal</td> </tr> </table>	Zona	Recomendação		Sem operações		Operação com atenção		Operação normal
	Zona	Recomendação													
		Sem operações													
		Operação com atenção													
		Operação normal													
	< 40 m					X									
	< 30 m	X													
	< 25 m	X													
< 20 m	X														
< 15 m	X														
< 10 m	X														
< 5 m	X														
Elevação de temperatura máxima em relação à temperatura ambiente (°C)		0 - 2 °C	> 2 °C	> 10 °C	> 30 °C	> 40 °C									

Figura 5.26: Matriz TGM para intensidade de vento de 15 m/s, para a direção Leste-sudeste (ESE). Fonte: Adaptado de [25].

Elevação em relação ao helideck (m)	> 50 m			X			<table border="1"> <tr> <th>Zona</th> <th>Recomendação</th> </tr> <tr> <td style="background-color: red;"></td> <td>Sem operações</td> </tr> <tr> <td style="background-color: yellow;"></td> <td>Operação com atenção</td> </tr> <tr> <td style="background-color: green;"></td> <td>Operação normal</td> </tr> </table>	Zona	Recomendação		Sem operações		Operação com atenção		Operação normal
	Zona	Recomendação													
		Sem operações													
		Operação com atenção													
		Operação normal													
	< 40 m				X										
	< 30 m				X										
	< 25 m			X											
< 20 m		X													
< 15 m	X														
< 10 m	X														
< 5 m	X														
Elevação de temperatura máxima em relação à temperatura ambiente (°C)		0 - 2 °C	> 2 °C	> 10 °C	> 30 °C	> 40 °C									

Figura 5.27: Matriz TGM para intensidade de vento de 15 m/s, para a direção Sudeste (SE). Fonte: Adaptado de [25].

Elevação em relação ao helideck (m)	> 50 m		X			
	< 40 m					X
	< 30 m			X		
	< 25 m	X				
	< 20 m	X				
	< 15 m	X				
	< 10 m	X				
	< 5 m	X				
Elevação de temperatura máxima em relação à temperatura ambiente (°C)	0 - 2 °C	> 2 °C	> 10 °C	> 30 °C	> 40 °C	

Zona	Recomendação
	Sem operações
	Operação com atenção
	Operação normal

Figura 5.28: Matriz TGM para intensidade de vento de 15 m/s, para a direção Sul-sudeste (SSE). Fonte: Adaptado de [25].

Para o vento de maior intensidade, de 15 m/s, a direção Leste-sudeste (ESE) não apresentou elevações de temperatura significativas. Já para a direção Sudeste (SE), observaram-se aumentos de 7.1°C, 25.5°C e 39.1°C nas alturas de 20 metros, 25 metros e 30 metros, respectivamente. Além disso, na direção Sul-Sudeste (SSE), foi registrada uma elevação de 11.2°C a 30 metros acima do helideque, condição enquadrada como nível de atenção.

Da mesma forma que na condição de 7 m/s, para a velocidade de 15 m/s também foram registradas elevações expressivas de temperatura, em alturas acima de 40 metros e 50 metros, sem impacto direto para a operação do helideque.

Capítulo 6

Conclusões

Este trabalho teve como principal objetivo avaliar o impacto da elevação da temperatura no helideque de uma plataforma *offshore*, por meio de simulações com técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD). Para isso, utilizou-se o *software* ANSYS CFX na obtenção dos resultados.

Inicialmente, foram apresentados o modelo matemático e o modelo de turbulência adotados. Em seguida, descreveu-se o modelo de simulação, incluindo aspectos relevantes como a geometria da plataforma, as condições de contorno, as condições de operação dos turbogeradores e a definição das direções de vento mais críticas, capazes de direcionar plumas de gases quentes em direção ao helideque. As intensidades de vento foram definidas com base na bibliografia, contemplando três diferentes velocidades para três direções.

Realizou-se ainda um estudo de convergência de malha, a fim de selecionar a configuração que equilibrasse precisão nos resultados e custo computacional. Foram estabelecidos os critérios de convergência e de extração de resultados, além do critério de avaliação, baseado na norma vigente, por meio da Matriz de Gradiente de Temperatura (TGM).

Com os parâmetros de simulação devidamente definidos, os resultados foram analisados. As isosuperfícies das plumas térmicas mostraram comportamentos distintos em função da velocidade do escoamento: para 1 m/s, manteve-se predominantemente ascendente, já para velocidades maiores, a pluma apresentou deflexão no sentido do vento.

A análise das matrizes TGM evidenciou que, para 1 m/s, não houve aumento

significativo de temperatura em nenhum ponto acima do helideque. Para 7 m/s e 15 m/s, observaram-se elevações consideráveis, porém em alturas que não comprometem a segurança operacional.

Algumas condições foram classificadas como situações de atenção, especialmente: vento de 7 m/s na direção Sudeste (SE) e vento de 15 m/s nas direções Sudeste (SE) e Sul-sudeste (SSE). Assim, a direção Sudeste (SE) apresentou maior recorrência de condições fora da normalidade, devido ao posicionamento do helideque em uma das extremidades da plataforma aprovada para o Norte, o que conduz a pluma térmica diretamente para sua região.

Diante do comportamento observado para as velocidades de 7 m/s e 15 m/s, é esperado que as velocidades intermediárias sigam a mesma tendência de resposta, mantendo o padrão observado no sistema.

Nenhuma das condições simuladas atingiu a zona vermelha de restrição operacional, o que confirma o adequado posicionamento e dimensionamento das chaminés em relação ao helideque, que se encontra em nível inferior. Ressalta-se, contudo, que situações de turbulência, especialmente para ventos entre as direções Oeste (O) e Sul (S), podem causar indisponibilidade ao helideque, em função da esteira gerada pelos módulos da plataforma.

Conclui-se, portanto, que as simulações realizadas foram capazes de reproduzir o fenômeno de forma consistente, validando os resultados obtidos e demonstrando a aplicabilidade da metodologia proposta. Esse procedimento pode, e deve, ser utilizado em estudos futuros de natureza semelhante.

Dessa forma, há diversas sugestões para aprimoramento e continuidade da análise em trabalhos futuros. No que diz respeito à qualidade da malha, recomenda-se melhorar a discretização nas regiões de maior interesse, a fim de aumentar a precisão dos resultados. Além disso, sugere-se a realização de novas simulações utilizando diferentes modelos de turbulência, de modo a avaliar a influência dessa escolha nos resultados e verificar a representação dos fenômenos de escoamento.

Em relação ao domínio computacional da simulação, recomenda-se a realização de um estudo sobre a altura do domínio. Alturas muito grandes aumentam significativamente o custo computacional, enquanto alturas muito pequenas podem comprometer a representatividade física dos resultados. Assim, sugere-se a determinação

da altura mínima adequada para garantir resultados consistentes com menor custo computacional.

Outro ponto a ser explorado é a condição de operação dos turbogeradores, avaliando cenários com vazão de ar quente em todas as chaminés, incluindo o uso de WHRU. Além disso, a análise pode ser ampliada para considerar as rotas de aproximação e decolagem dos helicópteros, visto que diferentes direções de vento podem direcionar a pluma térmica para a trajetória da aeronave durante as operações de voo.

Por fim, destaca-se a ausência, neste estudo, de comparação com resultados experimentais, o que constitui uma etapa essencial em trabalhos futuros para a validação e avaliação da acurácia da metodologia proposta.

De modo geral, a aplicação da CFD neste problema representa um diferencial estratégico, pois possibilita prever cenários críticos de vento e turbulência, o que permite otimizar o *layout* da plataforma e reduzir os riscos durante operações aéreas. Assim, a simulação computacional consolida-se como um elo essencial entre segurança operacional, eficiência no transporte *offshore* e inovação em engenharia de projeto.

Referências Bibliográficas

- [1] SARSFIELD, K., “Angola’s SonAir resumes EC225 passenger flights”, 2013.
- [2] THE NORWEGIAN SHELF’S COMPETITIVE POSITION (NORSOK), *NORSOK Standard C-004: Helicopter deck on offshore installations*, 2nd ed., 2013.
- [3] MORAIS, J. M. D., *Petróleo em águas profundas: uma história tecnológica da Petrobras na exploração e produção offshore*. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea) e Petrobras: Brasília, DF, 2013.
- [4] INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS (IBP), “Maiores produtores mundiais de petróleo em 2024”, 2025.
- [5] PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. – PETROBRAS, “Vida na Plataformas de Petróleo”, 2025.
- [6] VALÊNCIO, N., “Turbinas – Energia nas plataformas depende de modelos aeroderivados e movidos a gás”, 2011.
- [7] JORD INTERNATIONAL, “Packing a punch: Power module topsides delivered to a Brazilian FPSO”, https://www.jord.com.au/case_study/n11048-packing-a-punch/, 2025.
- [8] GHAHREMANI, R., *CFD simulation of wind condition and thermal gradient around an offshore helideck*, Master’s thesis, University of Stavanger, Stavanger, Norway, 2013.
- [9] ANAC – AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL, “Helideque – definição segundo NORMAN-27/DPC”, <https://www2.anac.gov.br/anacpedia/por-por/tr3136.htm>, 2025.

- [10] MACHADO, A., “Wrong Deck Landing na Aviação de Helicópteros no Brasil”, 2019, Trabalho de Conclusão de Curso de graduação em Ciências Aeronáuticas.
- [11] CARTER, K., “Focusing on Helideck Safety”, <https://www.windsystemsmag.com/focusing-on-helideck-safety/>, 2022.
- [12] MARINHA DO BRASIL, *NORMAM-27/DPC: Normas da Autoridade Marítima para Registro de Helideque Instalados em Embarcações e em Plataformas Marítimas*, 2nd ed., 2021.
- [13] PAGOT, P. R., FONSECA DE CARVALHO E SILVA, D., “Air Velocity and Temperature in the Offshore Helideck Design”. In: *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2010*, Rio de Janeiro, Brazil, Sept. 2010, Conference paper. Full text (PDF) available at ResearchGate.
- [14] VERSTEEG, H. K., MALALASEKERA, W., *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. 2nd ed. Pearson Education Limited: Harlow, England, 2007.
- [15] HAIDER, R., LI, X., SHI, W., et al., “Review of Computational Fluid Dynamics in the Design of Floating Offshore Wind Turbines”, *Energies*, v. 17, n. 17, pp. 4269, 2024.
- [16] JOHNSON, B. M. C., *Computational Fluid Dynamics (CFD) Modelling of Renewable Energy Turbine Wake Interactions*, Ph.D. Thesis, University of Central Lancashire, 2015.
- [17] SCARLATTI, L., *Computational Fluid Dynamics of a Floating Offshore Wind Turbine using OpenFOAM*, Master’s Thesis, Delft University of Technology, 2023.
- [18] FAVATA, M., *CFD Analysis of Moonpool Effects on Floating Offshore Wind Turbines*, Master’s Thesis, University of Padua, 2021.
- [19] ARGYLE, P., *Computational Fluid Dynamics Modelling of Wind Turbine Wake Losses in Large Offshore Wind Farms Incorporating Atmospheric Stability*, Ph.D. Thesis, Loughborough University, 2014.

- [20] LETZGUS, P., GUMA, G., LUTZ, T., “Computational fluid dynamics studies on wind turbine interactions with the turbulent local flow field influenced by complex topography and thermal stratification”, *Wind Energy Science*, v. 7, pp. 1551–1568, 2022.
- [21] TRAN, T., KIM, D., SONG, J., “Computational Fluid Dynamic Analysis of a Floating Offshore Wind Turbine Experiencing Platform Pitching Motion”, *Energies*, v. 7, n. 8, pp. 5011–5026, 2014.
- [22] FERREIRA, F. F., *Análise CFD do escoamento ao redor de um aerogerador de eixo horizontal*, Monografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2020.
- [23] ERIKSSON, J., *Simulation of the Flow around a Semi-Submersible using CFD*, Master’s thesis, Chalmers University of Technology, 2017.
- [24] DE CARVALHO E SILVA, D. F., DE OLIVEIRA, A. C., CHADS, C. E. H., et al., “Analysis of Offshore Helidecks Turbulence and Hot Gas Plumes – a Systematic Approach”. In: *ASME 42nd International Conference on Ocean, Offshore Arctic Engineering (OMAE2023)*, 2023.
- [25] STANDARDS NORWAY, *Supporting Document to NORSOK Standard C-004, Edition 2, May 2013: Section 5.4 Hot Air Flow*, Supporting document, Standards Norway, 2013, Related to NORSOK Standard C-004, Edition 2, May 2013.
- [26] CIVIL AVIATION AUTHORITY (UNITED KINGDOM), *CAP 437: Standards for Offshore Helicopter Landing Areas*, CAP publication CAP 437, Version 9, Civil Aviation Authority, Feb. 2023, Accessed: 23 Sep 2025.
- [27] BACCA, A., “Análise numérica da formação de vórtices em helidecks de plataformas de petróleo do tipo FPSO”, 2018, Orientadora: Dra. Talita Sauter Possamai.
- [28] KARIMI, H. R., SHABAKHTY, N., “Evaluation of wind-induced turbulence around offshore platforms in different wind speeds and directions, along

with safety assessment of helicopter operation and helideck's air-gap optimization", *Results in Engineering*, v. 21, pp. 101950, 2024.

- [29] MENTZONI, F., ERTESVÅG, I. S., "On turbulence criteria and model requirements for numerical simulations of wind and gas dispersion in the vicinity of offshore platforms", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 145, pp. 1–13, 2015.
- [30] KHOSROSHAHI, S. F., MASINA, M., ANTONINI, A., et al., "A Multidisciplinary Computational Framework for Topology Optimisation of Offshore Helidecks", *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022.
- [31] FAUZI, A., SILALAH, N., "Study of the Effect of Wind Direction on Ship Helideck Using Computational Fluid Dynamics", *International Journal of Mechanical Computational and Manufacturing Research*, 2025.
- [32] FERZIGER, J. H., PERIĆ, M., *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 3rd ed. Springer-Verlag, 2002.
- [33] SOUZA, J. F., OLIVEIRA, L., AZEVEDO, J. L., et al., "Uma revisão sobre a turbulência e sua modelagem", *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 29, n. 1, Jan–Mar 2010.
- [34] POPE, S. B., *Turbulent Flows*. Cambridge University Press: Cambridge, 2000.
- [35] ANSYS, *ANSYS CFX - Solver Theory Guide*, 2021.
- [36] MENTER, F. R., "Zonal Two Equation κ - ω Turbulence Models for Aerodynamic Flows". In: *24th Fluid Dynamics Conference*, Orlando, Florida, 1993.
- [37] BAZALUK, O., HAVRYSH, V., CHEREDNICHENKO, O., et al., "Chemically Recuperated Gas Turbines for Offshore Platform: Energy and Environmental Performance", *Sustainability*, v. 13, n. 22, pp. 12566, 2021.
- [38] KAMRANPEY, A., "A study on effects of mass flow rate and compressor pressure ratio on gas turbine cycle performance", *International Journal of I.C. Engines and Gas Turbines*, v. 8, n. 2, pp. 1–7, 2022.

- [39] MARQUES, V., “Rosa dos Ventos”, <https://www.todamateria.com.br/rosa-dos-ventos/>, 2025, Acesso em: 22 set. 2025.
- [40] XU, H., LI, Z., LI, X., et al., “Comparison of Multiple Ocean Surface Wind Products Using Meteorological Buoy Observations”, *Advances in Meteorology*, v. 2021, pp. 6680626, 2021.
- [41] STANDARDS NORWAY, *NORSOK Standard C-004: Helicopter deck on offshore installations*, NORSOK Standard C-004, Standards Norway, May 2013, Edition 2, May 2013.
- [42] VIRTUALCAE, “CFD Aplicado à Análise de Helideques Offshore”, 2025.