Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia

Gabriel Cerqueira Gonçalves

ANÁLISE NUMÉRICA DAS CARGAS DE VENTO EM SEGUIDORES SOLARES EM SOLO INCLINADO

Rio de Janeiro
2024

Gabriel Cerqueira Gonçalves

ANÁLISE NUMÉRICA DAS CARGAS DE VENTO EM SEGUIDORES SOLARES EM SOLO INCLINADO

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Fenômenos de Transporte.

Orientador: Prof. Daniel José Nahid Mansur Chalhub, DSc

Rio de Janeiro

2024

CATALOGAÇÃO NA FONTE

UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

G635 Gonçalves, Gabriel Cerqueira.
Análise numérica das cargas de vento em seguidores solares em solo inclinado / Gabriel Cerqueira Gonçalves. – 2024.
78 f.

Orientador: Daniel José Nahid Mansur Chalhub.
Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Sistemas de energia fotovoltaica - Teses. 3. Ventos - Teses. 4. Análise numérica - Teses. I. Chalhub, Daniel José Nahid Mansur. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. III. Título.

CDU 551.311.3

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Gabriel Cerqueira Gonçalves

ANÁLISE NUMÉRICA DAS CARGAS DE VENTO EM SEGUIDORES SOLARES EM SOLO INCLINADO

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Fenômenos de Transporte.

Aprovada em 06 de Dezembro de 2024.
Banca Examinadora:

Prof. Daniel José Nahid Mansur Chalhub, DSc (Orientador)
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) - PPG-EM

Prof. Norberto Mangiavacchi, Ph.D.
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) - PPG-EM

Prof. Rachel Manhães de Lucena, DSc.
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) - PPG-EM

Prof. Fabio Pereira dos Santos, DSc.
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Rio de Janeiro
2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que apoiaram ou colaboraram de alguma forma para a execução deste trabalho, em particular:

A Deus por me fornecer a inteligência, sabedoria, perseverança e paciência necessárias para conclusão deste estudo;

À Gabrielle pelo apoio, incentivo, compreensão e conselhos;

Aos meus pais e meu irmão, pelos ensinamentos, conselhos e sermões;

Aos meus familiares e amigos pelo incentivo e apoio;

Ao professor Daniel Chalhub pela dedicação, paciência, disponibilidade, ensinamentos, orientações e caronas;

Aos demais professores do PPG-EM, em especial os professores Norberto Mangiavacchi e José Pontes, pela oportunidade, pelos ensinamentos, e incentivos;

À banca examinadora, a citar Norberto Mangiavacchi, Rachel Lucena e Fabio dos Santos, pela contribuição para melhora do trabalho final;

À ESSS e a UERJ pela oportunidade e possibilidade de realizar este trabalho;

RESUMO

GONÇALVES, Gabriel Cerqueira. *Análise Numérica das Cargas de Vento em Seguidores Solares em Solo Inclinado* . 2024. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

O crescente uso da energia solar fotovoltaica como recurso renovável destacou a importância de otimizar a eficiência energética dos painéis solares, sendo os sistemas de seguidores solares ("Solar Trackers") uma solução promissora. Esses sistemas alinham os painéis à posição do sol, maximizando a geração de energia, mas enfrentam desafios como ventos fortes, que podem comprometer a estrutura por cargas diretas e vibrações dinâmicas, resultando em falhas estruturais e redução da vida útil do equipamento. Apesar de diversos estudos numéricos e experimentais abordarem fatores como inclinação dos painéis, espaçamento entre fileiras e características geométricas, a influência do terreno acidentado sobre os seguidores solares ainda é pouco explorada. Este trabalho realiza uma análise numérica, utilizando o método de volumes finitos para calcular as cargas e momentos induzidos pelo vento em três fileiras de seguidores montadas em terreno inclinado. O objetivo é avaliar como o terreno acidentado afeta esses parâmetros críticos, com foco nas variações causadas pelo efeito de proteção ("Shielding") entre as fileiras. Como resultado do estudo a inclinação do terreno provou ter influência neste efeito de proteção expondo as fileiras subsequentes novamente às cargas de vento, apresentando elevações nas cargas atuantes sobre os painéis.

Palavras-chave: Seguidor solar; CFD; Carga de vento; Terreno inclinado.

ABSTRACT

GONÇALVES, Gabriel Cerqueira. *Numerical Analysis Of Wind-Induced Loads In Solar Tracker Systems Over Inclined Terrain.* 2024. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

The growing use of photovoltaic solar energy as a renewable resource has highlighted the importance of optimizing the energy efficiency of solar panels, with solar tracking systems emerging as a promising solution. These systems align the panels with the sun's position to maximize energy generation but face challenges such as strong winds, which can compromise the structure through direct loads and dynamic vibrations, leading to structural failures and reduced equipment lifespan. Although numerous numerical and experimental studies have addressed factors such as panel inclination, row spacing, and geometric characteristics, the influence of uneven terrain on solar trackers remains underexplored. This study performs a numerical analysis using the finite volume method to calculate wind-induced loads and moments on three rows of trackers installed on inclined terrain. The aim is to evaluate how uneven terrain affects these critical parameters, focusing on variations caused by the shielding effect between rows. As a result of this study terrain's slope is shown to have impact in the exposure of subsequent rows to wind loads again, increasing the magnitude of the loads acting in the system.

Keywords: Solar tracker; CFD; Wind induced loads; Inclined Terrain.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Planta de energia solar com séries de fileiras de seguidores solares . . . 12
Figura 2 - Esquemático de um seguidor solar de um eixo 13
Figura 3 - Esquema representando o fluxo de massa através de um volume de controle bidimensional. 18
Figura 4 - Representação do volume de controle central P e dos volumes vizinhos A, B e C. f_{PA}, f_{PB} e f_{PC} são os pontos médios das faces. 28
Figura 5 - Interpolação linear entre as grandezas armazenadas no centro dos volumes P e A na face compartilhada f_{PA}. 30
Figura 6 - Decomposição do vetor de área $\mathbf{S}$ em $\mathbf{E}$ e $\mathbf{k}$ para o tratamento do termo difusivo para malhas não estruturadas. 31
Figura 7 - Molécula de cálculo para o gradiente em f_{PA} utilizando molécula extensa (hachurada + sólida) e a compacta (sólida). 32
Figura 8 - Discretização do termo advectivo com a técnica upwind/TVD de segunda ordem para um campo conhecido de velocidade $\mathbf{u}$: fluxo advectivo/convectivo positivo com $U = P$ e $D = A$. 35
Figura 9 - Discretização do termo advectivo com a técnica upwind/TVD de segunda ordem para um campo conhecido de velocidade $\mathbf{u}$:fluxo advectivo/convectivo negativo com $U = A$ e $D = P$. 35
Figura 10 - Reconstrução de gradiente Green-Gauss com base no volume de controle. 39
Figura 11 - Geometria usada para análise do terreno plano 40
Figura 12 - Geometria usada para análise do terreno inclinado 41
Figura 13 - Detalhe das camadas de prisma para o seguidor solar 42
Figura 14 - Malha gerada para o domínio plano 45
Figura 15 - Recorte da malha gerada para o terreno inclinado 46
Figura 16 - Disposição das condições de contorno na geometria do terreno plano . . 48
Figura 17 - Disposição das condições de contorno na geometria do terreno inclinado 48
Figura 18 - Distribuição da pressão no domínio plano de acordo com o ângulo de inclinação do primeiro painel 52
Figura 19 - Variação dos perfis de velocidade no domínio plano de acordo com o ângulo de inclinação do primeiro seguidor 53
Figura 20 - Distribuição da pressão para terreno inclinado de acordo com o ângulo de inclinação do primeiro painel 54
Figura 21 - Variação dos perfis de velocidade no terreno inclinado de acordo com o ângulo de inclinação do primeiro seguidor 56
Figura 22 - Coeficiente da força na direção X sobre a primeira fileira (N) versus Ângulo de inclinação da primeira fileira (graus) 57

Figura 23 - Coeficiente das forças na direção X sobre as fileiras 2 e 3 (N) versus Ângulo de inclinação da primeira fileira (graus) 59
Figura 24 - Coeficiente da força na direção Y sobre a primeira fileira (N) versus Ângulo de inclinação da primeira fileira (graus) 60
Figura 25 - Coeficiente das forças na direção Y sobre as fileiras 2 e 3 (N) versus Ângulo de inclinação da primeira fileira (graus) 61
Figura 26 - Esquemático do cálculo do momento das forças atuantes 64
Figura 27 - Coeficiente de momento induzido sobre as fileiras 2 e 3 versus ângulo de inclinação da primeira fileira (graus) 64
Figura 28 - Coeficiente de momento induzido sobre a primeira fileira versus ângulo de inclinação da primeira fileira (graus) 65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Malhas utilizadas no GCI para o caso horizontal 44
Tabela 2 - Malhas utilizadas no GCI para o caso inclinado 45
Tabela 3 - Esquemas de discretização utilizados 49
Tabela 4 - Limites de convergência utilizados para os resíduos 49
Tabela 5 - Hardware e Software utilizados no estudo 50
Tabela 6 - Tempo computacional aproximado de cada caso 51
Tabela 7 - Dados de coeficiente de força na direção X para o primeiro seguidor . . 58
Tabela 8 - Dados de coeficiente de força na direção X para o segundo e terceiro seguidores 58
Tabela 9 - Dados de coeficiente de força na direção Y para o primeiro seguidor . . 61
Tabela 10 - Dados de coeficiente de força na direção Y para o segundo e terceiro seguidores 62
Tabela 11 - Dados de Coeficiente de momento para o primeiro seguidor 63
Tabela 12 - Dados de coeficiente de momento para o segundo e terceiro seguidores . 66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFD	Fluidodinâmica Computacional
MVF	Método de Volumes Finitos
EDP	Equação Diferencial Parcial
GCI	Grid Convergence Index
S1	Seguidor 1
S2	Seguidor 2
S3	Seguidor 3

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	11
1	**FORMULAÇÃO DO PROBLEMA**	17
1.1	**Fundamentação teórica**	17
1.2	**Equações Governantes**	17
1.2.1	Equação da Continuidade	17
1.2.2	Equação de Navier-Stokes	20
1.3	**Modelos Utilizados**	24
1.3.1	Modelo k-ômega SST	24
1.4	**Simulação numérica e o Método dos Volumes Finitos**	26
1.4.1	Método dos Volumes Finitos	27
1.4.1.1	Equação Geral de Conservação	27
1.4.1.2	Discretização do termo difusivo	29
1.4.1.3	Discretização do termo advectivo/convectivo	33
1.4.1.4	Discretização do termo fonte	37
1.4.1.5	Discretização espaço-temporal	37
1.4.1.6	Reconstrução de gradiente	38
1.5	**Metodologia**	39
1.5.1	Geometria	40
1.5.2	Malha Computacional	41
1.5.3	Hipóteses de Modelagem e Condições de Contorno	45
2	**RESULTADOS**	51
	CONCLUSÃO	67
	REFERÊNCIAS	68
	ANEXO A – ENCIT 2024 - NUMERICAL ANALYSIS OF WIND-INDUCED LOADS IN SOLAR TRACKER SYSTEMS	70

INTRODUÇÃO

A crescente busca por sustentabilidade e redução da pegada de carbono tem direcionado o foco para tecnologias de geração de energia limpa. Como resultado, fontes de energia renovável vêm ganhando destaque tanto do público em geral quanto da indústria. No contexto das energias renováveis, uma questão fundamental é a eficiência energética dessas fontes, pois, além de sustentáveis, elas precisam ser economicamente viáveis para ampla aplicação. Esse aspecto sustenta o interesse em otimizar sua eficiência. Entre as diversas fontes renováveis, a energia solar fotovoltaica tem mostrado grande aceitação, com maior acessibilidade até para consumidores individuais. A indústria também acompanha essa tendência, embora com uma atenção especial à maximização da eficiência energética.

Diversas tecnologias foram desenvolvidas para otimizar a eficiência na geração de energia solar, entre as quais os seguidores solares se destacam por sua simplicidade e custo relativamente baixo em comparação com outras técnicas. A principal diferença dos seguidores solares é a capacidade de ajustar a posição dos painéis ao longo do dia, conforme a trajetória do Sol, maximizando a incidência de luz e, consequentemente, a geração de energia. Os seguidores subdividem-se entre seguidores de um eixo e de dois eixos, que podem aumentar a eficiência da geração de energia em até 20% para painéis de um eixo e até 40% para painéis de dois eixos, conforme indicado nos estudos de Al-Mohamad (2004) e Awasthi et al. (2020) respectivamente. Embora os seguidores de dois eixos ofereçam maior eficiência, eles requerem uma área livre maior para movimento, o que limita sua aplicação em larga escala. Em contrapartida, os seguidores de um eixo, por serem mais compactos, permitem a instalação em massa, possibilitando a criação de grandes fazendas solares conforme observado na Fig. 1.

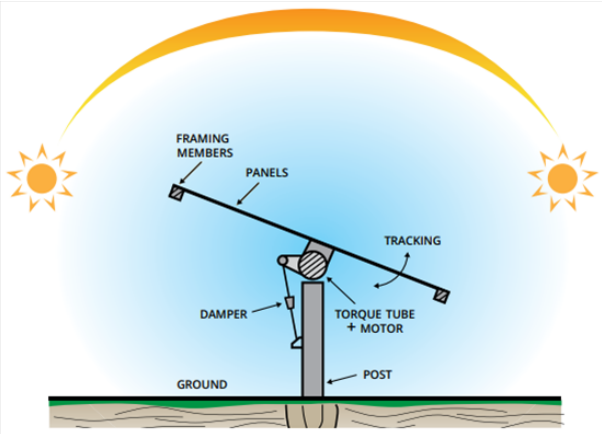
Os seguidores solares de um eixo são compostos, em geral, por uma série de painéis fotovoltaicos enquadrados por perfis metálicos, fixados em uma viga de torção que permite ajustar a posição das células conforme a movimentação do sol. Para garantir que esse movimento ocorra de forma precisa e suave — minimizando impactos na estrutura e maximizando a incidência de luz —, o sistema é equipado com sensores, motores, atuadores e, muitas vezes, amortecedores. Esses componentes são sustentados por postes espaçados ao longo da viga de torção, proporcionando suporte estrutural e evitando deformações causadas pelo peso do conjunto. A Figura 2 apresenta uma representação esquemática desse equipamento.

Embora sejam estruturas simples, os painéis solares enfrentam desafios significativos em campo, especialmente ao lidarem com condições meteorológicas adversas, como rajadas de vento intensas. Para painéis estáticos, a principal preocupação é a carga de vento que atua diretamente sobre as placas solares. Sem componentes móveis, a estrutura precisa ser dimensionada para suportar essas forças e evitar que elas induzam excitações

Figura 1 - Planta de energia solar com séries de fileiras de seguidores solares

Fonte: A imagem foi retirada de (MARTíNEZ-GARCíA EDUARDO BLANCO-MARIGORTA; NAVARRO-MANSO, 2021)

Figura 2 - Esquemático de um seguidor solar de um eixo



Fonte: Imagem retirada da revista ANSYS Advantage Volume 13 Issue 1, 2019

próximas às frequências naturais do conjunto, o que comprometeria sua integridade, conforme estudado em (GUHA; FEWLESS; BANKS, 2015). Além disso, o tipo de montagem adotado geralmente previne efeitos de flutter ou outras instabilidades aeroelásticas, uma vez que as molduras metálicas rígidas minimizam deformações nos painéis, que tendem a falhar por conta das próprias cargas diretas ou da ressonância do conjunto.

Para os seguidores solares, além do desafio dos esforços diretos gerados pela carga de vento, surgem complicações adicionais relacionadas aos momentos induzidos por essas forças, que podem impactar o devido funcionamento de suas partes móveis e o desempenho dos atuadores. Esses momentos podem tanto gerar resistência ao movimento quanto aumentar a amplitude destes, além de gerar oscilações do sistema. Embora não haja amplificação das deformações dos painéis de maneira aeroelástica, há a possibilidade de aumento na amplitude da rotação da viga de torção. Quando esse aumento ocorre de forma sistemática, pode levar a instabilidades torcionais ou "Torsional Galloping", conforme sugerido de forma mais fundamental em um corpo genérico de seção reta retangular com rigidez torcional e amortecimento por Oudheusden (2000) e de forma mais específica para seguidores solares de um eixo por Rohr, Bourke e Banks (2015), se assemelhando a um fenômeno de ressonância.

Objetivo

O objetivo deste trabalho é analisar as influências do vento em sistemas de seguidores solares instalados em terrenos inclinados. Através da simulação do escoamento ao

redor dos painéis, serão calculadas as cargas e momentos induzidos na estrutura, permitindo avaliar o sistema em condições com e sem inclinação.

Justificativa

Este trabalho é fundamentado na utilização já consolidada da simulação numérica para o dimensionamento de estruturas de suporte em sistemas de seguidores solares e de seus mecanismos de sustentação, movimentação e amortecimento, permitindo a previsão de esforços estáticos e dinâmicos gerados pela ação do vento.

Contudo, essas simulações são normalmente realizadas assumindo o sistema instalado em terreno plano, o que pode diferir significativamente das condições reais encontradas em campo. Dessa forma, este estudo busca ampliar essa abordagem, explorando os efeitos de terrenos inclinados e identificando possíveis características ignoradas pela simplificação do caso como plano, visando um dimensionamento mais fiel às condições práticas.

Revisão Bibliográfica

Painéis solares e Seguidores solares

As investigações sobre as forças induzidas pelo vento, tanto para a integridade quanto para a eficiência de sistemas solares, são extensas. Elas abrangem desde análises da eficiência geral de plantas solares em função da direção do vento, como discutido em (VASEL; IAKOVIDIS, 2017), até estudos sobre a eficiência térmica relacionada à inclinação dos painéis, conforme explorado por (MCINTOSH et al., 2022).

No que diz respeito à integridade do próprio sistema de seguidores, há estudos que utilizam métodos numéricos, experimentais ou ambos. Alguns exemplos incluem a exploração das cargas induzidas pelo vento em painéis solares montados no solo por meio de simulações numéricas, como em (JUBAYER; HANGAN, 2014) que explorou a comparação das cargas de vento em múltiplas fileiras de painéis para ventos vindo a 0° e a 180°, no (FUKUDA; BALACHANDAR; BARRON, 2021) que realizou a simulação estrutural de elementos finitos dos painéis a partir das cargas calculadas em análises de dinâmica dos fluidos computacional (CFD) e no já citado anteriormente (GUHA; FEWLESS; BANKS, 2015) onde se revisitam as estratégias de defesa destes seguidores frente às cargas de vento como o efeito de proteção e a adoção da posição paralela ao solo para reduzir as cargas induzidas. O estudo de painéis montados em telhados e suas cargas de vento com abordagens experimentais, como feito por (ALRAWASHDEH; STATHOPOULOS, 2020) estimando a

influência da elevação e da interação do vento com as estruturas dos prédios. A avaliação de coeficientes de pressão utilizando análises experimentais e numéricas, como observado em (YEMENICI; AKSOY, 2021) comparando ambas as abordagens para inclinações dos painéis entre 25° e 45° e para diferentes espaçamentos entre fileiras.

Diversos estudos foram desenvolvidos sobre a inclinação dos painéis, como nos trabalhos de Ma, Ma e Wang (2021) explorando o aumento das cargas de vento com o aumento da inclinação, Li et al. (2019) com estudos similares para painéis montados em telhados inclinados. Os estudos de Stathopoulos, Zisis e Xypnitou (2014), que indicaram que a inclinação tem efeito relevante apenas para certas direções de vento. E as relações entre a inclinação dos painéis na geração de turbulência e os efeitos da turbulência na carga de vento, explorados por Kopp, Farquhar e Murrison (2012) e Suárez et al. (2022).

Avanços importantes também foram realizados em pesquisas sobre o efeito dinâmico das cargas de vento, abordando a inclinação, o espaçamento entre fileiras e a razão de aspecto, nos estudos apresentados no já citado (ROHR; BOURKE; BANKS, 2015) e no (MARTíNEZ-GARCíA EDUARDO BLANCO-MARIGORTA; NAVARRO-MANSO, 2021) que avaliam os efeitos da carga de vento na movimentação dos painéis e na ampliação da vibração induzida, chamada galope ou "Torsional Galloping". Por fim, o estudo recente de (FUKUDA; BALACHANDAR; BARRON, 2020) analisou ainda os efeitos da altura do solo na interação entre o vento e a estrutura.

Embora o tema de cargas de vento sobre painéis e seguidores solares seja amplamente estudado, a influência de terrenos irregulares ou inclinados, condições comumente encontradas em instalações reais, ainda não foi explorada em profundidade. Essa lacuna ressalta a importância de uma análise do impacto da inclinação do terreno sobre os sistemas de seguidores solares.

Este estudo visa preencher essa lacuna por meio de uma análise numérica das cargas induzidas pelo vento em sistemas de seguidores solares sob este novo ponto de vista, incorporando os efeitos da inclinação do terreno a estas análises. Utilizando CFD baseada no Método dos Volumes Finitos (MVF), a pesquisa simula e analisa as interações entre as forças do vento e as estruturas dos seguidores solares utilizando o software Ansys Fluent 2024 R1. O estudo examina uma variedade de inclinações da primeira fileira de painéis para identificar como o terreno inclinado afeta o comportamento do escoamento, as forças sobre cada fileira de painéis e os efeitos de proteção da primeira fileira sobre as demais.

Organização da Dissertação

- Introdução: Neste capítulo são apresentados os objetivos e justificativas para o estudo, bem como uma revisão da literatura, trazendo alguns dos principais trabalhos

publicados que desenvolveram temas correlatos

- Capítulo 1 - Formulação do problema: Este capítulo traz a descrição das principais equações que modelam o problema, a descrição do método numérico utilizado bem como a descrição da criação da geometria, os métodos utilizados para discretizar e simular o problema proposto

- Capítulo 2 - Resultados e discussão: Trazendo gráficos e imagens este capítulo apresenta os resultados obtidos no estudo, explora os principais parâmetros a serem avaliados e discute dos resultados obtidos

- Capítulo 3 - Conclusão: Este capítulo faz uma recapitulação da proposta do trabalho, indicando frente a esta proposta as conclusões tiradas dos resultados, sugerindo próximos passos dentro deste tópico de estudo.

1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

1.1 Fundamentação teórica

Os mais diversos processos envolvendo a movimentação de fluidos e sua interação com meio no qual escoam podem ser descritos pelas equações da dinâmica dos fluidos, existentes desde o século XVIII com os desenvolvimentos de trabalhos analíticos de Euler, D'Alambert e Laplace, sendo aprimoradas no século XX com as teorias de Camada Limite de Prandtl, de Sustentação Aerodinâmica por Lanchester-Prandtl e Limite de Estabilidade dos Escoamentos por Reynolds conforme apontado por Pontes e Mangiavacchi (2016).

Equações essas que descrevem desde a conservação da matéria presente no escoamento, até como se comportam as principais características do escoamento, como velocidades, campo de pressões e temperaturas. A partir dessas equações é possível modelar matematicamente os fenômenos observados na natureza e compreender seus comportamentos, causas e consequências.

Ao modelar matematicamente algum fenômeno, são levantadas as equações que possuem real influência sobre o problema em questão, para que a partir destas sejam propostos os resultados de tal fenômeno. Nesta seção serão apresentados os equacionamentos utilizados para modelar o problema proposto.

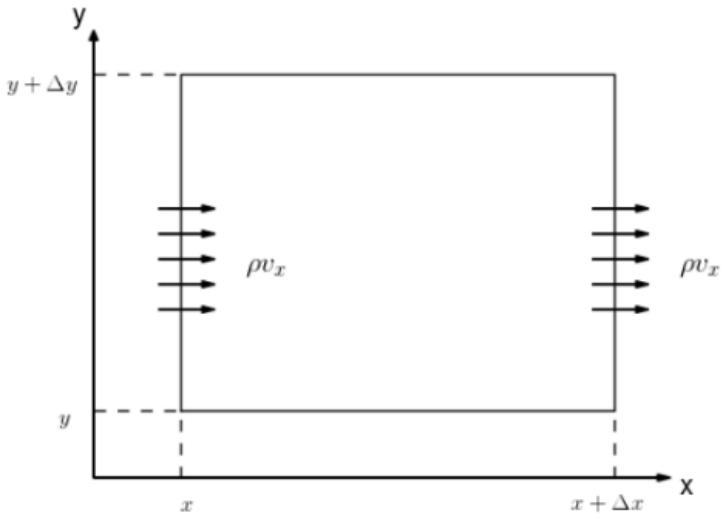
1.2 Equações Governantes

Por se tratarem de escoamentos cuja principal característica é a predominância dos efeitos viscosos, sendo monofásicos e sem troca de calor, as equações governantes que regem os casos analisados neste trabalho são as Equações de Navier-Stokes e a Equação da Continuidade, cujo desenvolvimento matemático é apresentado a seguir de acordo com (PONTES; MANGIAVACCHI, 2016).

1.2.1 Equação da Continuidade

Para o desenvolvimento da equação da continuidade, consideremos um volume de controle V, fixo no espaço, simplesmente conexo através do qual um fluido com massa específica ρ escoa, sendo $\mathbf{v}$ o campo de velocidades do escoamento. Sejam S a superfície externa que delimita o volume e $\mathbf{n}$ o vetor unitário (de comprimento igual a l), perpendicular à superfície em cada ponto da mesma e orientado para fora. O princípio de conservação da massa pode ser descrito como estabelecendo a relação entre a taxa de

Figura 3 - Esquema representando o fluxo de massa
através de um volume de controle bidimensional.



acúmulo de massa dentro do volume e o fluxo de massa para fora do volume. Conforme representado na Figura 3. Com a representação matemática sendo a equação 1.

$$\Delta \dot{m} = -\dot{m} \tag{1}$$

A taxa de acumulação de massa dentro do volume V pode ser expressa como a integral sobre todo o volume da variação da quantidade de massa em cada ponto do mesmo:

$$\int_V \frac{\partial}{\partial t} dm \tag{2}$$

Por outro lado a quantidade infinitesimal de massa dm Pode ser expressa como $dm = \rho dV$. Substituindo essa última expressão na integral acima e observando que os volumes dV não variam com o tempo, temos:

$$\int_V \frac{\partial}{\partial t} dm = \int_V \frac{\partial}{\partial t}(\rho dV) = \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_V \rho \frac{\partial dV}{\partial t} = \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV \tag{3}$$

Para darmos forma matemática ao fluxo líquido de massa para fora do volume V, consideramos inicialmente uma pequena parte da superfície. Seja ΔV um elemento de volume do fluido que cruza a superfície em um intervalo de tempo Δt. Sejam $\mathbf{n}$ o vetor unitário perpendicular a superfície, e $\mathbf{v}$, a velocidade do elemento de fluido considerado. Essa velocidade pode ser decomposta em duas componentes, uma delas paralela a $\mathbf{n}$, que denominamos v_n, e outra perpendicular a $\mathbf{n}$, que denominamos v_p .

A contribuição do elemento de fluido para o fluxo de massa que cruza a superfície e dada por $p\Delta V/\Delta t$. 0 elemento de volume ΔV pode ser escrito como o produto de seu comprimento Δx por sua área transversal ΔA, que consideramos paralela à superfície S. Assim, $\Delta V = \Delta x \Delta A$ e podemos reescrever o fluxo de massa que cruza a superfície como:

$$\rho \frac{\Delta V}{\Delta t} = \rho \frac{\Delta x}{\Delta t} \Delta A \tag{4}$$

O termo $\Delta x/\Delta t$ é precisamente a componente da velocidade do elemento de fluido paralelo a $\mathbf{n}$. Apenas essa componente contribui para fluxo de massa que cruza a superfície. Essa componente pode ser escrita como $v_n = \mathbf{v} \cdot \mathbf{n}$. Dessa forma, a contribuição do elemento dV para o fluxo de massa toma a forma:

$$\rho \frac{\Delta V}{\Delta t} = \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} \Delta A \tag{5}$$

Se a componente v_n, tiver o mesmo sentido da normal $\mathbf{n}$, isto é, se o elemento de volume dV estiver cruzando a superfície para fora da mesma, o produto $\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}$ será positivo, e se a componente v_n tiver sentido oposto a $\mathbf{n}$ o produto escalar será negativo. Ao integrarmos a expressão acima ao longo de toda a superfície S fazemos automaticamente o balanço do fluxo de massa que sai, menos o que entra no volume V. Assim, o fluxo liquido para fora do volume é:

$$\oint_S \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dA \tag{6}$$

Substituindo as equações 5 e 6, no balanço de massa (1) obtemos a forma integral da equação de conservação da massa:

$$\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = - \oint_S \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dA \tag{7}$$

Essa equação relaciona a taxa de acumulação de massa em um volume finito com o balanço dos fluxos de massa que cruzam a superfície. Trata-se de uma equação integral. Procuramos agora uma expressão local, isto é, uma equação diferencial que traduza o princípio de conservação da massa. Lembrando que, de acordo com o teorema de Gauss:

$$\int_V \nabla \cdot \mathbf{q} dV = \oint_S \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} dA \tag{8}$$

$$ou \tag{9}$$

$$\int_V \nabla \cdot \rho\mathbf{v} dV = \oint_A \rho\mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dA \tag{10}$$

utilizamos esse teorema para reescrever a equação 7:

$$\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = -\int_V \nabla \cdot (\rho\mathbf{v}) dV \tag{11}$$

$$ou \tag{12}$$

$$\int_V \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho\mathbf{v} \right) dV = 0 \tag{13}$$

Como essa equação deve ser válida para quaisquer volumes de controle, devemos ter, para um volume infinitesimal:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho\mathbf{v} = 0 \tag{14}$$

que é a equação da continuidade.

Pode-se ainda simplificar esta equação, uma vez que o fluido no presente estudo é considerado incompressível, logo a massa específica não varia nem no espaço, nem no tempo. Com esta consideração é obtida a equação da continuidade conforme apresentado na equação 15.

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \tag{15}$$

1.2.2 Equação de Navier-Stokes

Seja um volume fixo no campo de velocidades de um meio contínuo. A taxa de variação da quantidade de movimento desse volume deve incluir, além da resultante das forças aplicadas, o balanço do fluxo de quantidade de movimento através das fronteiras do volume sendo equacionado conforme a equação 16.

$$\Delta \dot{I} = -\dot{I} + F_{sup} + F_{corpo} \tag{16}$$

onde $\Delta\dot{I}$ representa a taxa de acumulação do momento linear no volume de controle, $\dot{I}$ representa o fluxo líquido de momento linear atravessando a fronteira do volume de controle e F_{sup} e F_{corpo} são as forças de superfície e de corpo, respectivamente.

Expressemos cada uma das parcelas acima em forma matemática. A taxa de acumulação no volume de controle, da componente da quantidade de movimento na direção genérica do vetor unitário e_i é dada poela equação 17:

$$\Delta\dot{I} = \int_V \frac{\partial}{\partial t}(\rho\mathbf{v})dV \tag{17}$$

O fluxo de massa através de um elemento de área dA da superfície de controle e dado por $\rho\mathbf{v}\mathbf{n}dA$. Se o multiplicarmos pela componente na direção genérica i da quantidade de movimento por unidade de massa, isto é, pela componente do vetor velocidade nessa direção, temos uma expressão para o fluxo daquela componente que cruza a área: $\rho\mathbf{v}\mathbf{v}\mathbf{n}dA$. Integrando esse termo ao longo de toda a superfície de controle temos o fluxo líquido dessa componente da quantidade de movimento para fora da superfície de controle:

$$\oint_S \rho\mathbf{v}\cdot(\mathbf{v}\cdot\mathbf{n})dA \tag{18}$$

No que se refere às forças que atuam na superfície do elemento, fazemos as seguintes hipóteses:

1. Admitimos que possam ser expressas uma como combinação linear das componentes do vetor $\mathbf{n}$ normal ao elemento da superfície considerado. Sejam força n_1, n_2 e n_3 as componentes do vetor $\mathbf{n}$. Sendo a força $d\mathbf{F}$, que age no elemento de área, proporcional a uma combinação linear das componentes de $\mathbf{n}$, $d\mathbf{F}$ não tem, de forma geral, a direção do vetor normal.

2. O fator de proporcionalidade acima mencionado é a área do elemento de superfície à qual a força é aplicada, isto é, admitimos que a magnitude da força é proporcional à área do elemento.

Como $d\mathbf{F}$ e $\mathbf{n}$ não têm, de forma geral, a mesma direção, é necessário que σ seja uma matriz, 3 x 3, de modo que, aplicado ao vetor $\mathbf{n}$, resulte em um vetor com outra direção.

Sendo a area um objeto vetorial, os elementos de area da superficie de controle podem ser projetados nas direções dos eixos de coordenadas. Assim, a força que age na direçao de um elemento de área expressa-se como:

$$dF_x = (\sigma_{xx}n_x + \sigma_{xy}n_y + \sigma_{xx}n_z)dA \tag{19}$$

onde $n_x dA$, $n_y dA$, $n_z dA$ são as projeções da área elementar na direção de cada um dos eixos. Na direção genérica, do eixo x_i:

$$d\mathbf{F} = \sigma \cdot \mathbf{n} dA \tag{20}$$

As equações 19 e 20 estão baseadas na hipótese de que a força agindo sobre o elemento de área expressam-se como uma combinação linear das projeções do vetor unitário **n**. E, sendo esse vetor multiplicado por uma matriz, o vetor força resultante não tem necessariamente a direção normal à superfície, o que ocorre efetivamente quando a partícula do meio está sujeita a tensões de cisalhamento.

A resultante das forças que atuam sobre a superfície de controle é obtida pela integração da equação 19 ao longo daquela:

$$\mathbf{F} = \oint_S \sigma \cdot \mathbf{n} dA \tag{21}$$

Por fim, a resultante das forças de volume é dada por:

$$\int_V \rho \mathbf{g} dV \tag{22}$$

Reagrupando os quatro termos, obtemos a forma integral da equação de conservação da quantidade de movimento:

$$\int_V \frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) dV = -\oint_S \rho \mathbf{v} \cdot (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dA + \oint_S \sigma \cdot \mathbf{n} dA + \int_V \rho \mathbf{g} dV \tag{23}$$

O passo seguinte consiste em transformar as integrais de superfície em integrais de volume por intermédio do teorema de Gauss, de forma que possamos obter a equação de conservação da quantidade de movimento na forma diferencial. Observamos que o termo $\rho v_i v_j$ representa o elemento geral de um tensor de segunda ordem. O divergente desse tensor é obtido da mesma forma que o do tensor de tensões. Reescrevendo a equação 23 com todos os termos na forma de integrais de volume, temos para a taxa de variação da quantidade de movimento na direção x_i dentro do volume de controle:

$$\int_V \frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) dV = -\int_V \frac{\partial}{\partial x_j} \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} dV + \int_V \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} dV + \int_V \rho \mathbf{g} dV \tag{24}$$

Essa equação deve ser válida para volumes de controle de qualquer dimensão,

inclusive para volumes infinitesimais. Considerando um volume infinitesimal e dividindo a equação resultante por dV, encontramos:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot \rho \mathbf{v}\mathbf{v} = \nabla \cdot \sigma_{ij} + \rho \mathbf{g} \tag{25}$$

Simplificando e rearranjando os termos da equação 25, esta toma a forma da derivada material:

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \frac{1}{\rho}\nabla \cdot \sigma + \mathbf{g} \tag{26}$$

Partindo da propriedade de simetria do tensor de tensões, e de sua decomposição em nas componentes de pressão e tensor desviatório, como exposto na 27, chega-se à equação 28.

$$\sigma = -p\mathbf{1} + \tau \tag{27}$$

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \frac{1}{\rho}\nabla \cdot (p\mathbf{1} + \tau) + \mathbf{g} \tag{28}$$

Distribuindo o operador divergente, tem-se a equação da quantidade de movimento 31.

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \frac{1}{\rho}\nabla p + \frac{1}{\rho}\nabla \cdot \tau + \mathbf{g} \tag{29}$$

Para chegar da equação da quantidade de movimento até a equação de Navier-Stokes, devem ser tomadas algumas hipóteses, que para este caso serão verdadeiras:

1. O fluido em questão é Newtoniano e um fluido de Stokes.
2. O fluido em questão é incompressível (Para as velocidades assumidas neste estudo consideraremos o ar incompressível).

Desta forma, pode ser aplicada a equação constitutiva dos fluidos newtonianos, que acrescido à hipótese de incompressibilidade, resulta no tensor desviatório a ser reescrito como:

$$\frac{1}{\rho}\nabla \cdot \tau = \frac{\mu}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right) = \frac{\mu}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial^2 v_j}{\partial x_j \partial x_i}\right) = \frac{\mu}{\rho}\nabla^2 v_i \tag{30}$$

Substituindo esta forma do tensor desviatório, a definição da viscosidade cinemática ($\nu = \mu/\rho$) e levando em consideração que $\partial v_i/\partial x_j = 0$ e substituindo na equação 31, chega-se à equação de Navier-Stokes:

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\nabla^2\mathbf{v} + \mathbf{g} \tag{31}$$

1.3 **Modelos Utilizados**

1.3.1 Modelo k-ômega SST

O modelo k-ômega SST (Shear-Stress Transport) presente no Ansys Fluent, é apresentado no trabalho de Menter (1994) juntamente com o modelo k-ômega Baseline (BSL). A formulação matemática destes modelos será apresentada abaixo comando como base o (ANSYS INC, 2024) e o trabalho (MENTER, 1994).

Ambos os modelos citados anteriormente tem como ideia principal propor uma solução para um dos maiores problemas dos modelos k-ômega, que é a sensibilidade do modelo a regiões de escoamento livre. A forma proposta para tal resolução seria utilizar os pontos fortes do modelo k-ômega na predição da camada limite, e os pontos fortes do modelo k-épsilon na predição do escoamento livre. Sendo assim, estes modelos na realidade partem do modelo k-ômega original (também chamado k-ômega Standard) por Wilcox (1998) e descritos nas equalções 32 e 33,

$$\frac{D(\rho k)}{Dt} = \tau_{ij}\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^*\rho w k + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \sigma_{k1}\mu_t)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] \tag{32}$$

$$\frac{D(\rho w)}{Dt} = \frac{\gamma_1}{\nu_t}\tau_{ij}\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta_1\rho w^2 + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \sigma_{w1}\mu_t)\frac{\partial w}{\partial x_j}\right] \tag{33}$$

e do modelo k-épsilon transformado para uma formulação k-ômega conforme nas equações 34 e 35:

$$\frac{D(\rho k)}{Dt} = \tau_{ij}\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^*\rho w k + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \sigma_{k2}\mu_t)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] \tag{34}$$

$$\frac{D(\rho w)}{Dt} = \frac{\gamma_2}{\nu_t}\tau_{ij}\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta_2\rho w^2 + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \sigma_{w2}\mu_t)\frac{\partial w}{\partial x_j}\right] + 2\rho\sigma_{w2}\frac{1}{w}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial w}{\partial x_j} \tag{35}$$

Destas equações, 32 e 33 serão multiplicados por uma função F_1 e as equações 34 e 35 serão multiplicadas por $(1 - F_1)$ e então as equações são adicionadas, resultando no modelo apresentado pelas equações 36 e 37.

$$\frac{D(\rho k)}{Dt} = \tau_{ij}\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^*\rho w k + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \sigma_k\mu_t)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] \tag{36}$$

$$\frac{D(\rho w)}{Dt} = \frac{\gamma_2}{\nu_t}\tau_{ij}\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta_2\rho w^2 + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \sigma_w\mu_t)\frac{\partial w}{\partial x_j}\right] + 2\rho(1 - F_1)\sigma_{w2}\frac{1}{w}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial w}{\partial x_j} \tag{37}$$

Onde se chamamos ϕ_1 as constantes presentes nas equações 32 e33 e ϕ_2 as constantes presentes nas equações 34 e 35, e ϕ as constantes das equações do novo modelo representado nas equações 36 e 37, temos a relação entre elas sendo representada pela 38, abaixo:

$$\phi = F_1\phi_1 + (1 - F_1)\phi_2 \tag{38}$$

Este procedimento é tomado para ambos os modelos BSL e SST, como o objetivo desta seção é introduzir o modelo utilizado, a partir deste ponto serão tomadas as definições que levarão ao modelo k-ômega SST. Dito isto, além das manipulações anteriores, são definidas as constantes ϕ_1 para o modelo SST de acordo com as equações 39, 40, 41, 42, 43, 44 e 45.

$$\sigma_{k1} = 0.85 \tag{39}$$

$$\sigma_{\omega1} = 0.5 \tag{40}$$

$$\beta_1 = 0.075 \tag{41}$$

$$a_1 = 0.31 \tag{42}$$

$$\beta^* = 0.09 \tag{43}$$

$$\kappa = 0.41 \tag{44}$$

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{\beta^*} - \sigma_{\omega1}\kappa^2\sqrt{\beta^*} \tag{45}$$

São também definidas as constantes ϕ_2 relativas às equações transformadas do modelo k-épsilon conforme as equações 46, 47, 48 e 49.

$$\sigma_{k2} = 1.0 \tag{46}$$

$$\sigma_{\omega2} = 0.856 \tag{47}$$

$$\beta_2 = 0.0828 \tag{48}$$

$$\gamma_2 = \frac{\beta_2}{\beta^*} - \sigma_{\omega2}\kappa^2\sqrt{\beta^*} \tag{49}$$

Após a definição das constantes, existem ainda as seguintes definições, da viscosidade turbulenta ν_t na equação 50, do tensor de tensões τ_{ij} na equação 51, das funções 1 e 2 nas equações 52 e 53, de seus argumentos nas equações 54 e 55 e da porção positiva do termo de difusão cruzada $CD_{k\omega}$ na equação 56.

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{max(a_1\omega, \Omega F_2)} \tag{50}$$

$$\tau_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\delta_{ij} \right) - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij} \tag{51}$$

$$F_1 = tanh(arg_1^4) \tag{52}$$

$$F_2 = tanh(arg_2^2) \tag{53}$$

$$arg_1 = min\left[max\left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}; \frac{500\nu}{y^2\omega} \right); \frac{4\rho\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \tag{54}$$

$$arg_2 = max\left(2\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}; \frac{500\nu}{y^2\omega} \right) \tag{55}$$

$$CD_{k\omega} = max\left(2\rho\sigma_{\omega 2}\frac{\sqrt{1}}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j}; 10^{-20} \right) \tag{56}$$

Onde y é a distância da parede mais próxima e Ω é o valor absoluto da vorticidade.

1.4 **Simulação numérica e o Método dos Volumes Finitos**

Dentro dos diversos campos da engenharia, existem uma série de problemas que não podem ser resolvidos de forma analítica, ou ainda que não poderiam ser resolvidos de forma analítica em tempo hábil para tomar uma decisão na elaboração de um projeto. Para auxiliar na solução destes problemas, existem o que chamamos de métodos numéricos. Ao integrar estes métodos com o poder da computação pode-se simular de maneira suficientemente fidedigna os mais diversos fenômenos físicos, uma vez que sejam adotadas hipóteses coerentes e modelagem matemática adequada para os fenômenos a se retratar.

Dessa perspectiva de simular os fenômenos reais, através dos métodos numéricos, cunhou-se o termo simulação numérica. Na simulação numérica as equações são aproximadas de forma a fornecer um resultado almejado, no presente trabalho utilizaremos o método dos volumes finitos, descrito na seção abaixo.

1.4.1 Método dos Volumes Finitos

O Método dos Volumes finitos (MVF) é um método de discretização, utilizado para aproximar equações diferenciais parciais (EDPs) ou um sistema destas equações. As Leis de conservação de diversas áreas, e diversos fenômenos são modeladas matematicamente através de EDPs. Estas podem descrever a relação entre as derivadas parciais de diferentes variáveis, como temperatura, pressão e concentração.

Para demonstrar esta discretização dividiremos o processo em partes, conforme realizado em Andrade (2014). Estas partes serão originadas da discretização da equação geral de conservação resultando nas discretizações do termo difusivo, advectivo/convectivo, do termo fonte, do espaço-temporal, e por fim a reconstrução de gradientes.

1.4.1.1 Equação Geral de Conservação

Escrevendo as equações de conservação de forma genérica como na equação 57.

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F}(\phi) = S(\phi, t) \tag{57}$$

onde ρ é a massa específica do componente transportado, S é o termo fonte de ϕ e $\mathbf{F}$ é a função fluxo de ϕ. Esta função fluxo pode ser dividida em duas parcelas:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_a + \mathbf{F}_d = \rho\mathbf{v}\phi - \Gamma^{\phi}\nabla\phi \tag{58}$$

Na equação 58 a primeira parcela $\mathbf{F}_a$ é chamada fluxo advectivo/convectivo, e a segunda parcela $\mathbf{F}_d$ de fluxo difusivo, $\mathbf{v}$ é o campo de velocidades e Γ^{ϕ} o coeficiente de difusão da propriedade ϕ. Substituindo a equação 58 na equação 57 e escrevendo com notação indicial chega-se à equação 59.

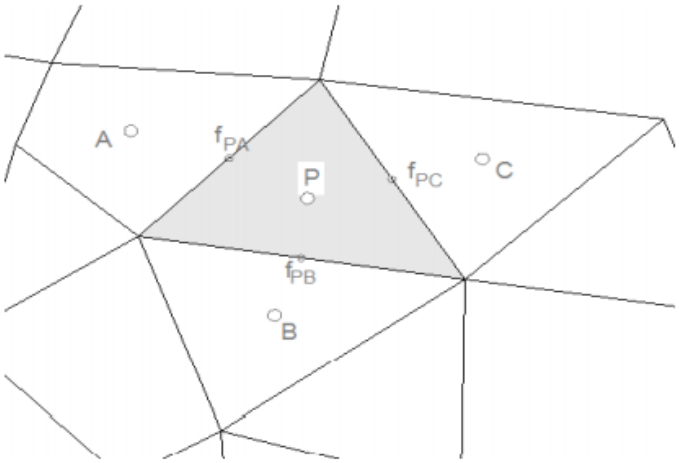
$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j\phi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma^{\phi}\frac{\partial\phi}{\partial x_j}\right) + S(\phi, t) \tag{59}$$

A equação 59 é a forma conservativa geral do transporte de uma grandeza ϕ. Esta representação é usualmente utilizada como ponto de partida para o processo de discretização no método dos volumes finitos.

A discretização via volumes finitos consistem em integrar a equação 59 em um número finito de volumes de controle Ω_{vc} e no intervalo de tempo Δt.

$$\int_t^{t+\Delta t}\int_{\Omega_{vc}} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV dt + \int_t^{t+\Delta t}\int_{\Omega_{vc}} \frac{\partial(\rho u_j\phi)}{\partial x_j} dV dt = \tag{60}$$

Figura 4 - Representação do volume de controle central P e dos volumes vizinhos A, B e C. f_{PA}, f_{PB} e f_{PC} são os pontos médios das faces.



Fonte: Andrade (2014)

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{\Omega_{vc}} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma^{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) dV dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_{\Omega_{vc}} S(\phi, t) dV dt$$

Aplicando-se o teorema do divergente no segundo termo do lado esquerdo e no primeiro termo do lado direito, correspondendo aos termos advectivo/convectivo e difusivo respectivamente. Após aplicar-se este teorema chega-se à equação 61.

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{\Omega_{vc}} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_{\Omega_{vc}} \frac{\partial(\rho u_j \phi)}{\partial x_j} dV dt = \tag{61}$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{\Omega_{vc}} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma^{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) dV dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_{\Omega_{vc}} S(\phi, t) dV dt$$

onde $\partial\Omega_{vc}$ é o contorno do volume Ω_{vc}. Na equação 61 da esquerda para a direita consideraremos os termos I, II, III e IV.

A Figura 4 representa os volumes de controle triangulares de uma discretização arbitraria. O volume de controle central P é onde o balanço do fluxo será efetuado. Os vizinhos da célula central P são os volumes de controle A, B e C que possuem uma face (aresta) compartilha com o volume de controle P. Os pontos médios das faces compartilhadas são representados por f_{PA}, f_{PB} e f_{PC}, correspondendo respectivamente a face compartilha entre os volumes A, B e C e o volume central P.

1.4.1.2 Discretização do termo difusivo

A integração do termo III da equação 61 é obtida usando a formulação totalmente implicita, o teorema do valor médio para integrais e a regra do ponto médio para aproximar os valores das grandezas no centro da face do volume de controle genérico P representado na Figura 4. Com as considerações anteriores as integrais de superficie e temporal são aproximadas por,

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{\gamma_1 c} \Gamma^\phi \left(\frac{\partial \phi}{\partial x_j} n_j \right) dS dt \approx \Delta t \left(\sum_{f=vi=(P)}^{N_i z} \left(\Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} S_j \right)_f \right)^{n+1} = \tag{62}$$

$$\Delta t \left(\sum_{f-v=(P)}^{Nvz} \left(\Gamma^\phi \nabla \phi \cdot \mathbf{S} \right)_f \right)^{n+1}$$

onde $S_j = S n_j = \mathbf{S}$ é o vetor de área da face, viz$(P) = (A, B, C)$ é o conjunto dos vizinhos da célula $P, n+1$ é o nível temporal onde as grandezas são avaliadas e $Nviz$ é o número total de vizinhos da célula P.

O coeficiente de difusão Γ'_f na face é aproximado através de uma média harmônica, considerando por exemplo, a face entre os vizinhos A e P, a média harmônica é dada por,

$$\Gamma^\phi_{PA} = \left(\frac{1 - f_{PA}}{\Gamma^\phi_P} + \frac{f_{PA}}{\Gamma^\phi_A} \right)^{-1} \tag{63}$$

onde Γ'_P e Γ'_A são os valores nos centros dos volumes de controle. O parâmetro de interpolação f_{PA} é a razão entre a distância d_{Pf}, dada por,

$$f_{PA} = \frac{d_{Pf}}{d_{PA}} \tag{64}$$

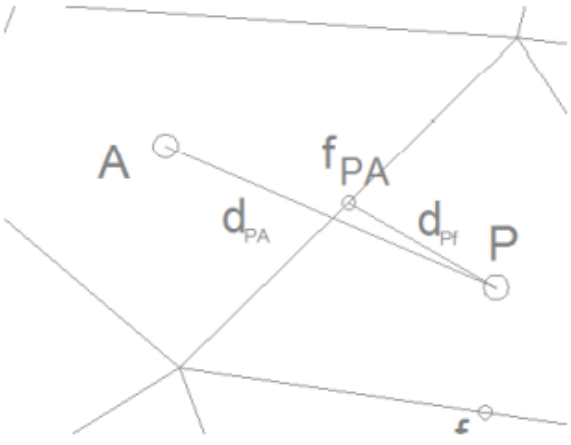
onde d_{Pf} á a distância entre o centro da célula P e o ponto médio da face e d_{PA} é a distância entre os centros da célula central P e sua vizinha A, representados na Figura 5.

O gradiente normal foi dividido em duas parcelas. Para esta divisão utilizou-se a soma vetorial esquematizada na Figura 6 . O vetor de área é divido em dois vetores,

$$\mathbf{S}_{PA} = \mathbf{E}_{p_A} + \mathbf{k}_{P_A} \tag{65}$$

onde o vetor $\mathbf{E}$ é paralelo a linha $\overrightarrow{PA}$ que liga os dois centroides dos volumes P e A, e pode ser escrito como $\mathbf{E}_{PA} = E_{pA} \xi_{PA}$. O vetor ξ_{PA} é o vetor unitário paralelo a $\overrightarrow{PA}$.

Figura 5 - Interpolação linear entre as grandezas armazenadas no centro dos volumes P e A na face compartilhada f_{PA}.



Fonte: Andrade (2014)

Utilizando a relação o gradiente normal a face é dado por,

$$\nabla\phi^f_{P_A} \cdot \mathbf{S}_{p_A} = E_{P_A}\nabla\phi^f_{P_A} \cdot \xi_{p_A} + \nabla\phi^f_{PA} \cdot \mathbf{k}_{p_A} \tag{66}$$

onde o primeiro termo pode ser discretizado como,

$$\nabla\phi^f_{PA} \cdot \xi_{PA} = \frac{\partial\phi}{\partial E} \approx \frac{\phi_A - \phi_P}{d_{PA}} \tag{67}$$

O segundo termo pode ser rescrito considerando que o vetor $\mathbf{k}_{p_4}$ pode ser explicitado através da equação 65 como,

$$\mathbf{k}_{PA} = \mathbf{S}_{pA} - E_{p_A}\xi_{PA} \tag{68}$$

utilizando as equações 66, 67 e 68 chega-se à,

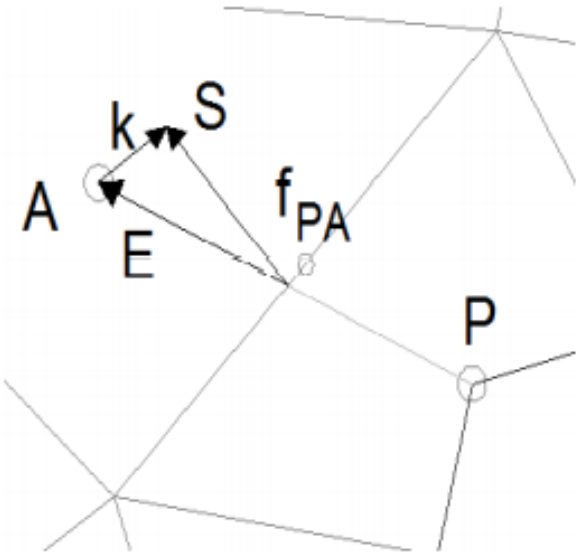
$$\nabla\phi^f_{PA} \cdot \mathbf{S}_{p_A} \approx E_{PA}\frac{\phi_A - \phi_P}{d_{PA}} + \nabla\phi^f_{PA} \cdot \mathbf{S}_{PA} - E_{p_A}\nabla\phi^f_{P_A} \cdot \xi_{P_A} \tag{69}$$

o valor E é definido como,

$$E = \frac{S_{PA}}{\xi_{PA} \cdot \mathbf{n}_{PA}} \tag{70}$$

A equação acima corresponde aos valores E_{PA} da abordagem sobre relaxada, nesta abordagem o modulo de E_{PA} é definido de tal forma que o vetor $\mathbf{k}_{p_4}$ seja paralelo à face em

Figura 6 - Decomposição do vetor de área **S** em **E** e **k** para o tratamento do termo difusivo para malhas não estruturadas.



Fonte: Andrade (2014)

questão. Substituindo 70 na equação 69 chega-se à,

$$\nabla\phi_{PA}^{f}\cdot\mathbf{S}_{PA}\approx\overbrace{\frac{S_{PA}}{\xi_{PA}\cdot\mathbf{n}_{PA}}\frac{\phi_A-\phi_P}{d_{PA}}}^{\text{ortogonal}}+\overbrace{\left(\nabla\phi_{PA}^{f}\right)_{\text{c}}\cdot\mathbf{S}_{\text{PA}}-\frac{S_{PA}}{\xi_{PA}\cdot\mathbf{n}_{PA}}\left(\nabla\phi_{PA}^{f}\right)_{\text{c}}\cdot\xi_{PA}}^{\text{não-ortogonal}} \tag{71}$$

Na equação 71 a parcela ortogonal é tratada implicitamente e a parcela não ortogonal é tratada explicitamente considerando os valores da iteração anterior. Desta maneira a molécula de cálculo fica compacta. O gradiente $\nabla\phi_{PA}^{f}$ na face foi calculado utilizando a forma compacta, dada por,

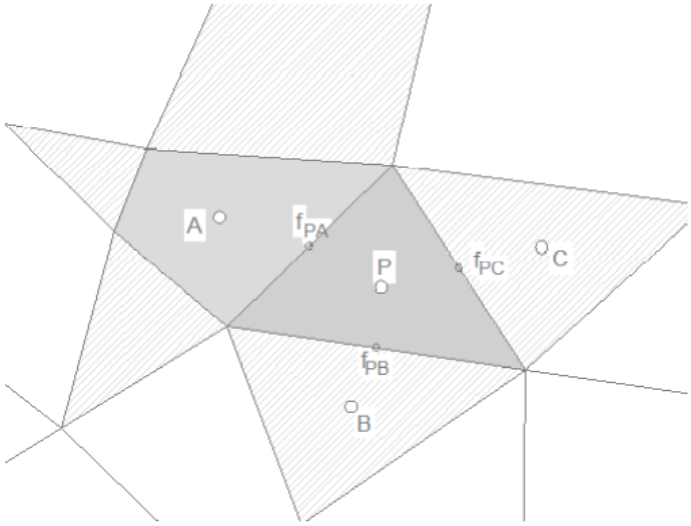
$$\left(\nabla\phi_{PA}^{f}\right)_{\text{c}}=\nabla\phi_{P_A}^{f}+\frac{(\phi_A-\phi_P)}{d_{P_A}}\xi_{\text{PA}}-\left(\nabla\phi_{PA}^{f}\cdot\xi_{\text{PA}}\right)\xi_{\text{PA}}, \tag{72}$$

onde $\nabla\phi_{PA}^{f}$ é obtido através de,

$$\nabla\phi_{PA}^{f}=f_{PA}\nabla\phi_{P}^{c}+(1-f_{PA})\,\nabla\phi_{A^*}^{c} \tag{73}$$

Na equação acima o gradiente na face possui informação de vizinhos de primeira e segunda ordem, representado pelos volumes de controles sólidos e a hachuras da Figura 7. No cálculo do gradiente de P são utilizados valores de seus vizinhos diretos,

Figura 7 - Molécula de cálculo para o gradiente em f_{PA} utilizando molécula extensa (hachurada + sólida) e a compacta (sólida).



Fonte: Andrade (2014)

o mesmo ocorre para o cálculo do gradiente de A, logo o cálculo do gradiente na face utiliza uma molécula computacional extensa. Na equação 72 apenas a contribuição dos volumes sólidos são mantidos, levando assim a uma molécula computacional compacta. O gradiente no centro da célula em 72 é obtido pela reconstrução de gradiente Green-Gauss.

Considerando todas as faces do volume de controle P genérico e todos os n volumes da discretização do domínio e com auxílio de 62 e 70 pode-se escrever,

$$\Delta t \sum_{j=v=(P)}^{Nvz} D_{p_j} \left(\phi_p - \phi_j\right) = \Delta t \sum_{j=vi=(P)}^{M_{iz}} S_{p_j}^{CD} \text{ para } P = 1, 2, 3, \ldots n \tag{74}$$

onde,

$$D_{P_j} = \frac{\Gamma_{P_j}^{\phi} S_{P_j}}{d_{P_y} \left(\xi_{P_j} \cdot \mathbf{n}_{P_j}\right)} \tag{75}$$

e (76)

$$S_{Pj}^{CD} = \Gamma_{Pj}^{\phi} \nabla \phi_{Pj}^{f} \cdot \mathbf{S}_{Pj} - \Gamma_{Pj}^{\phi} \frac{S_{Pj}}{\xi_{Pj} \cdot \mathbf{n}_{Pj}} \nabla \phi_{Pj}^{f} \cdot \xi_{Pj} \tag{77}$$

Rearrumando a equação 74, para isolar o termo ϕ_p, pode-se escrever:

$$\Delta t \sum_{j=viz(P)}^{Nviz} D_{Pj}\phi_P - \Delta t \sum_{j=viz(P)}^{Nviz} D_{Pj}\phi_j = \Delta t \sum_{j=viz(P)}^{Nviz} S_{Pj}^{CD} \tag{78}$$

$$\Delta t \sum_{j=viz(P)}^{Nviz} D_{Pj}\phi_P = \Delta t \sum_{j=viz(P)}^{Nviz} D_{Pj}\phi_j + \Delta t \sum_{j=viz(P)}^{Nviz} S_{Pj}^{CD} \tag{79}$$

$$\phi_P \Delta t \sum_{j=viz(P)}^{Nviz} D_{Pj} = \Delta t \sum_{j=viz(P)}^{Nviz} D_{Pj}\phi_j + \Delta t \sum_{j=viz(P)}^{Nviz} S_{Pj}^{CD} \tag{80}$$

O sistema de equações é dado por,

$$a_P^{dif}\phi_P = \sum_{j=viz(P)}^{Nviz} \left(a_{viz}^{dif}\phi_{viz}\right)_j + b_P^{dif} \tag{81}$$

onde,

$$a_P^{div} = \sum_{j=viz(P)}^{Nviz} \left(a_{viz}^{div}\right)_j = \Delta t \sum_{j=viz(P)}^{Nviz} D_{Pj}, \tag{82}$$

$$a_{viz}^{div} = \Delta t D_{Pj} \tag{83}$$

$$e \tag{84}$$

$$b_P^{dif} = \Delta t \sum_{j=viz(P)}^{Nviz} S_{Pj}^{CD} \tag{85}$$

A matriz de coeficiente do sistema de equação 81 é simétrica.

1.4.1.3 Discretização do termo advectivo/convectivo

A integração do termo II da equação 61 é obtida usando a formulação totalmente implícita no tempo, teorema do valor médio para integrais e a regra do ponto médio para aproximar os valores das grandezas no centro da face do volume de controle genérico P representado na Figura 4. Com as considerações anteriores as integrais de superfície e temporal são aproximadas por,

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{\gamma_{VC}} \rho\left(u_j n_j\right)\phi dS dt \approx \Delta t \left(\sum_{f=viz(P)}^{Nviz} \left(\rho\left(u_j S_j\right)\phi\right)_f\right)^{n+1} = \tag{86}$$

$$\Delta t \left(\sum_{f=viz(P)}^{Nviz} (\rho(\mathbf{v} \cdot \mathbf{S})\phi)_f \right)^{n+1}$$

onde ρ e $\mathbf{v}$ são conhecidos previamente. Essas grandezas são aproximadas através de interpolações lineares de forma similar a equação 72, portanto se têm,

$$\rho_{PA} = f_{PA}\rho_p + (1 - f_{PA})\,\rho \tag{87}$$

e

$$\mathbf{v}_{\mathrm{PA}} = f_{PA}\mathbf{v}_{\mathrm{P}} + (1 - f_{PA})\,\mathbf{v_A} \tag{88}$$

A grandeza ϕ foi avaliada utilizando a técnica upwind/TVD de segunda ordem com função limitadora de fluxo. A grandeza ϕ na face é interpolada por,

$$\phi_f = \phi_U^{FOU} + \frac{1}{2}\psi\left(\beta_f\right)\left(\phi_D - \phi_U\right) \tag{89}$$

onde ϕ_U^{FoU} é a parcela de upwind de primeira ordem e $\psi\left(\beta_f\right)$ a função limitadora de fluxo. Os subscritos "U'"e "D"são dependentes da direção do fluxo advectivo/convectivo, correspondendo respectivamente aos pontos a montantes e jusante do escoamento local à face. O segundo termo corresponde à parcela de segunda ordem com função limitadora de fluxo. Os pontos "U"e "D"são determinados seguindo o seguinte raciocínio: Considerando a célula central P e sua vizinha A para o caso de fluxo positivo, $(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n})_p > 0$, tem-se $U = P$ e $D = A$; para o caso de fluxo negativo, $(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n})_p < 0$, tem-se $U = A$ e $D = P$, como representado na Figura 5.

A parcela upwind de primeira ordem é definida como,

$$\phi_U^{FOU} = \begin{cases} \phi_P & \text{se } \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} > 0 \\ \phi_A & \text{se } \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} < 0 \end{cases} \tag{90}$$

A função limitadora utilizada foi a superbee,

$$\psi\left(\beta_f\right) = \max\left[0, \min\left(2\beta_f, 1\right), \min\left(\beta_f, 2\right)\right] \tag{91}$$

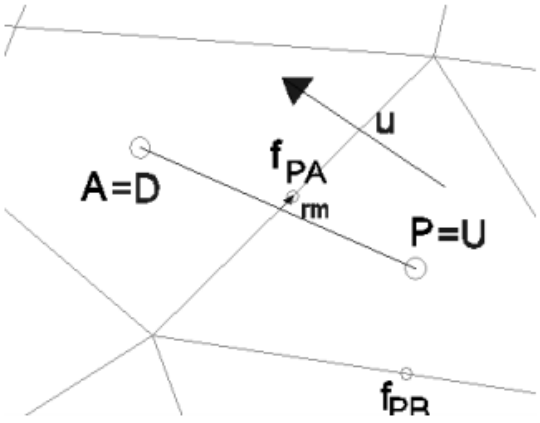
onde β_f utilizado foi a expressão para malhas não estruturadas dada por,

$$\beta = \left[\frac{2\nabla\phi_{\mathrm{u}} \cdot \mathbf{r}_{\mathrm{UD}}}{\phi_D - \phi_U} - 1\right] \tag{92}$$

A interpolação upwind/T VD pode-se escrita de forma compacta como,

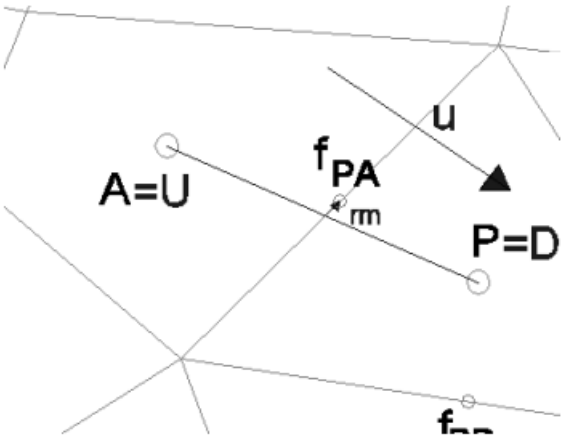
$$\Phi_{PA}^f = \Phi_{PA}^{FOU} + S_{PA}^{DC} \tag{93}$$

Figura 8 - Discretização do termo advectivo com a técnica upwind/TVD de segunda ordem para um campo conhecido de velocidade **u**: fluxo advectivo/convectivo positivo com $U = P$ e $D = A$.



Fonte: Andrade (2014)

Figura 9 - Discretização do termo advectivo com a técnica upwind/TVD de segunda ordem para um campo conhecido de velocidade **u**:fluxo advectivo/convectivo negativo com $U = A$ e $D = P$.



Fonte: Andrade (2014)

onde,

$$\Phi_{PA}^{FOU} = \begin{cases} \mathrm{F}_{pA}\phi_p & \text{se } \mathrm{F}_{PA} > 0 \\ \mathrm{F}_{pA}\phi_A & \text{se } \mathrm{F}_{PA} < 0 \end{cases} \tag{94}$$

e

$$S_{PA}^{DC} = \begin{cases} F_{PA}L_p & \text{se } \mathrm{F}_{PA} > 0 \\ F_{PA}L_A & \text{se } \mathrm{F}_{PA} < 0 \end{cases} \tag{95}$$

com,

$$F_{p_A} = \rho_{p_A}(\mathbf{v} \cdot \mathbf{S})_{PA} \tag{96}$$

e

$$L_U = \frac{1}{2}\psi\left(\beta_f\right)\left(\phi_D - \phi_U\right) \tag{97}$$

Utilizando 87 e a relação 93, chega-se à

$$\Delta t \sum_{j=viz(P)}^{Nviz} \Phi_{Pj}^{FOU} = -\Delta t \sum_{j=viz(P)}^{Nviz} S_{Pj}^{DC} para \mathrm{P} = 1, 2, 3, \ldots \mathrm{n} \tag{98}$$

rearrumando a equação 98 para isolar o termo ϕ_p de maneira similar à feita para o termo difusivo, pode-se escrever:

$$\Delta t \sum_{j=viz(P)}^{Nviz} \max\left(F_{Pj}, 0\right)\phi_P + \Delta t \sum_{j=viz(P)}^{Nviz} \min\left(F_{Pj}, 0\right)\phi_j + \Delta t \sum_{j=viz(P)}^{Nviz} S_{Pj}^{DC} = 0 \tag{99}$$

$$\phi_P \Delta t \sum_{j=viz(P)}^{Nviz} \max\left(F_{Pj}, 0\right) = -\Delta t \sum_{j=viz(P)}^{Nviz} \min\left(F_{Pj}, 0\right)\phi_j - \Delta t \sum_{j=viz(P)}^{Nviz} S_{Pj}^{DC} \tag{100}$$

O sistema de equações é dado por,

$$a_P^{adv}\phi_P = \sum_{j=viz(P)}^{Nviz} \left(a_{viz}^{adv}\phi_{viz}\right)_j + b_P^{adv} \tag{101}$$

onde,

$$a_p^{\mathrm{adv}} = \Delta t \sum_{j=\mathrm{v}=(P)}^{\mathrm{Nez}} \max\left(F_{pj}, 0\right) \tag{102}$$

$$a_{viz}^{adv} = -\Delta t \min\left(F_{Pj}, 0\right) \tag{103}$$

e

$$b_P^{adv} = -\Delta t \sum_{j=viz(P)}^{Nviz} S_{Pj}^{DC} \tag{104}$$

A matriz de coeficiente do sistema de equação 101 é não simétrica.

1.4.1.4 Discretização do termo fonte

A integração do termo IV da equação 61 é obtida através do teorema do valor médio para integrais considerando valores médios das grandezas no centro do volume de controle genérico P. As integrais de volume e temporal são aproximadas por,

$$\int_t^{t+\Delta} \int_{\Omega_p} S(\phi, t) dV dt \approx V_P \bar{S} \Delta t \tag{105}$$

onde V_P é o volume da célula e $\bar{S}$ é o valor médio conhecido para o volume de controle P.

1.4.1.5 Discretização espaço-temporal

A integração do termo IV da equação 61 é obtida primeiramente considerada o valor médio da derivada temporal no volume de controle V_p,

$$\int_l^{t+\Delta'} \int_{\Omega_p} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV dt \approx \int_t^{t+N} V_P \left(\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}\right)_M dt \tag{106}$$

a derivada temporal média pode ser discretizada pela técnica backward de três niveis,

$$\left(\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}\right)_M = \frac{3(\rho\phi)^{n+1} - 4(\rho\phi)^n + (\rho\phi)^{n-1}}{2\Delta t} \tag{107}$$

A equação acima é conhecida como quadratic backward, esse método é de segunda ordem no tempo e similar à técnica Crank-Nicolson. Substituindo esta aproximação em 106, chega-se à

$$\int_t^{t+M} \int_{\Omega_p} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV dt \approx \frac{V_P}{2} \left(3(\rho\phi)_p^{n+1} - 4(\rho\phi)_p^n + (\rho\phi)_p^{n-1}\right) \tag{108}$$

Considerando as aproximações 74, 91, 105 e 108, substituindo na equação 61 e dividindo por Δt, chega-se à,

$$\begin{aligned}&\frac{V_P}{2\Delta t}\left(3(\rho\phi)_P^{n+1}-4(\rho\phi)_P^{n}+(\rho\phi)_P^{n-1}\right)+\left(\sum_{j=viz(P)}^{Nviz}\Phi_{Pj}^{FOU}+\sum_{j=viz(P)}^{Nviz}S_{Pj}^{DC}\right)^{n+1}\\&=\left(\sum_{j=viz(P)}^{Nviz}D_{Pj}\left(\phi_j-\phi_P\right)+\sum_{j=viz(P)}^{Nviz}S_{Pj}^{CD}\right)^{n+1}+V_P S_U\end{aligned} \tag{109}$$

O sistema de equaçōes é dado por,

$$a_P\phi_P=\sum_{j=viz(P)}^{Nviz}\left(a_{viz}\phi_{viz}\right)+b_P \tag{110}$$

onde,

$$a_P=\frac{3}{2\Delta t}V_P\rho_P^{n+1}+\left(\sum_{j=viz(P)}^{Niz}\max\left(F_{Pj},0\right)+\sum_{j=viz(P)}^{Nviz}D_{Pj}\right)^{n+1} \tag{111}$$

$$a_{viz}=\left(D_{Pviz}-\min\left(F_{Pviz},0\right)\right)^{n+1} \tag{112}$$

$$e \tag{113}$$

$$b_P=\frac{2}{\Delta t}V_P(\rho\phi)_P^{n}+\frac{1}{2\Delta t}V_P(\rho\phi)_P^{n-1}+(\bar{S})_P V_P+\left(\sum_{j=viz(P)}^{Nviz}S_{Pj}^{CD}-\sum_{j=viz(P)}^{N\ \mathrm{Niz}}S_{Pj}^{DC}\right)^{n+1} \tag{114}$$

O último termo da equação 114 corresponde às correções de não ortogonalidades e de ordem superior do método upwind ($CD-$ cross difusion; $DC-$ deferred corretion). Estes termos foram avaliados utilizando os valores do último nivel do processo iterativo.

1.4.1.6 Reconstrução de gradiente

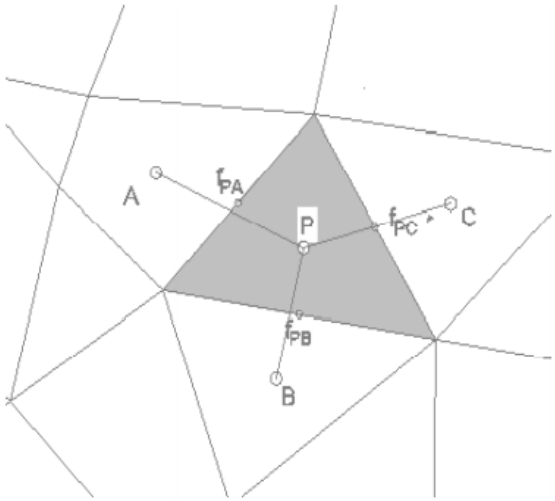
A reconstrução de gradiente de uma grandeza escalar ϕ conhecida é uma etapa importante do método numérico desenvolvido. O gradiente pode ser obtido através do método Green-Gauss,

$$\nabla\phi\approx\frac{1}{V_\Omega}\int_{\partial\Omega}\phi\mathbf{n}dS \tag{115}$$

A equação acima considera que ϕ apresenta uma variação linear nas proximidades do ponto P utilizando o próprio volume da Figura 10 pode-se aproximar a integral de superfície como,

$$\nabla\phi_P^c\approx\frac{1}{V_P}\sum_{f=viz(P)}^{Nviz}\phi_{pf}\mathbf{S}_{\mathrm{Pf}} \tag{116}$$

Figura 10 - Reconstrução de gradiente Green-Gauss com base no volume de controle.



Fonte: Andrade (2014)

onde ϕ_{Pf} é o valor da grandeza na face, a interpolação é dada novamente por,

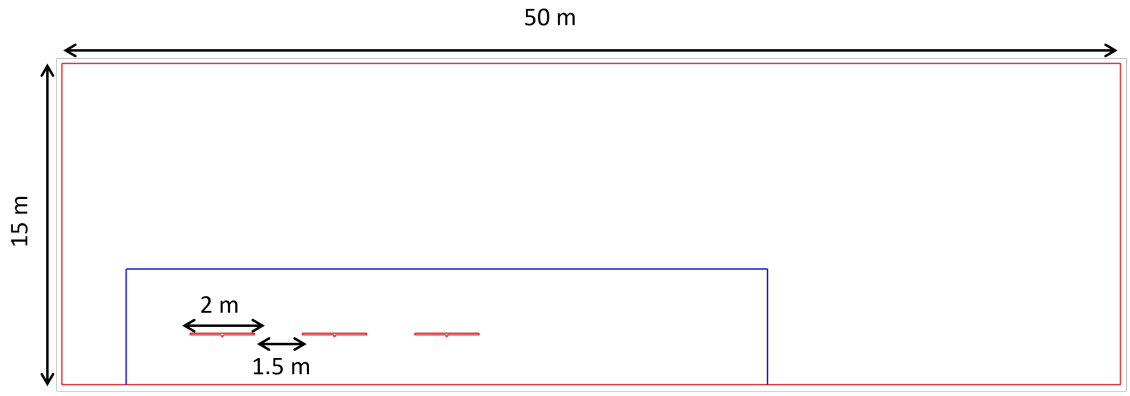
$$\phi_{Pf} = f_f \phi_P + (1 - f_f)\, \phi_f \tag{117}$$

1.5 **Metodologia**

Com o intuito de estudar a influência do vento nas estruturas de seguidores solares, foram criados utilizando o software Ansys SpaceClaim 2024 R1, dois casos 2D simplificados. Esta abordagem foi considerada suficiente uma vez que condições críticas de carga, conforme apresentado anteriormente por Shademan R.M. Barron e Hangan (2014), ocorrem quando o vento direto atinge a estrutura do seguidor. Estes dois modelos foram criados representando a diferença de inclinação do terreno, um representando um terreno plano e o outro um terreno inclinado. Compreende-se a existência de efeitos de borda, mas estes serão desconsiderados no presente estudo, uma vez que demandaria uma abordagem tridimensional do problema.

Ambas as geometrias foram discretizadas em uma malha de volumes finitos utilizando a ferramenta Ansys Meshing 2024 R1, seguindo as melhores práticas para atingir qualidade e tamanho de malha adequados segundo o método do índice de convergência de malha (do inglês Grid Convergence Index - GCI), conforme apresentado em (ROACHE, 1998), para avaliação dessa convergência. Após a conclusão do processo de geração de

Figura 11 - Geometria usada para análise do terreno plano



malha, as condições de contorno e as hipóteses foram definidas no software Ansys Fluent versão 2024 R1 para que as equações de dinâmica de fluidos sejam resolvidas. Nas subseções seguintes cada etapa do processo descrito acima será detalhada.

1.5.1 Geometria

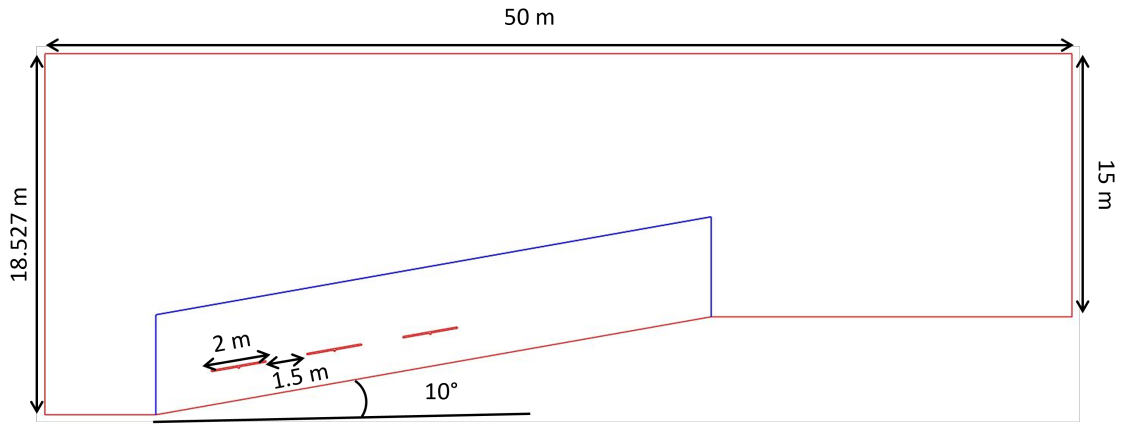
Conforme citado anteriormente, o software Ansys SpaceClaim 2024 R1 foi utilizado para criar duas geometrias para o presente estudo, uma representando um terreno plano e uma representando um terreno inclinado, ambos com três linhas de seguidores representadas no interior de seus domínios.

O domínio com Superfície Plana conforme mostrado na Fig. (11) consiste em um domínio retangular com dimensões definidas em $Altura = 15m$ e $Largura = 50m$. Dentro desta área, 3 fileiras simplificadas de seguidores solares foram representadas com corda de $2m$, altura de $0,05m$ cada e uma distância de $1,5m$ do fim do seguidor da fileira anterior até o início do seguidor da linha seguinte e $1,6m$ da borda superior dos painéis até o chão.

Quanto ao terreno inclinado observado na Fig. (12), o domínio foi gerado com as dimensões de $Altura1 = 18,527m$ à montante do terreno inclinado, $Largura = 50m$, uma inclinação de $10graus$ do terreno, e $Altura2 = 15m$ à jusante do terreno inclinado. As linhas do seguidor seguem a mesma configuração aplicada no domínio anterior em relação à proporção e espaçamento entre linhas, mas neste domínio os rastreadores seguem a linha do solo, ou seja, quando paralelos ao solo, eles estão inclinados 10 graus em relação ao referencial global.

Nesta etapa da configuração o ângulo de inclinação da primeira fileira de seguidores em relação ao solo foi definido como parâmetro a ser variado para estudar o efeito de proteção que a primeira fileira teria sobre as demais fileiras. Foram definidos para este estudo ângulos de 10°, 20°, 30°, 40° e 45° para ambos os lados, além do ângulo de 0°

Figura 12 - Geometria usada para análise do terreno inclinado



representando o seguidor paralelo ao solo. Tal configuração permite que as definições de geometria, malha e solução sejam replicadas para cada ângulo de inclinação de forma automatizada.

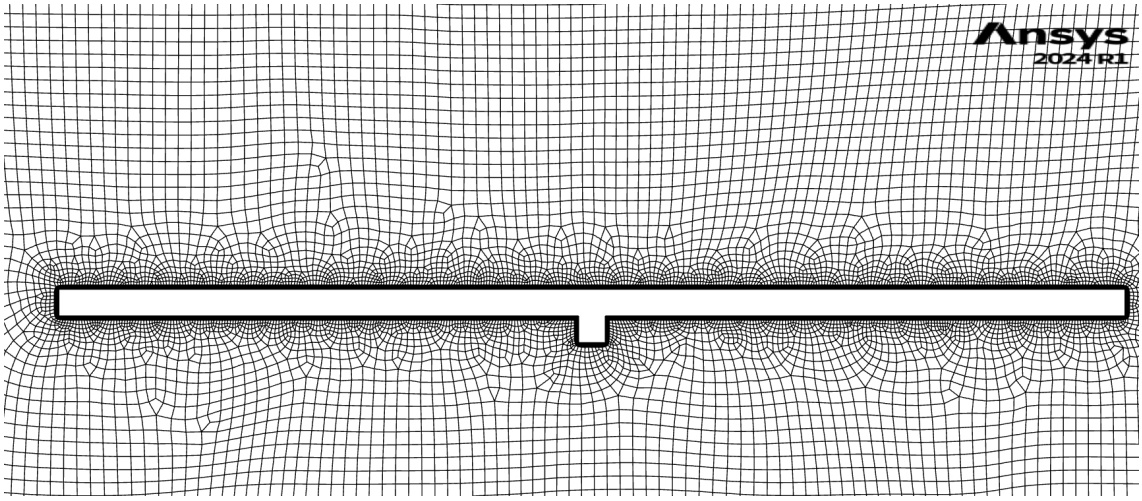
1.5.2 Malha Computacional

Para resolver numericamente as equações do escoamento, cada domínio deve ser discretizado em volumes de controle nos quais estas equações serão resolvidas, a estes volumes de controle chamamos elementos e o conjunto destes elementos formam a malha computacional. Para a geração da malha computacional, foi utilizado o software Ansys Meshing 2024 R1, dadas as suas capacidades de manipular malhas bidimensionais. As malhas do terreno plano e do terreno inclinado, atingiram 722462 e 734843 nós respectivamente, sendo definidas com elementos quadriláteros e triangulares com espaçamento médio de $4mm$ entre elementos para cada malha.

Estudos realizados sobre geometrias bidimensionais, normalmente são realizados utilizando malhas estruturadas, definindo-se bem os limites das malhas e o tamanho ou quantidade de elementos em cada extremidade, gerando uma malha uniforme e bem distribuída. Neste estudo, no entanto, foi utilizada uma malha não-estruturada. Esta metodologia foi escolhida, pois a rotação da primeira fileira de seguidores faz com que configuração de malhas estruturadas para este caso necessitassem de tratamento individual para cada ângulo o que impediria a automatização do processo de geração de malha e solução.

Como forma de resolver adequadamente o comportamento da camada limite dinâmica do escoamento, foram definidos nas regiões de parede, elementos quadriláteros específicos com razão de aspecto mais elevada. Foram configurados 20 elementos desta maneira nas direções normais às paredes conforme observado na Fig. (13). Estes elementos são acha-

Figura 13 - Detalhe das camadas de prisma para o seguidor solar



tados e alongados, ou seja tem a dimensão normal às paredes nas quais foram aplicados consideravelmente menores do que a dimensão tangencial a essas paredes, uma vez que o perfil da velocidade dentro da camada limite do escoamento varia consideravelmente na direção normal e muito pouco na direção tangencial. Ou seja, como estes elementos tem pouca altura, podemos empilhar diversos elementos dentro da espessura da camada limite, incluindo mais pontos de integração e conseguindo dessa forma capturar essa variação.

Para quantificar a resolução deste comportamento, define-se a variável conhecida como y^+ que representa a altura adimensional do primeiro elemento de malha a partir das paredes. Esta variável está diretamente relacionada ao correto cálculo dos perfis de velocidade da camada limite, uma vez que ajuda a dimensionar a quantidade de elementos dentro da subcamada viscosa, região de grande interesse dentro da camada limite. Para calcular os fenômenos que ocorrem dentro da camada limite, deve-se buscar atingir um valor ideal de $y^+ = 1$, onde o y^+ é definido como na equação 118.

$$y^+ = \frac{yu_t}{\nu} \tag{118}$$

Nesta equação, y é a altura do centro de gravidade do primeiro elemento de malha, u_t é a velocidade friccional ou velocidade de atrito, e o ν a viscosidade dinâmica do fluido. Para este estudo foram atingidos valores limite de $y^+ = 2,3$ nas quinas do bordo de ataque da primeira fileira de seguidores do plano inclinado a 0 graus, e valores máximos de $y^+ = 1,3$ nas demais condições e posições das superfícies dos seguidores.

A malha ao redor dos seguidores foi refinada visando resultados precisos nas regiões de esteira criadas pelo fluxo ao redor dos obstáculos, essas regiões estão representadas na Fig. (11) e Fig. (12) como as regiões ao redor dos seguidores destacadas com linhas azuis. O fenômeno de esteira é amplamente conhecido em escoamentos externos, este gera uma

região de altos gradientes de pressão e velocidade demandando um maior refino para uma resolução precisa dos fenômenos ali localizados.

Para obtenção de resultados consistentes foram realizados testes de convergência de malha segundo o método GCI (Grid Convergence Index) conforme proposto por Roache (1998), levando em consideração o coeficiente da força atuante na direção X. Para o cálculo do GCI é utilizada a equação 119:

$$GCI = \frac{F_s|\epsilon|}{r^p - 1} \tag{119}$$

onde F_s é o fator de segurança, ϵ é o erro relativo, r é a razão entre os tamanhos das malhas, p é a ordem de convergência. A seguir serão detalhados cada um destes componentes.

O fator de segurança F_s, é utilizado para adequar o cálculo do GCI para diferentes situações, onde podem ter sido utilizadas duas, três ou mais malhas para esta estimativa. Para estimativas com duas malhas, utiliza-se o $F_s = 3,0$, uma vez que o teste de convergência de malha feito com 2 malhas apenas pode mascarar a real variação do resultado. Para três ou mais malhas, utiliza-se o $F_s = 1,25$, como neste caso foram utilizadas 3 malhas para o estudo de independência de malha, este será o valor utilizado.

O erro relativo ϵ é calculado com base na variação dos resultados frente ao refinamento de malha conforme a equação 120, nesta avaliação do refino da malha, foram alcançados resultados da ordem de no máximo $1,7\%$ de erro relativo.

$$\epsilon = \frac{|f2 - f1|}{f1} \tag{120}$$

A razão de refinamento r é normalmente calculada de acordo com o espaçamento da malha para uma malha estruturada, sendo a razão direta entre os espaçamentos $r = \frac{h_2}{h_1}$, com h_2 sendo o espaçamento da malha menos refinada e h_1 o espaçamento da malha mais refinada. Ao trabalhar com malhas não estruturadas, utiliza-se a formulação apresentada na equação 121, que relaciona o número de nós ao invés do espeçamento, uma vez que este espaçamento pode variar em uma malha não estruturada.

$$r = \left(\frac{N1}{N2}\right)^{\frac{1}{D}} \tag{121}$$

Nesta formulação $N1$ faz referência a quantidade de nós da malha mais refinada, $N2$ à quantidade de nós da malha menos refinada, e o parâmetro D é aplicado para unificar a abordagem independente da dimensão do problema, sendo usado $D = 1$ para

Tabela 1 - Malhas utilizadas no GCI para o caso horizontal

Nível de refino	Número de nós	Coeficiente da Força X
1	722462	46,737
2	481597	47,559
3	145214	52,378

problemas unidimensionais, $D = 2$ para bidimensionais ou $D = 3$ para tridimensionais.

A ordem de convergência p pode ser estimada a partir dos resultados obtidos para cada nível de refino a partir da equação 122:

$$p = \frac{\left(\ln \frac{f3-f2}{f2-f1}\right)}{\ln r} \tag{122}$$

onde $f3$, $f2$ e $f1$ são os resultados obtidos para a variável avaliada nas malhas mais grossa, intermediária e mais refinada, respectivamente. E o r é a razão de refinamento já previamente calculada. Vale ressaltar que, ainda que não sejam utilizadas razões de refinamento equivalentes para cada patamar de refino o valor de r^p, se mantém constante, desde que o p seja aplicado ao r que foi utilizado em seu cálculo.

Após calcular todos estes fatores, retorna-se então à equação 119 para calcular o GCI de cada mudança de patamar de refinos, chamados GCI_{32} e GCI_{21} fazendo referência a cada mudança de patamar, da mais grosseira para a intermediária e da intermediária para a mais refinada.

Para averiguar se os refinos estão dentro do aceitável deve-se utilizar a relação apresentada na equação 119, onde espera-se que a fração se aproxime de 1, confirmando os resultados dentro de um intervalo aceitável de refino, recomendando-se utilizar a malha de maior refino do teste.

$$\frac{GCI_{32}}{r^p GCI_{21}} \approx 1 \tag{123}$$

Desta forma, no presente estudo foram utilizadas 3 malhas para os testes de convergência de malha de cada caso. Resultando nos números apresentados nas tabelas 1 e 2.

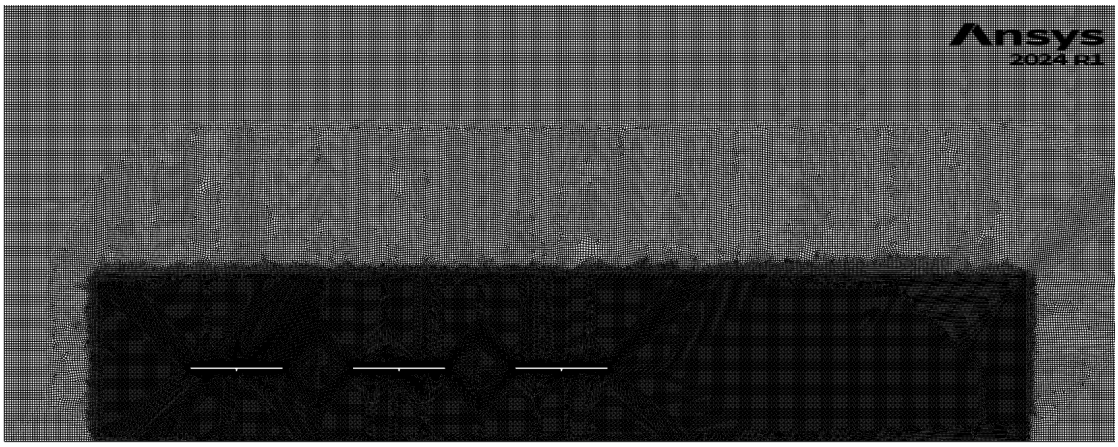
Utilizando as características apresentadas na tabela 1 para o cálculo do GCI do caso plano, foi obtido o índice de 0,9827 que é aproximadamente 1, sendo considerado suficiente para este estudo.

Da mesma forma, sendo utilizadas as características descritas na tabela 2 para o cálculo do GCI do caso inclinado. O índice de 0,9957 foi obtido e assim como no caso

Tabela 2 - Malhas utilizadas no GCI para o caso inclinado

Nivel de refino	Número de nós	Coeficiente da Força X
1	734843	139,076
2	496785	139,678
3	144063	165,229

Figura 14 - Malha gerada para o domínio plano



horizontal foi considerado suficiente o refinamento da malha fina.

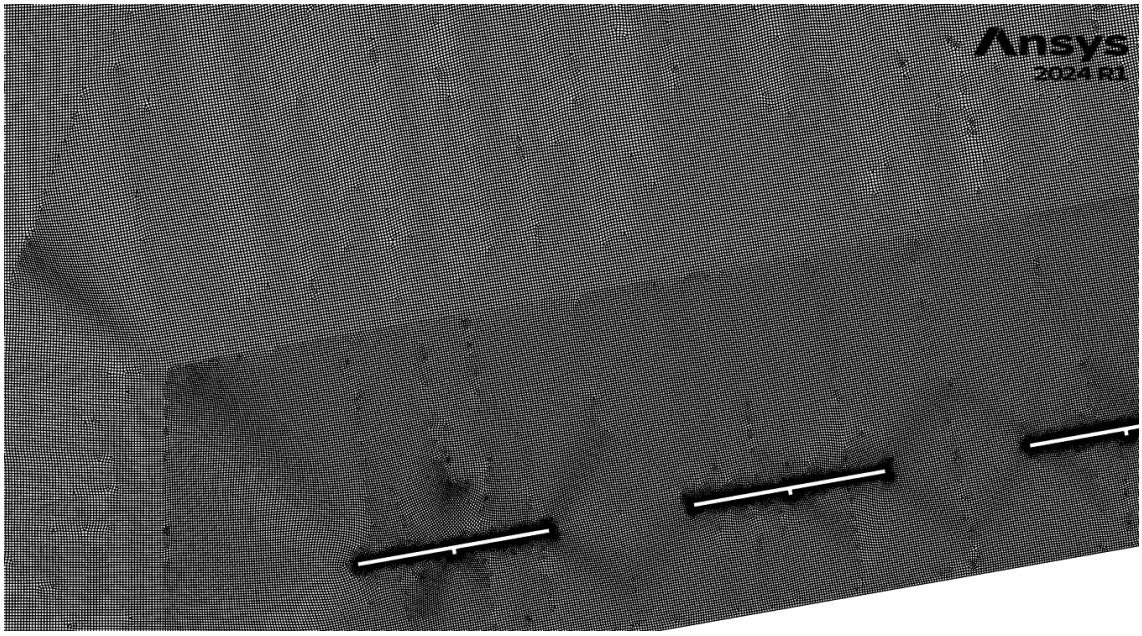
Após esta etapa, seguindo as características previamente apresentadas, foram obtidas as malhas conforme pode-se observar nas Fig.(14) e Fig.(15). Nelas observam-se os três níveis de refino de malha apontados anteriormente. A região geral, com um refino suficiente para resolver os escoamentos da região mais afastada, a região próxima dos seguidores, onde ocorrerão os fenômenos de maior interesse do estudo e as camadas de prisma onde serão resolvidos os efeitos de camada limite.

1.5.3 Hipóteses de Modelagem e Condições de Contorno

Uma vez concluída a etapa de malha, as hipóteses adotadas e as condições de contorno devem ser configuradas. Sendo a proposta do estudo uma comparação entre as situações, ambas as simulações precisam seguir as mesmas hipóteses. As premissas utilizadas no presente estudo para ambos os casos são enumeradas a seguir:

1. Escoamento em regime permanente,
2. Transferência de calor: Não foi considerada,
3. Fluido de trabalho: Ar modelado como incompressível (Massa específica constante

Figura 15 - Recorte da malha gerada para o terreno inclinado



igual a $1,225 kg/m^3$),

4. Turbulência: Modelada segundo o modelo k-omega SST

5. Variação angular da primeira fileira de seguidores: de -45 à 45 graus variando 10 graus de 0 até 40 e 5 para chegar aos 45 graus

Tais hipóteses foram tomadas para que fossem consideradas apenas as condições mais relevantes para o estudo proposto. A condição de regime permanente, em especial, foi escolhida como hipótese simplificadora. Apesar dos ventos terem efeitos transientes nos seguidores no que tange ao modo de falha de instabilidade torcional, esta influência será medida neste estudo a partir do coeficiente de momento medido sobre cada painel.

O modelo de turbulência chamado k-ômega SST escolhido foi escolhido por trazer um compromisso com a solução da camada limite, tendo influência direta no cálculo dos coeficientes de forças e momentos atuantes sobre os seguidores, e a resolução do escoamento livre, atuante nas regiões mais afastadas das paredes que terão influência no reestabelecimento do escoamento após a esteira, influenciando a proteção especialmente do terceiro seguidor da linha. Para conseguir entregar esta resolução de ambas as naturezas, se utiliza de funções de mistura que combinam a atuação do modelo k-ômega tradicional na região próxima à parede e transicionam para o modelo k-épsilon ao se afastar da região de parede, conforme proposto por Menter (1994) e descrito de forma mais detalhada no Apêndice A.

A variação de angulações foi determinada de forma a ter uma amostragem tanto dos efeitos da posição de defesa (deixando o painel paralelo ao solo), quanto do efeito de

proteção gerado com a inclinação da primeira fileira de seguidores.

Com tais premissas alinhadas, as condições de contorno também foram definidas de forma similar como forma de validar a comparação entre os dois casos. As condições de contorno podem ser classificadas matematicamente em:

1. Primeiro tipo (Dirichlet) - Valor prescrito de uma variável em determinada posição no espaço
2. Segundo tipo (Neumann) - Valor prescrito da derivada e uma variável em determinada posição no espaço
3. Terceiro tipo (Robin) - Condição mista onde se definem para uma mesma condição de contorno tanto a variável como a derivada dentro de condições específicas.

Estas condições são aplicadas dentro do software atribuindo os valores das grandezas selecionadas às superfícies presentes no domínio gerado conforme descrito na Fig. (16) e na Fig. (17). Os valores e as grandezas aplicados a cada uma dessas superfícies são detalhadas abaixo:

1. Inlet - Fixada a velocidade de entrada de $30m/s$,
2. Topo - Configurada como abertura à pressão ambiente (Gauge Pressure = $0Pa$) permitindo entrada e saída de escoamento,
3. Outlet: Configurada como abertura à pressão ambiente (Gauge Pressure = $0Pa$) permitindo entrada e saída de escoamento,
4. Seguidores: Modelados como paredes sem deslizamento, fixando-se a velocidade $v = 0$ nas superfícies
5. Solo: Modelado como parede sem deslizamento, fixando-se a velocidade $v = 0$ nas superfícies

As condições acima resultam em um número de Reynolds de $Re = 4107522$, se o calculamos conforme a equação 124.

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \tag{124}$$

Onde ρ é a densidade do fluido, V é a velocidade de referência do escoamento, neste caso os $30m/s$, L o comprimento de referência, sendo utilizada a corda do trakcer com $L = 2m$ e a viscosidade do fluido $\mu = 1,7894e^{-5}kg/(ms)$.

Figura 16 - Disposição das condições de contorno na geometria do terreno plano

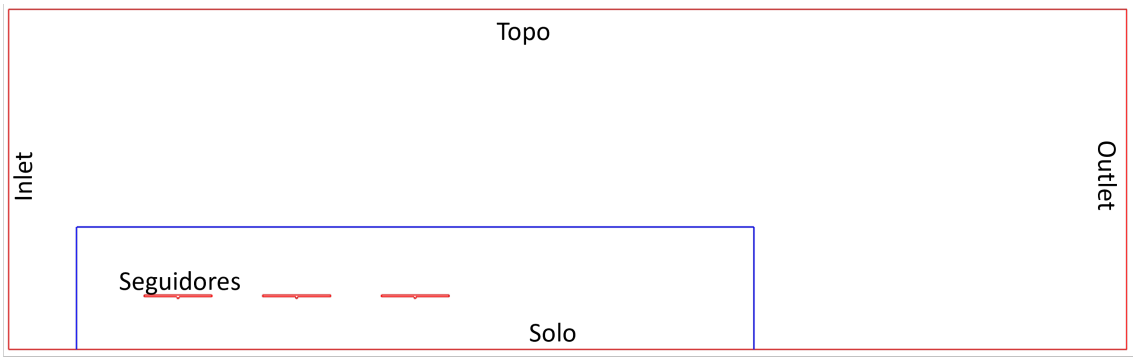


Figura 17 - Disposição das condições de contorno na geometria do terreno inclinado

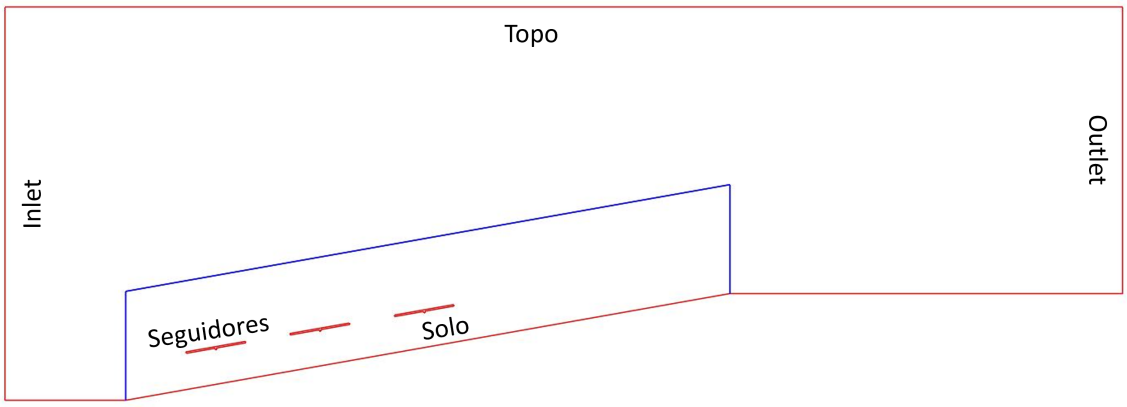


Tabela 3 - Esquemas de discretização utilizados

Equação	Discretização utilizada
Acoplamento Pressão-Velocidade	Coupled Incompressible Pressure based
Gradiente	Least Squares Cell Based
Pressão	Second Order
Momento	Second Order Upwind
Energia cinética turbulenta (k)	Second Order Upwind
Taxa de dissipação específica turbulenta (omega)	Second Order Upwind

Tabela 4 - Limites de convergência utilizados para os resíduos

Equação	Critério de convergência
Continuidade	1×10^{-4}
Velocidade - X	1×10^{-4}
Velocidade - Y	1×10^{-4}
Energia cinética turbulenta (k)	1×10^{-4}
Taxa de dissipação específica (omega)	1×10^{-4}

As condições de contorno de abertura foram colocadas para garantir um comportamento realista do escoamento, permitindo recirculações, por exemplo, no topo da geometria.

A condição de velocidade de $30m/s$ foi escolhida por ser levantada em estudos numéricos anteriores como uma velocidade crítica. Rajadas de vento atingindo tal escala são classificadas como vendavais, contando com um período de retorno de 10 a 20 anos de acordo com os levantamentos de Bautista (2002) e Sansigolo (2008) para a região de Piracicaba, no estado de São Paulo, por exemplo.

Tais condições de contorno foram simuladas em cada ângulo de inclinação do painel parametrizado durante a definição da geometria. Desta forma, os resultados e as principais características do sistema puderam ser avaliados varrendo todo o intervalo de ângulos de inclinação do primeiro painel.

Para a solução das equações, foram utilizados as configurações para discretização conforme apresentadas na tabela 3. Priorizando-se a utilização de discretizações de segunda ordem, buscando uma maior precisão se comparadas às alternativas de primeira ordem.

Foram utilizados como critérios de convergência a estabilização dos valores de referência do Coeficiente de força nas direções X e Y e do coeficiente de momento, além do critério de parada do software, com os resíduos calculados até o patamar de 1×10^{-4} conforme a tabela 4.

Para o cálculo dos resultados apresentados no próximo capítulo, foram utilizadas as configurações de Hardware e Software conforme apresentadas na tabela 5.

Tabela 5 - Hardware e Software utilizados no estudo

Item	Utilizado neste estudo
Processador	Intel Core i7-10700K CPU @ 3,80GHz
Memória	32 GB
Sistema operacional	Windows 10 Pro 64-bit
Software CAD	Ansys SpaceClaim
Software para Malha	Ansys Meshing
Software Solver	Ansys Fluent 2024 R1

2 RESULTADOS

Utilizando as configurações expostas no capítulo 1, foram realizadas as simulações de cada uma das condições para ambos os casos, utilizando 7 processadores. As informações gerais de tempo computacional se encontram na tabela 6.

Se tratando de um estudo da influência do escoamento sobre as estruturas em questão, as variáveis mais relevantes a serem avaliadas são as forças e momentos atuantes na estrutura. O efeito de proteção que a primeira linha de painéis oferece às demais linhas será avaliado através das variações destas grandezas de acordo com o ângulo de inclinação da primeira linha e com o terreno no qual está sendo avaliado. Para uma melhor compreensão dos resultados dos coeficientes de força em cada direção e momento em torno do eixo, é razoável uma avaliação prévia das variáveis que induzem tais efeitos na estrutura. Dessa forma serão avaliados primeiramente as distribuições de pressão e velocidade ao longo do domínio, permitindo a visualização prática dos efeitos posteriormente observados nos gráficos de coeficientes das forças.

Ao avaliar os resultados do terreno plano, as distribuições de pressão são semelhantes em todas as três linhas quando o primeiro seguidor está posicionado em ângulo de inclinação 0. Pode-se notar que são geradas pequenas zonas de baixa pressão nos limites do seguidor, uma vez que sua seção é retangular as pontas acabam gerando estas zonas de baixa pressão devido ao descolamento da camada limite. À medida que o painel começa a inclinar-se, num ângulo positivo ou negativo, é gerada uma zona de baixa pressão à jusante do painel por conta do bloqueio do escoamento vindo naquela direção, gerando uma recirculação localizada. A pressão sobre as fileiras subsequentes tende a diminuir e as regiões de baixa pressão nestas são atenuadas. Uma vez que o comportamento do escoamento que gera este efeito foi alterado, o padrão geral de pressão também muda. À medida que a primeira linha se inclina para ângulos mais altos, como visto para 45 graus na Fig. 18, os seguidores subsequentes ficam sujeitos à uma zona de baixa pressão gerada pela esteira e pelas recirculações.

Os resultados de velocidade e pressão estão profundamente interligados, os resultados de magnitude da velocidade apresentados na Fig. 19 reforçam as interpretações

Tabela 6 - Tempo computacional aproximado de cada caso

Etapa	Tempo
Terreno Plano: Malha	1 hora
Terreno Plano: Solver	2 horas
Terreno Inclinado: Malha	1 hora 45 minutos
Terreno Inclinado: Solver	2 horas 30 minutos

Figura 18 - Distribuição da pressão no domínio plano de acordo com o ângulo de inclinação do primeiro painel

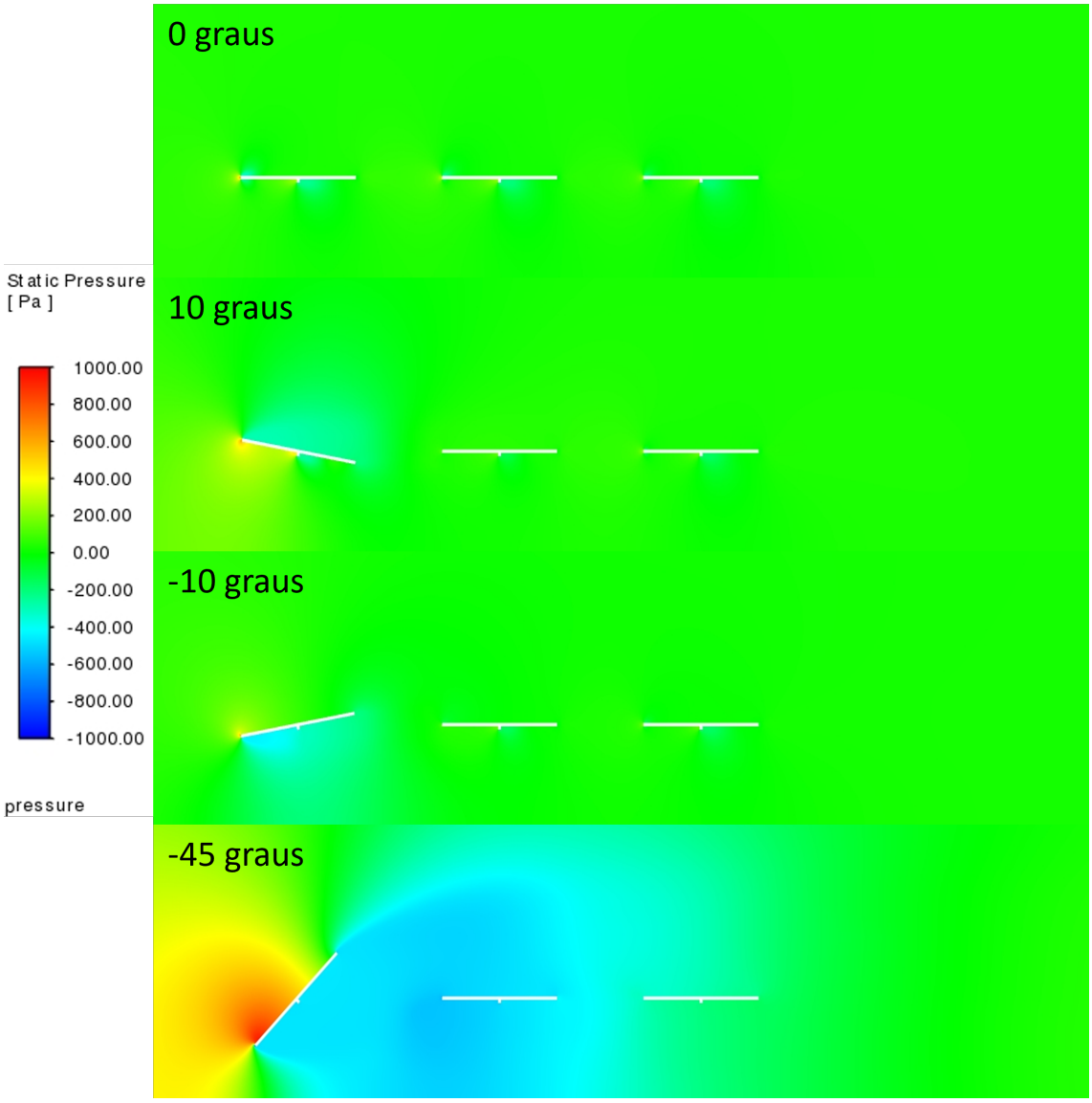


Figura 19 - Variação dos perfis de velocidade no domínio plano de acordo com o ângulo de inclinação do primeiro seguidor

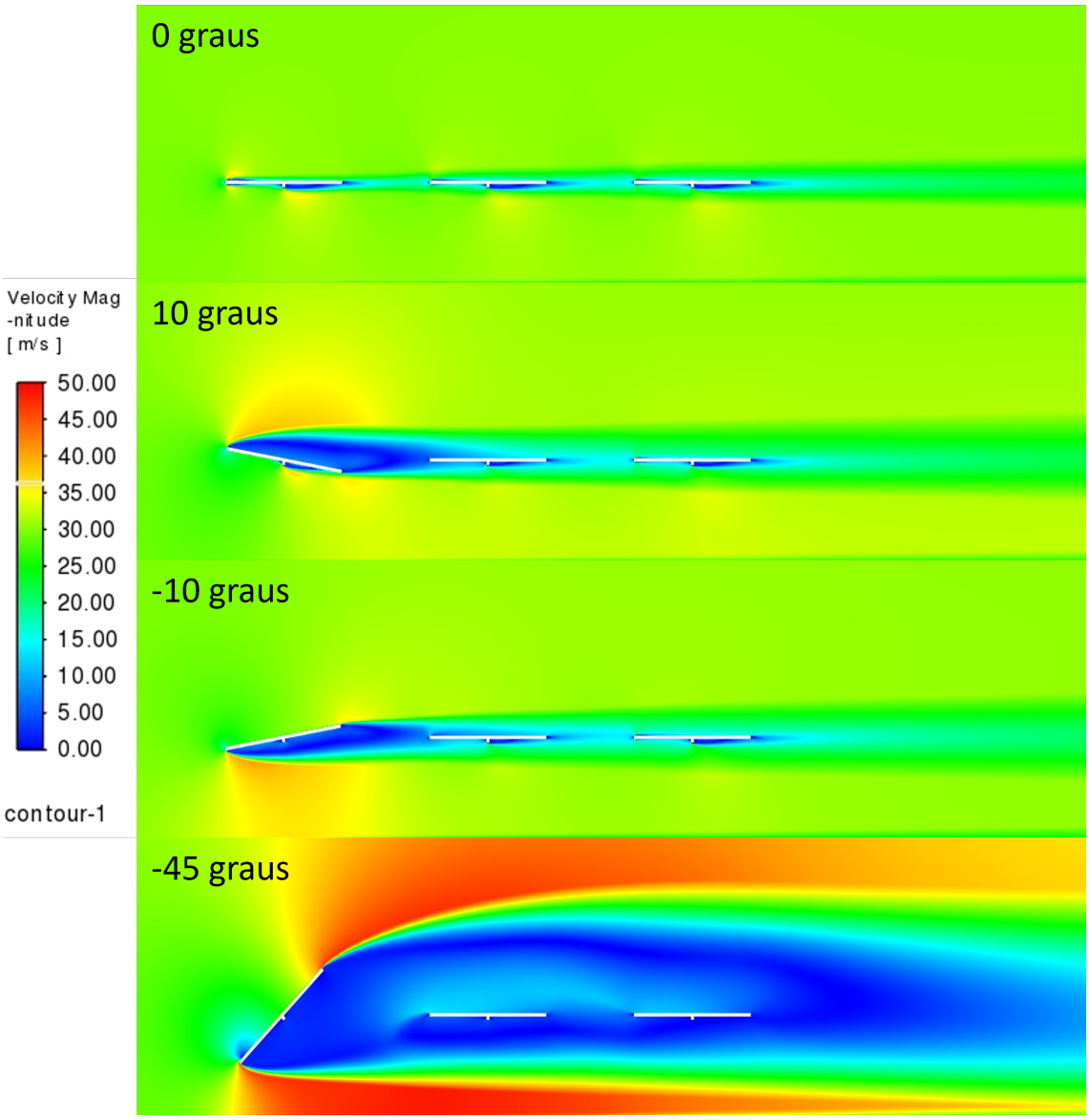
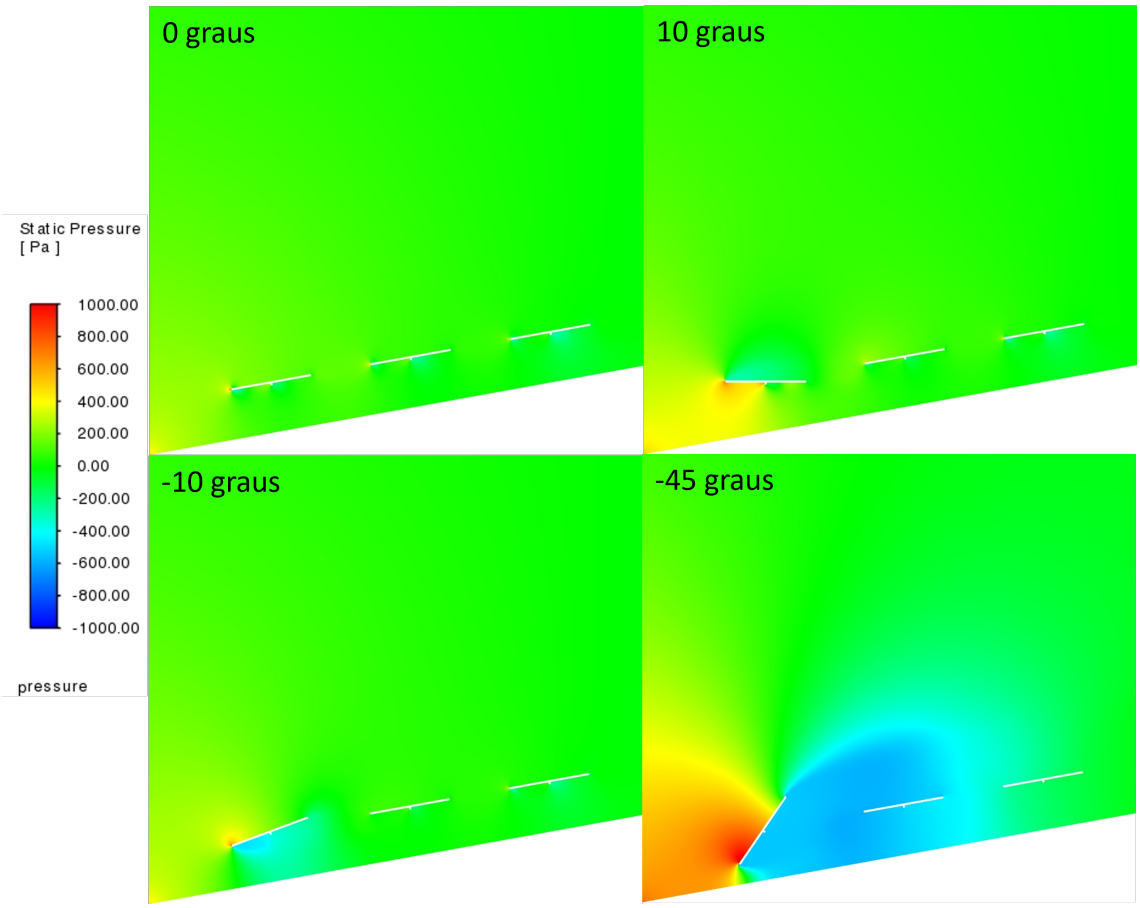


Figura 20 - Distribuição da pressão para terreno inclinado de acordo com o ângulo de inclinação do primeiro painel



apresentadas para a distribuição de pressão observadas previamente.

Numa inclinação de 0 graus, por exemplo, o descolamento da camada limite do escoamento logo no contato com o seguidor solar gera recirculações que induzem as zonas de baixa pressão observadas nas quinas e à jusante do eixo de rotação do seguidor. O escoamento neste ângulo atinge a segunda e terceira fileiras quase da mesma forma que atinge a primeira, induzindo desta forma uma distribuição de pressão resultante semelhante em todas as três fileiras de painéis. À medida que o primeiro painel se inclina, ele começa a proteger as fileiras subsequentes das rajadas de vento gerando a região de esteira, percebida pela zona de baixas velocidades à jusante do primeiro seguidor solar. A esteira, por sua vez, reduz as velocidades que alcançam os seguidores subsequentes em especial a segunda fileira, que desde menores angulações já é englobada pela zona de baixas velocidades. Este efeito aumenta sua relevância com ângulos mais altos, como 45 graus, onde a região da esteira cobre completamente ambos os seguidores subsequentes, protegendo-os das rajadas de vento e remetendo à zona de baixa pressão vista na Fig 18.

Ao considerar os resultados do solo inclinados, a distribuição geral de pressão apresentada na Fig. 20 é semelhante àquela observada na Fig. 18 especialmente para os

ângulos mais altos, pois o efeito de proteção aparece mais uma vez. Embora a distribuição geral seja semelhante, a magnitude da pressão envolvida difere e esta diferença terá impacto nas forças e momentos gerados. Quando a primeira fileira está paralela ao solo, há um leve desbalanço da distribuição de pressões ao redor do primeiro painel, que se ameniza nos painéis subsequentes. Com o aumento da inclinação da primeira fila os perfis tendem a se assemelhar aos observados no que tange a posição do pico de pressão, entretanto nos resultados do terreno inclinado as regiões de pico de pressão são mais distribuídas, isto se dá parte pelo efeito que a mudança de direção geral do escoamento está sofrendo, e parte pela inclinação imposta pelo próprio ângulo do terreno sobre os seguidores.

Os perfis de velocidade observados na Fig. 21 também seguem padrões de forma geral semelhantes aos observados no terreno plano. Quando o primeiro painel está paralelo ao solo se observa de forma geral um perfil de velocidades similar chegando a cada um dos painéis, à medida que os painéis vão aumentando os ângulos de incidência tende a se formar uma região de esteira, conforme visto também no terreno plano.

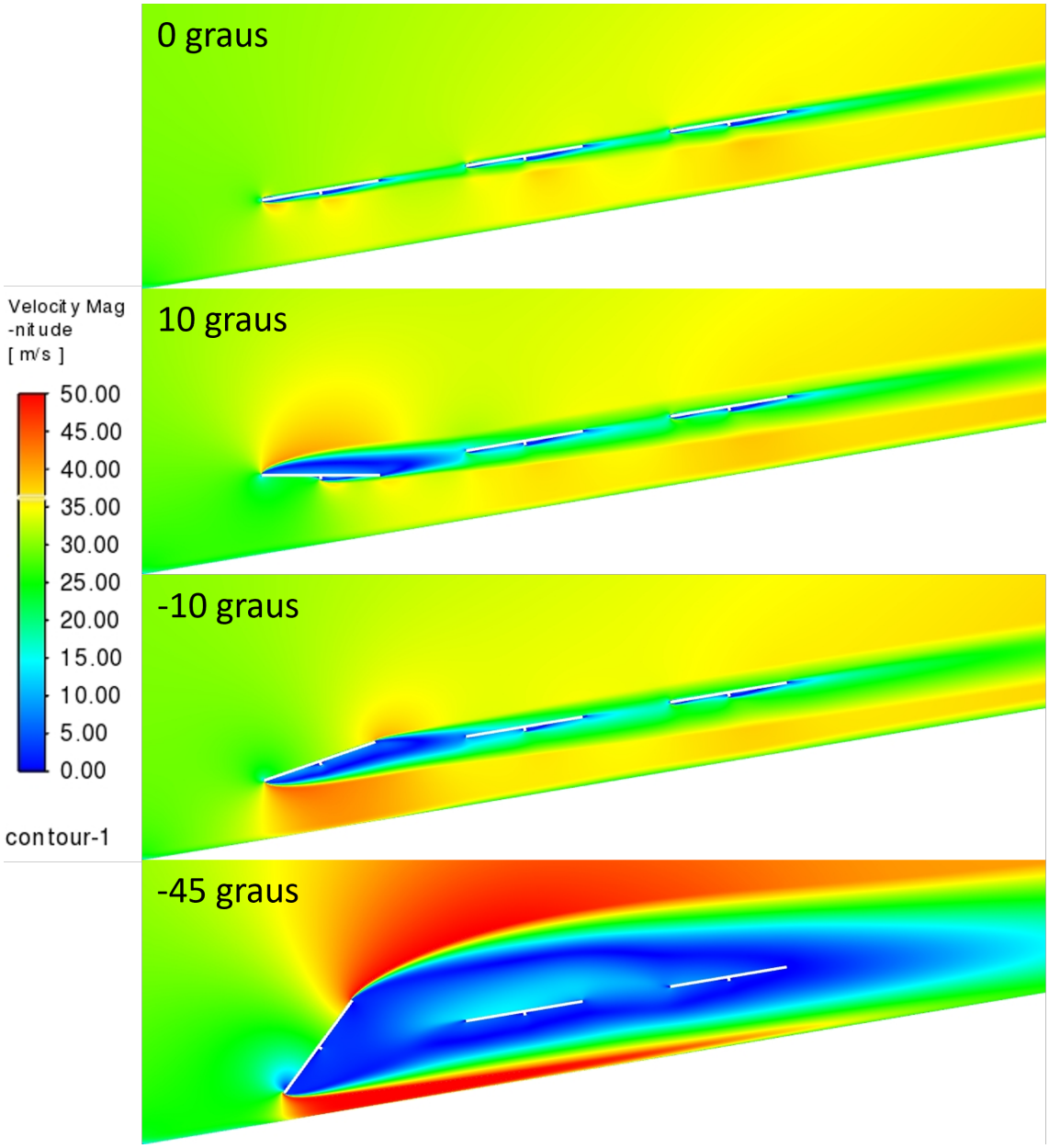
O comportamento do escoamento no entorno dos painéis subsequentes, entretanto, apresenta sutis diferenças que se mostrarão cruciais para a alteração do comportamento. Estas diferenças são, o descolamento da camada limite na superfície superior do tracker e o posicionamento da esteira. O descolamento da camada limite na superfície superior dos painéis é consideravelmente amenizado e a camada limite tende a se formar novamente com maior facilidade.

A formação da região de esteira se dá em um posicionamento diferente, no solo inclinado a esteira tende a ser projetada para o solo, resultando em uma espessura de região de esteira acima dos trackers subsequentes inferior à espessura da esteira abaixo destes seguidores. Este comportamento pode gerar uma alteração no comportamento das forças atuantes sobre o painel.

Com o avanço da angulação da primeiro fileira, o efeito de proteção começa a atuar, uma vez que a região de esteira começa a se formar. É notável, no entanto, que a proteção é menos eficaz de forma geral por conta dos comportamentos previamente descritos. Estes comportamentos tendem a formar a esteira em uma posição diferente do que é observado no terreno plano, assim deixando os painéis subsequentes com a cobertura da esteira comprometida, fazendo com que estes estejam mais suscetíveis aos efeitos das rajadas de vento. Outro efeito perceptível é a efetividade reduzida desta proteção para a terceira fileira, quando comparado à segunda, uma vez que tende a ficar mais exposta e necessitar de ângulos maiores para ser incluída na região de esteira. No caso da presença de mais linhas, estas não seriam muito afetadas pela proteção ou se o espaçamento entre linhas fosse maior, até mesmo a terceira linha poderia ser completamente afetada pelo escoamento livre, uma vez que a extensão da região de esteira poderia não ser suficiente para englobá-la.

Nos gráficos apresentados da Fig. 22 até a Fig. 28 são apresentadas as comparações

Figura 21 - Variação dos perfis de velocidade no terreno inclinado de acordo com o ângulo de inclinação do primeiro seguidor



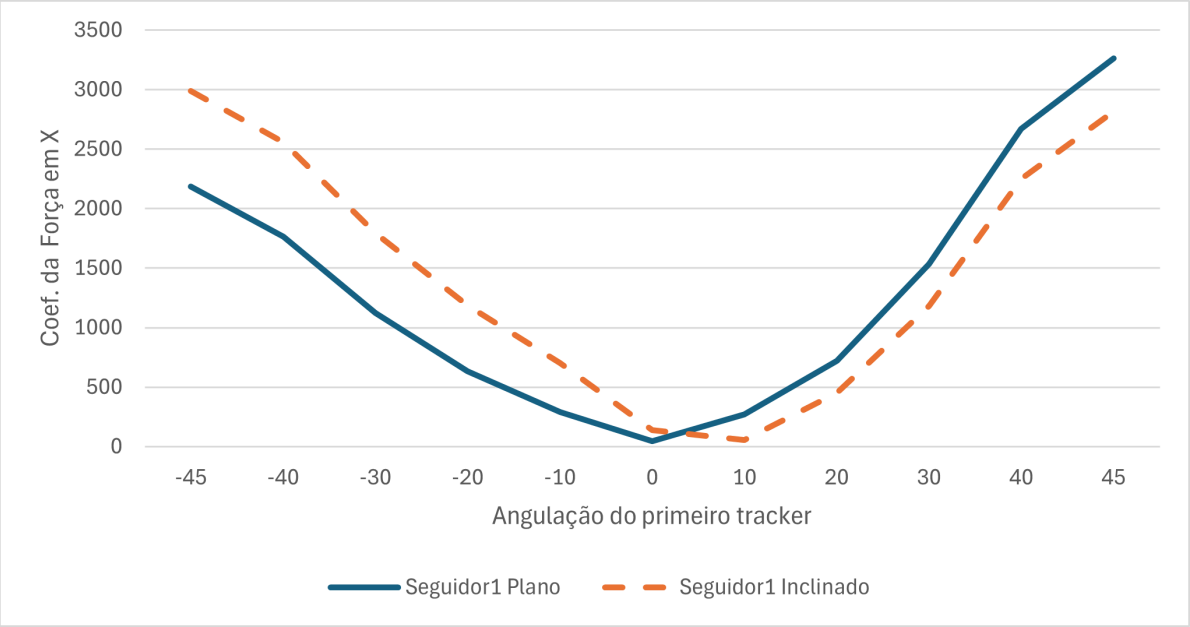


Figura 22 - Coeficiente da força na direção X sobre a primeira fileira (N) versus Ângulo de inclinação da primeira fileira (graus)

entre os coeficientes das forças e coeficiente de momento atuantes nos painéis, seguindo a distribuição de acordo com a ordem de grandeza das variáveis.

Como a ordem de grandeza dos esforços atuantes nas primeiras linhas são consideravelmente superiores aos esforços atuantes nas linhas subsequentes, estes serão apresentados em gráficos separados das demais fileiras. Os dados levantados para traçar os gráficos podem ser observados nas tabelas 7, 8, 9, 10, 11, 12. Para facilitar a leitura dos gráficos e as análises comparativas, foram definidas as linhas contínuas como referentes aos seguidores montados sobre o terreno plano, e as linhas tracejadas fazendo referência aos seguidores montados no terreno inclinado.

Os coeficientes das forças são calculados a partir da divisão das forças, pela equação $\frac{1}{2}\rho\nu^2 A$. Onde para as variáveis ρ, ν e A foram usados valores de referência, sendo ρ a densidade do fluido, ν a viscosidade do fluido e $A = 1m^2$ a área de referência.

Os gráficos dos coeficientes de força apresentados na Fig. 22, bem como os valores apresentados na tabela 7, trazem a comparação dos coeficientes das forças no eixo X atuantes sobre a primeira linha em ambos os terrenos. Entre os dois primeiros painéis observa-se um comportamento de deslocamento do gráfico. O comportamento geral do coeficiente é similar com uma distância de 10 graus, equivalente à inclinação do terreno que é naturalmente repassada ao tracker, uma vez que a posição inicial considerado angulo zero deste é paralelo ao solo. Apesar do comportamento geral induzir a esta ideia de uma translação simples do gráfico, observa-se também uma maior magnitude geral destes coeficientes atuantes sobre o seguidor montado sobre o plano inclinado. Ao comparar,

Tabela 7 - Dados de coeficiente de força na direção X para o primeiro seguidor

Angulação	S1 Plano	S1 Inclinado
-45	2186,9419	2986,7506
-40	1762,3787	2555,3541
-30	1120,7764	1792,1512
-20	634,6327	1186,0472
-10	290,08441	700,83319
0	46,580945	138,14081
10	270,23284	55,263645
20	719,27698	451,09825
30	1532,5131	1180,1454
40	2670,0176	2247,1367
45	3264,6655	2817,7977

Tabela 8 - Dados de coeficiente de força na direção X para o segundo e terceiro seguidores

Angulação	S2 Plano	S2 Inclinado	S3 Plano	S3 Inclinado
-45	-19,347445	-56,484316	-17,744079	-49,431668
-40	-20,63018	-78,622434	-15,245117	-21,184557
-30	-24,731171	-107,06449	-5,2654882	67,422335
-20	-18,40761	-17,809899	15,751781	102,49035
-10	14,379821	61,656855	20,297791	90,598627
0	27,829662	95,554619	24,319954	91,603586
10	14,201937	119,44801	23,329585	103,17951
20	-27,954963	32,168592	14,733629	116,45329
30	-29,548475	-48,188692	-14,994563	64,048122
40	-20,873615	-32,741997	-25,438138	-42,534817
45	-19,084468	-23,057811	-24,544715	-70,672327

por exemplo, valores do terreno horizontal em 20° e do terreno inclinado a 10°, valores que considerando a translação de 10° seriam equivalentes, estes se provam distintos com o terreno inclinado demonstrando magnitudes superiores.

Os valores sempre positivos para ambas as situações se explicam pelo fato de que a primeira fileira recebe diretamente a rajada de vento. Sendo exercida sobre a primeira fileira esforços na direção do escoamento. Estes esforços são mais brandos em angulações próximas à "posição de defesa"próxima aos 0° de inclinação, aumentando de acordo com o aumento da inclinação da primeira fileira. Este comportamento está diretamente ligado ao observado nos resultados de velocidade e principalmente de pressão vistos anteriormente nas figuras 18 , 19 , 20 e 21. Onde o aumento do ângulo do primeiro seguidor induzia zonas de alta e baixa pressão, distribuídas de forma a gerar forças de componente X positiva.

De forma similar o gráfico da Fig. 23 e a tabela 8 trazem a comparação dos coeficientes das forças no eixo X atuantes sobre as demais linhas, também em ambos

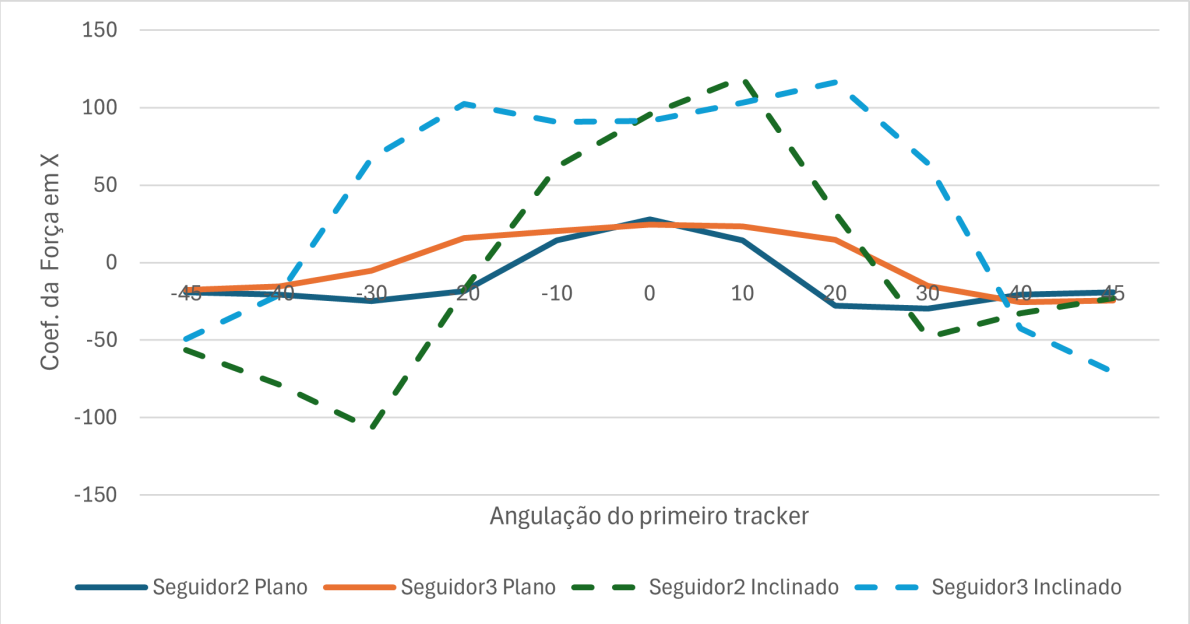


Figura 23 - Coeficiente das forças na direção X sobre as fileiras 2 e 3 (N) versus Ângulo de inclinação da primeira fileira (graus)

os terrenos. Neste gráfico observa-se uma influência mais acentuada do plano inclinado sobre as forças atuantes. Em ambas as linhas observa-se um aumento da magnitude destes coeficientes atuantes sobre os seguidores, apesar de manter um perfil geral similar ao se observar comparativamente os resultados de cada fileira com seu correspondente para o outro caso.

Na segunda fileira de trackers observa-se um aumento absoluto da magnitude dos coeficientes da força na direção X em ambos os sentidos, tanto as forças atuantes no X positivo quanto no negativo. Ao avaliar as forças atuantes sobre o segundo seguidor do terreno plano, é observado o efeito de proteção que a primeira fileira fornece começando a ser mais perceptível a partir de 10° de inclinação em ambas as direções. Desta angulação em diante, o seguidor está dentro da região de esteira formada e esta tende a protegê-lo, reduzindo as forças atuantes ou até mesmo gerando forças no sentido oposto por conta das recirculações. Ao observar os resultados do segundo tracker no plano inclinado no entanto, este efeito protetivo se apresenta de forma assimétrica, e tem seu maior efeito nos ângulos próximos a -20° e 25° onde zeram a força sobre o segundo painel. A partir destes valores de angulação do primeiro seguidor as recirculações geradas pela esteira e o campo de baixa pressão superam as forças atuantes no sentido positivo de X, revertendo o sentido da força atuante sobre a segunda fileira de seguidores.

Ao avaliar os resultados da terceira fileira por sua vez, ainda no gráfico da Fig. 23 e 8 observa-se que os seguidores necessitam de uma inclinação maior do primeiro painel para que a esteira possa protegê-los, quando comparado à segunda fileira, conforme espe-

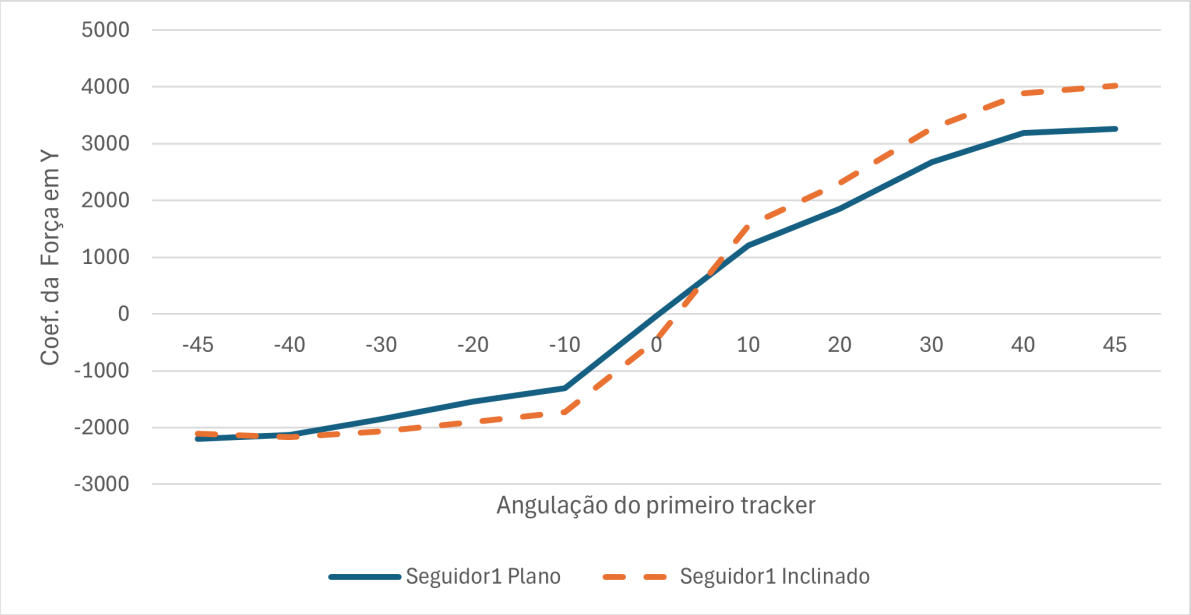


Figura 24 - Coeficiente da força na direção Y sobre a primeira fileira (N) versus Ângulo de inclinação da primeira fileira (graus)

rado dado que a esteira deve ter maior espessura para abarcar os trackers mais distantes. As forças atuantes sobre o terceiro seguidor do plano inclinado, dado este comportamento se mantém no sentido positivo de X até ângulos próximos aos 30° positivos e negativos, onde a partir deste ponto passam pela inversão de sentido sendo influenciadas fortemente pela zona de baixa pressão que aumenta sua área de influência nos ângulos mais elevados. Já os resultados do terreno inclinado, assim como visto anteriormente aumentam significativamente a magnitude dos esforços induzidos nos seguidores. O efeito de proteção ainda se faz presente, no entanto tem sua atuação atenuada, e só causa a inversão das forças atuantes sobre esta fileira de trackers a partir de ângulos no entorno dos -40° e 40°.

O gráfico da Fig. 24, bem como a tabela 9, comparam os coeficientes das forças no eixo Y induzidas pelo escoamento sobre a a primeira fileira de painéis de cada um dos dois casos de estudo. No caso dos esforços na direção Y observam-se comportamentos muito similares em ambos os casos. Pode-se observar que ao inclinar no sentido negativo, são concentrados os esforços sobre a parte superior do seguidor forçando na direção de Y negativo ou seja, em direção ao solo. Ao passar pela posição paralela ao solo há a inversão do sentido da força, gerando esforços na direção positiva do eixo Y, como no sentido de arrancar o seguidor do solo. No caso dos coeficientes das forças atuando no eixo Y sobre o primeiro seguidor, pode-se observar uma pequena diferença na maior parte das angulações no que tange a magnitude dos coeficientes.

A Figura 25 e a tabela 10, trazem as comparações dos coeficientes das forças no eixo Y atuantes nas linhas 2 e 3. Analisando-se os gráficos do segundo e terceiro seguidores no terreno horizontal, pode-se observar que, assim como para a primeira fileira,

Tabela 9 - Dados de coeficiente de força na direção Y para o primeiro seguidor

Angulação	S1 Plano	S1 Inclinado
-45	-2199,4458	-2111,9681
-40	-2127,3963	-2163,68
-30	-1851,2895	-2064,9458
-20	-1547,2492	-1905,8632
-10	-1309,5816	-1723,4096
0	-30,216488	-452,99614
10	1202,5157	1553,5243
20	1858,5471	2309,2066
30	2679,1644	3266,2861
40	3184,3528	3891,0997
45	3263,9863	4023,1037

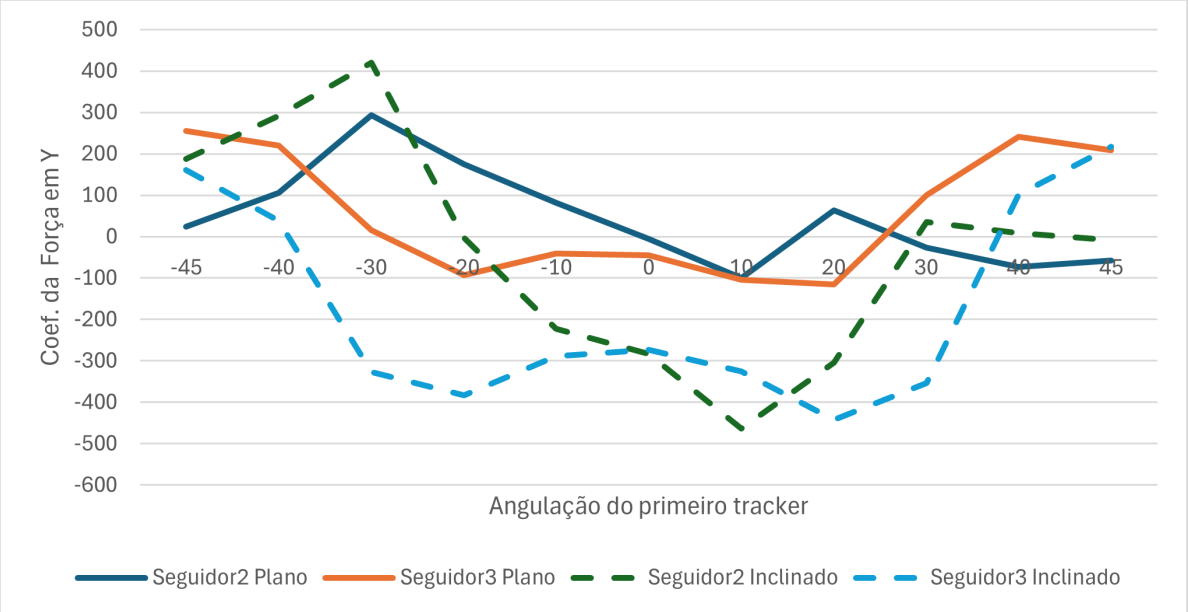


Figura 25 - Coeficiente das forças na direção Y sobre as fileiras 2 e 3 (N) versus Ângulo de inclinação da primeira fileira (graus)

Tabela 10 - Dados de coeficiente de força na direção Y para o segundo e terceiro seguidores

Angulação	S2 Plano	S2 Inclinado	S3 Plano	S3 Inclinado
-45	23,477975	187,42381	255,77536	161,31553
-40	105,1223	291,84108	220,55503	37,493167
-30	293,72858	419,49463	16,159777	-326,56631
-20	174,24603	-3,2939116	-93,0027	-383,26296
-10	81,299128	-221,92809	-40,417141	-288,93096
0	-5,6039141	-283,24104	-45,227151	-273,26231
10	-100,52077	-463,99687	-104,56271	-324,95841
20	62,880906	-304,89136	-115,78856	-441,82376
30	-27,058234	35,592513	100,708	-354,27333
40	-72,853267	9,0984903	240,50408	101,78607
45	-57,49475	-8,7437752	208,76521	216,51496

sem grandes alterações no comportamento do escoamento nos ângulos mais próximos do 0° as forças no eixo Y são de baixa magnitude ou até nulas, o perfil retangular do tracker de forma geral não induz um efeito de sustentação ou "downforce"no painel. Ao aumentar o ângulo no entanto, o descolamento da camada limite, a formação da esteira e as recirculações dessa região impõe uma alteração no escoamento que amplifica a magnitude dessas forças. Quando a atenção se volta para o segundo seguidor, se observa uma assimetria, diferente do que visto para a força em X, quando o ângulo é negativo, há um aumento considerável do coeficiente, já quando positivo, se vê uma alteração mais tímida na magnitude. Já a terceira fileira de trackers, demonstra um comportamento mais simétrico, este comportamento pode ser justificado justamente pela menor influência do efeito protetivo da esteira sob esta fileira mais distante.

Se este comportamento for comparado aos seguidores do plano inclinado, no entanto, pode-se notar que não há o mesmo comportamento no ângulo paralelo ao solo ou nos ângulos próximos do 0°. Nestes a força no sentido de Y negativo é de magnitude elevada, e tende se extinguir ou minimizar a intensidade em ângulos mais elevados. Este comportamento reitera a percepção de que o efeito protetivo é alterado ao tratar do plano inclinado, que por deslocar a região de esteira e modificar o próprio sentido do escoamento de forma geral, acaba alterando a dinâmica com que este se relaciona com os seguidores.

No segundo tracker, de ambas as análises, podemos ver a assimetria de forças previamente citada, quando comparamos as inclinações positivas e negativas da primeira fileira, como as recirculações geradas na esteira tem comportamentos distintos, estas forças resultantes também apresentam comportamentos consideravelmente distintos, trazendo as angulações negativas como amplificadoras das forças na direção positiva de Y gerada nos painéis enquanto as angulações positivas tendem a atenuar quaisquer efeitos de força na direção Y.

Avaliando o comportamento das forças da terceira fileira de cada caso, pode-se

Tabela 11 - Dados de Coeficiente de momento para o primeiro seguidor

Angulação	**S1 Plano**	**S1 Inclinado**
-45	543,60414	85,431061
-40	521,28562	148,07501
-30	451,87024	231,00015
-20	361,12259	271,17537
-10	326,38571	328,96424
0	-165,05112	75,971244
10	-360,36983	-464,08762
20	-458,18634	-578,34869
30	-490,26802	-703,4115
40	-446,15483	-809,06296
45	-392,69004	-839,32469

observar um perfil de flutuação similar, mas com magnitudes distintas. Enquanto para o plano horizontal as forças flutuam ao redor do valor de 0, nestas mesmas flutuações do plano inclinado são tomados valores consideravelmente negativos. Este comportamento se dá pela própria restituição do escoamento após a esteira, se dar de forma distinta nos dois casos. Tal comportamento é reforçado pelo que se observa na faixa onde a esteira tem maior influência, que são os ângulos mais elevados, onde o comportamento de ambos os casos se assemelha inclusive nas magnitudes alcançadas.

Além dos coeficientes das forças induzidas diretamente sobre a estrutura dos painéis, um outro resultado relevante de ser observado é a influência da distribuição destas forças sobre as superfícies dos trackers na operação dos seguidores, ou seja, como a distribuição das forças atuará no movimento de rotação que caracteriza estes equipamentos. Esta influência pode ser medida através do coeficiente de momento gerado sobre os painéis, com eixo de rotação não no centro do painel, mas no centro do eixo de torção que faz a movimentação dos seguidores. O coeficiente de momento é calculado a partir da divisão do momento da força, calculado pela equação 125, pela equação $\frac{1}{2}\rho\nu^2 AL$. Onde para os valores de ρ, ν, A e L foram usados valores de referência. Sendo ρ a densidade do fluido em questão, ν a viscosidade deste mesmo fluido, $A = 1m^2$ a área de referência e $L = 2m$ o comprimento de referência. De forma que aplicando os mesmos valores para ambas as análises, se tornam adimensionais os valores apresentados, podendo ser comparados a outros casos de estudo. O cálculo do momento da força atuante pode ser ilustrado pelo esquemático apresentado na fig. 26.

$$\mathbf{M}_A = \mathbf{r}_{AB} \times \mathbf{F}_{press} + \mathbf{r}_{AB} \times \mathbf{F}_{visc} \tag{125}$$

A Figura 27 e a tabela 11 demonstram o comportamento do coeficiente de mo-

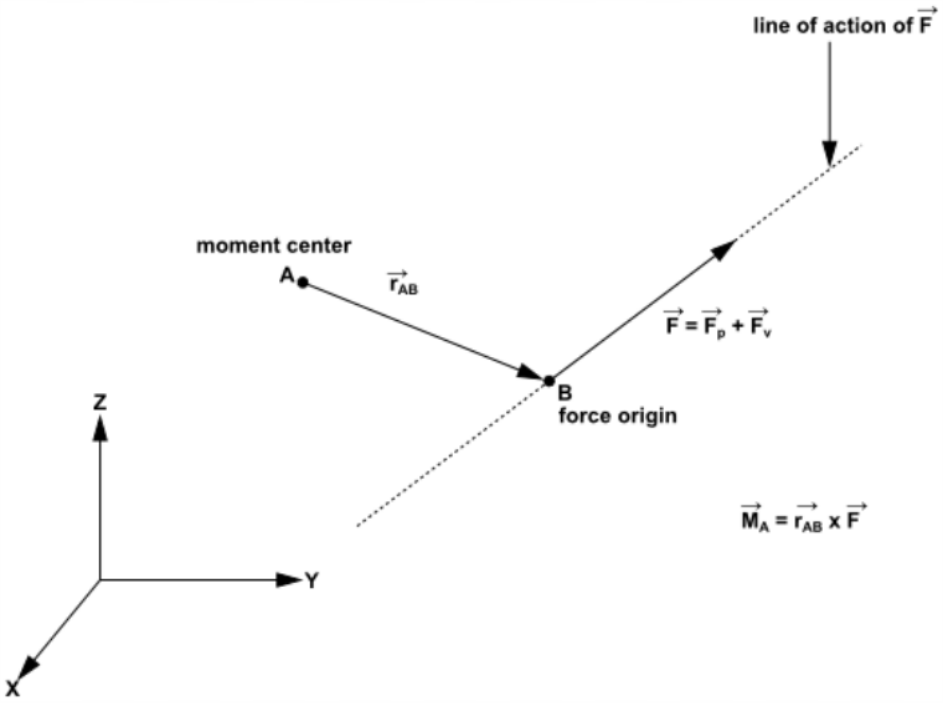


Figura 26 - Esquemático do cálculo do momento das forças atuantes

Fonte: Imagem retirada de (ANSYS INC, 2024)

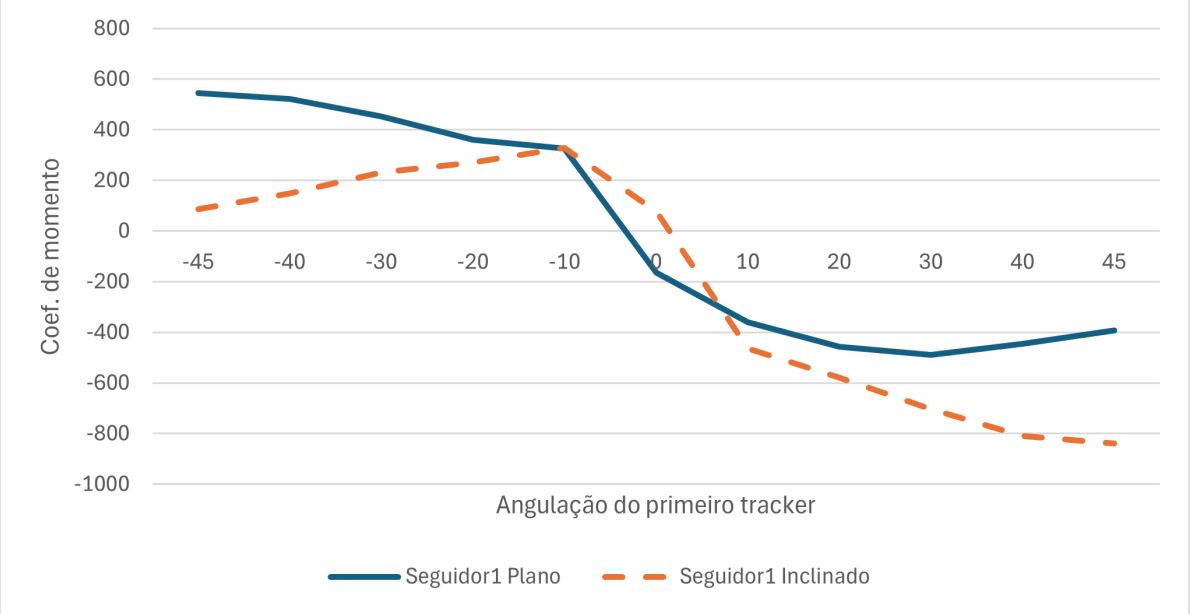


Figura 27 - Coeficiente de momento induzido sobre as fileiras 2 e 3 versus ângulo de inclinação da primeira fileira (graus)

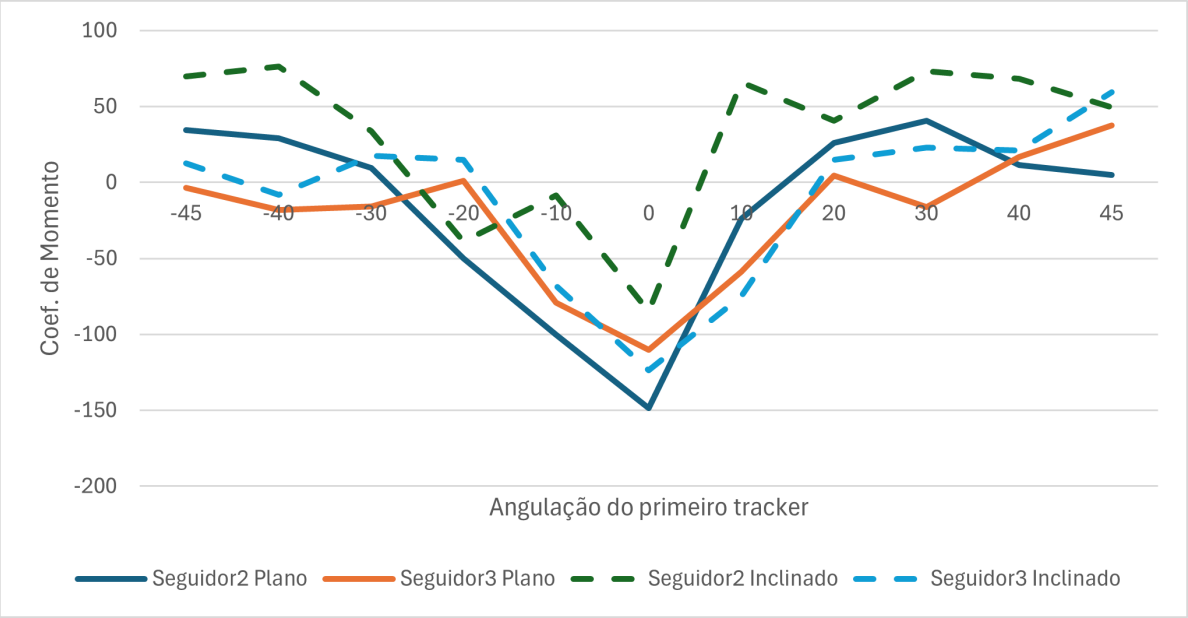


Figura 28 - Coeficiente de momento induzido sobre a primeira fileira versus ângulo de inclinação da primeira fileira (graus)

mento atuante sobre a primeira linha de trackers de ambas as análises. O efeito do solo no coeficiente de momento se mostra diverso, não apenas se tratando de mudança de magnitudes, mas uma variação real no comportamento. Ao observar ângulos positivos, a partir de 0°, temos um comportamento de atenuação dos momentos no plano horizontal, enquanto estes são amplificados com o aumento da angulação no plano inclinado. Ao comparar os resultados para os ângulos negativos por sua vez, observa-se novamente a alteração na resposta do coeficiente, enquanto no terreno plano o coeficiente continua a crescer com a inclinação do seguidor, após os -10° o seguidor do plano inclinado passa a amenizar o momento gerado sobre a estrutura, aproximando-se do equilíbrio de momentos para ângulos próximos aos -45°.

Na comparação trazida pela Fig. 28 e pela tabela 12 os resultados demonstram os coeficientes de momento atuantes sobre as fileiras subsequentes de painéis solares de cada análise. Este comparativo em especial, vale destaque. Pois em comparação com resultados prévios obtidos, conforme observado em (GONçALVES; CHALHUB, 2024) incluído no Anexo deste texto, os coeficientes apresentaram comportamentos completamente distintos.

Enquanto no artigo previamente publicado o comportamento dos coeficientes era similar ao observado nos coeficientes das forças atuantes na direção X, ou seja, de grande magnitude para ângulos próximos a 0° e que seriam mitigados para ângulos mais elevados, para este novo resultado os coeficientes se aproximam no comportamento de cada seguidor subsequente, trazendo um esperado para estes coeficientes. Esta diferença se deu pela mudança de uma condição de contorno após revisão do trabalho prévio, a alteração

Tabela 12 - Dados de coeficiente de momento para o segundo e terceiro seguidores

Angulação	S2 Plano	S2 Inclinado	S3 Plano	S3 Inclinado
-45	34,634882	69,807078	-3,6837297	12,741019
-40	29,019853	76,142156	-18,031201	-8,2098204
-30	9,4597778	33,5327	-15,758541	17,608383
-20	-50,049061	-38,715971	0,95179045	15,052433
-10	-100,32896	-8,6946717	-78,963097	-67,942709
0	-148,45148	-85,013045	-110,1035	-123,50636
10	-23,98361	65,883071	-58,854305	-74,980862
20	26,164523	40,610827	4,5698986	14,896506
30	40,549676	73,055346	-16,042686	23,105146
40	11,469531	68,271236	16,969482	21,038229
45	4,8281414	49,412437	37,542118	59,311326

da condição de contorno de parede sem deslizamento no estudo anteriormente publicado, para uma saída de pressão atmosférica no presente estudo. Entende-se que a imposição da parede sem deslizamento acabava por confinar o escoamento, influenciando especialmente a distribuição das forças sobre a superfície dos seguidores, e com isso alterando os coeficientes de momento.

Dito isto, os coeficientes de momento atuantes nos seguidores 2 e 3 do terreno inclinado e do terreno plano, apresentam comportamento geral similar. No seguidor 2 é observado um aumento da magnitude para o plano inclinado nas angulações maiores, a partir dos -30° e 30°, enquanto no terreno plano observam-se magnitudes absolutas mais elevadas nos ângulos mais próximos do 0. Nestas angulações é observada uma mitigação do momento atuante no segundo seguidor do plano inclinado.

Na terceira fileira observa-se um comportamento similar ao longo de toda a curva, não havendo diferenças significativas no comportamento dos trackers. Entende-se aqui que para efeitos de distribuição das forças, o terceiro tracker já está posicionado em uma zona de proteção mais branda dadas as influências da esteira.

Percebe-se de forma generalizada que o coeficiente de momento não sofre grande influência do efeito de proteção, trazendo comportamentos em geral similares para os seguidores à jusante da primeira fileira. Como as alterações de comportamento vistas nos coeficientes das forças foram em sua maioria relacionados ao aumento na magnitude das forças, se tais forças forem amplificadas, mas mantendo sua distribuição ao longo da estrutura do seguidor, é esperado que o comportamento seja de fato similar ao observado no terreno plano.

CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo estudar o comportamento de cargas induzidas pelo vento em fileiras de seguidores solares sobre terreno inclinado e compará-las às cargas induzidas em seguidores montados sobre um terreno horizontal. Criando modelos 2D simplificados e simulando o escoamento desses sistemas utilizando o método de volumes finitos.

Observando os resultados obtidos, é possível concluir o comportamento geral dos seguidores solares em relação às cargas de vento, especialmente no que diz respeito ao efeito de proteção gerado pela inclinação da primeira fileira e o efeito de esteira aerodinâmica formado. Conforme avaliado, o efeito de proteção para duas fileiras é mantido para os ângulos mais elevados, mas sua eficácia é reduzida à medida que as forças que atuam sobre os rastreadores são maiores para os rastreadores no terreno inclinado.

No que tange a avaliação de momentos no entanto foram observadas poucas diferenças no comportamento geral dos seguidores. Desta forma entende-se que apesar das magnitudes das forças se alterarem, a distribuição destas segue um perfil similar, causando resultados também similares com relação aos momentos gerados sobre a estrutura tanto no terreno horizontal quanto no inclinado.

Outra conclusão notável é que o efeito de proteção, especialmente em terrenos inclinados, é significativamente mais relevante para o rastreador imediatamente subsequente à linha de proteção, pois as outras linhas à jusante provavelmente não serão capturadas na região de esteira, negligenciando o efeito de proteção especialmente para ângulos de inclinação mais baixos.

Uma avaliação minuciosa no entanto demonstra que para os diferentes ângulos de inclinação da primeira fileira o coeficiente de momento tende a ser fortemente positivo, levantando o questionamento de qual seria a resposta dinâmica destas outras baterias de painéis, ou até mesmo qual seria a resposta dinâmica uma vez que a primeira fileira também estivesse oscilando dado o efeito de "torsional galloping".

Dito isto, algumas possibilidades levantadas como próximos passos a serem explorados seriam a resposta dinâmica das linhas de seguidores quando submetidas a condições semelhantes às utilizadas neste estudo, a utilização de barreiras ao invés da utilização da primeira fileira como proteção, estudo de impacto de partículas como poeira e granizo sobre a superfície dos painéis, e qual seriam as respostas do sistema em uma situação de declive ao invés da situação de aclive apresentada neste estudo.

REFERÊNCIAS

AL-MOHAMAD, A. Efficiency improvements of photo-voltaic panels using a sun-tracking system. *Applied Energy*, v. 79(3), p. 345–354, 2004.

ALRAWASHDEH, H.; STATHOPOULOS, T. Wind loads on solar panels mounted on flat roofs: Effect of geometric scale. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, v. 206, 2020.

ANDRADE, H. C. C. de. *O Método Dos Volumes Finitos Aplicado a Escoamentos de Convecção Forçada e Natural*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brazil, March 2014.

ANSYS INC. *Ansys® Fluent, Release 24.1, Help System, Fluent Theory Guide 4.4.1. Standard k-omega Model, ANSYS, Inc.* [S.l.], 2024.

AWASTHI, A. et al. Review on sun tracking technology in solar pv system. *Energy Reports*, v. 6, p. 392–405, 2020.

BAUTISTA, E. A. L. A distribuição generalizada de valores extremos no estudo da velocidade máxima do vento em piracicaba, sp. *Universidade de Sao Paulo, Piracicaba*, 2002.

FUKUDA k.; BALACHANDAR, R.; BARRON, R. M. Analysis of the ground effect on development of flow structures around an inclined solar panel. *Environmental Fluid Mechanics*, v. 20, p. 1463–1484, 2020.

FUKUDA, K.; BALACHANDAR, R.; BARRON, R. M. Numerical simulation of a ground-supported solar panel pv array subjected to periodic flow. *NTU Journal of Renewable Energy*, v. 1, 2021.

GONçALVES, G. C.; CHALHUB, D. Numerical analysis of wind-induced loads in solar tracker systems. In: *Proceedings of the 20th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering - ENCIT 2024*. Foz do Iguaçu, Brazil: [s.n.], 2024.

GUHA, T.; FEWLESS, Y.; BANKS, D. Effect of panel tilt, row spacing, ground clearance and post-offset distance on the vortex induced dynamic loads on fixed tilt ground mount photovoltaic arrays. In: *14th International Conference on Wind Engineering*. [S.l.: s.n.], 2015.

JUBAYER, C. M.; HANGAN, H. Numerical simulation of wind effects on a stand-alone ground mounted photovoltaic (pv) system. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, v. 134, p. 56–64, 2014.

KOPP, G.; FARQUHAR, S.; MURRISON, M. Aerodynamic mechanisms for wind loads on tilled, roof-mounted, solar arrays. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, v. 111, p. 40–52, 2012.

LI, S. et al. Wind loads on solar car parking gable shed. *Acta Energiae Solaris Sin.*, v. 40, p. 530–537, 2019.

MA, W.; MA, C.; WANG, C. Experimental study on wind load influencing factors of flexible support photovoltaic modules. *J. Exp. Fluid Mech*, v. 42, p. 10–18, 2021.

MARTíNEZ-GARCíA EDUARDO BLANCO-MARIGORTA, J. P. G. E.; NAVARRO-MANSO, A. Influence of inertia and aspect ratio on the torsional galloping of single-axis solar trackers. *Engineering Structures*, v. 243, 2021.

MCINTOSH, K. R. et al. The influence of wind and module tilt on the operating temperature of single-axis trackers. 2022.

MENTER, F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA journal*, v. 32, n. 8, p. 1598–1605, 1994.

OUDHEUSDEN, B. V. Aerodynamic stiffness and damping effects in the rotational galloping of a rectangular cross-section. *Journal of Fluids and Structures*, Elsevier, v. 14, n. 8, p. 1119–1144, 2000.

PONTES, J.; MANGIAVACCHI, N. Fenômenos de transferência com aplicações às ciências físicas e à engenharia–volume 1: Fundamentos. *Sociedade Brasileira de Matemática (SBM)*, 2016.

ROACHE, P. J. *Verification and validation in computational science and engineering*. [S.l.]: Hermosa Albuquerque, NM, 1998. v. 895.

ROHR, C.; BOURKE, P.; BANKS, D. Torsional instability of single-axis solar tracking systems. In: *Proceedings of the 14th International Conference on Wind Engineering*. Proto Alegre, RS: [s.n.], 2015.

SANSIGOLO, C. A. Distribuições de extremos de precipitação diária, temperatura máxima e mínima e velocidade do vento em piracicaba, sp (1917-2006). *Revista Brasileira de Meteorologia*, SciELO Brasil, v. 23, p. 341–346, 2008.

SHADEMAN R.M. BARRON, R. B. M.; HANGAN, H. Numerical simulation of wind loading on ground-mounted solar panels at different flow configurations. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 41, p. 728–738, 2014.

STATHOPOULOS, T.; ZISIS, I.; XYPNITOU, E. Local and overall wind pressure and force coefficients for solar panels. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, v. 125, p. 195–206, 2014.

SUáREZ, J. J. L. et al. Vortex shedding dynamics behind a single solar pv panel over a range of tilt angles in uniform flow. *Fluids*, v. 7, p. 322, 2022.

VASEL, A.; IAKOVIDIS, F. The effect of wind direction on the performance of solar pv plants. *Energy Conversion and Management*, v. 153, p. 455–461, 2017.

WILCOX, D. *Turbulence Modelling for CFD, DCW Industries Inc., La Canada, California, 1993*. [S.l.], 1998.

YEMENICI, O.; AKSOY, M. O. An experimental and numerical study of wind effects on a ground-mounted solar panel at different panel tilt angles and wind directions. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, v. 213, 2021.

ANEXO A – ENCIT 2024 - NUMERICAL ANALYSIS OF WIND-INDUCED LOADS IN SOLAR TRACKER SYSTEMS

Anexo a seguir inclui-se a publicação no "Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering 2024"(ENCIT 2024). Nesta oportunidade foram publicados os resultados preliminares do presente estudo, conforme referenciados durante o texto.

Para referência dos resultados apresentados, foi deixado em anexo o artigo publicado conforme as regras de formatação do congresso em questão.

ENCIT2024
20th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering

ABCM Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas

20th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering
November 10th–14th, 2024, Foz do Iguaçu - PR - Brazil

ENC-2024-XXXX
NUMERICAL ANALYSIS OF WIND-INDUCED LOADS IN SOLAR TRACKER SYSTEMS

Gabriel C. Gonçalves
Daniel J. N. M. Chalhub
Group for Studies and Environmental Simulations in Reservoirs – GESAR, Department of Mechanical Engineering – PPGEM, Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, Rua Fonseca Teles 121, Rio de Janeiro, RJ, 20940-903, Brazil
g8cerqueira@gmail.com
daniel.chalhub@eng.uerj.br

Abstract. *The widespread adoption of solar energy as a key renewable resource has prompted the need to maximize the efficiency of photovoltaic (PV) panels. Among the proposed strategies to enhance efficiency, solar tracking systems have gained significant attention. Solar trackers are designed to align photovoltaic panels with the sun's trajectory throughout the day, optimizing energy capture.*
However, once deployed, these systems often face challenges related to adverse meteorological conditions, particularly those originated by incident winds. Strong gusts tend to compromise the tracker structure in one of two ways, through direct loads applied to the tracker's structure or through the dynamic excitation causing high angle torsional vibration, both leading to system failure and significantly reduced lifetime of the equipment. While extensive numerical and experimental investigations have explored wind effects and their relations to a range of parameters such as panel inclination, row spacing, moment of inertia and aspect ratio, there remains a notable gap regarding the impact of irregular landscapes and inclined terrain on solar tracker performance, a recurrent condition perceived in the field. This paper presents a comprehensive numerical analysis, using the finite volume method to solve the steady-state flow around a simplified panel structure. A 2D domain of 3 rows of trackers was created over an inclined terrain, in order to calculate wind-induced loads and moments on each row of the system.
With this study it is expected to assess the influence of the inclined terrain over the two aforementioned critical parameters impacting the tracker's lifespan, direct wind-induced loads and moment. These parameters are expected to present expressive variations especially in the two latter tracker rows, due to a shielding effect provided by the first row's wake region. As the terrain inclines, it is expected that latter rows would escape the wake region and once again be fully affected by the wind. By delving into these aspects, this research seeks to deepen the understanding of wind-related challenges encountered by solar trackers and to propose informed strategies for enhancing their design and deployment.

Keywords: *Solar tracker, CFD, Wind induced loads, Inclined Terrain*

1. INTRODUCTION

With the ever increasing need for alternative and renewable energy sources the industry is focusing its efforts in enhancing the efficiency of the energy capture of sustainable resources. This endeavor has led to innovative solutions, particularly regarding solar power generation. Among these innovations, solar trackers have emerged as a crucial technology for enhancing the efficiency of photovoltaic (PV) panels. By dynamically adjusting the orientation of solar panels to follow the sun's trajectory throughout the day, solar trackers aim to maintain an optimal angle of incidence of sunlight significantly improving the overall energy yield of photovoltaic systems when compared to fixed-panel systems.

However, despite their benefits, solar trackers face significant challenges, especially due to adverse weather conditions. Strong winds, in particular, pose a major threat by imposing static and dynamic loads on the structural components of solar trackers. These wind-induced forces can compromise the integrity, stability and operational efficiency of the systems.

The investigations made relating wind-induced forces both to integrity and efficiency of these systems are vast. From broader analysis of general plants efficiency due to wind direction as seen in Vasel and Iakovidis (2017), to thermal efficiency related to panel tilt as explored by McIntosh *et al.* (2022). Regarding the integrity of the tracker system itself there are studies using either numerical, experimental methods or both. Exploring the wind induced loads in ground mounted solar panels with numerical simulations as in Jubayer and Hangan (2014) and Fukuda *et al.* (2021), analyzing rooftop mounted panels and their wind-induced loads as in Alrawashdeh and Stathopoulos (2020) through experimentation or even evaluating pressure coefficients through both experimental and numerical analysis like observed in Yemenici and Aksoy (2021). Important developments were also made in researches regarding the dynamic effect of the wind loads

exploring tilt, row spacing and aspect ratio with the studies presented by Rohr *et al.* (2015) and Eva Martínez-García (2021). At last, the recent k. Fukuda *et al.* (2020) studied the effects on ground clearance in the interaction of wind and structure.

Although there are numerous studies over the topic, an aspect not thoroughly explored is the influence of irregular landscapes and inclined terrains, conditions frequently encountered in real-world installations. This gap emphasizes the need for a comprehensive analysis of the impact of terrain inclination on solar tracker systems.

This study aims to address this gap by conducting a comprehensive numerical analysis of wind-induced loads on solar tracker systems, incorporating the effects of terrain inclination. Using Computational Fluid Dynamics (CFD) based on the Finite Volume Method, the research simulates and analyzes the interactions between wind forces and solar tracker structures. The study examines a range of panel positions to identify how inclined terrains affect flow behavior, forces on each row of panels, and the shielding effects of the first row on subsequent rows.

By providing detailed insights into these factors, this research seeks to enhance the understanding of wind-related challenges and inform the development of robust design and deployment strategies for solar trackers. Ultimately, the findings aim to contribute to the optimization of solar tracker systems, ensuring their resilience and efficiency in diverse environmental conditions, thereby supporting the broader objective of maximizing the potential of renewable energy sources.

2. METHODOLOGY

In order to examine the influence of wind on the structure of solar tracker systems, two simplified 2D-models were created, this approach was considered sufficient as the critical load conditions occur when direct wind reaches the tracker's structure as previously presented by M. Shademan and Hangan (2014). These two domains were created representing the difference in terrain inclination, one representing a flat landscape and the other an inclined one.

These domains were discretized in a mesh of finite volumes, following the best practices in order to achieve proper mesh quality and size. After the meshing process is completed the boundary conditions and hypothesis are defined within the solver so that the fluid dynamics equations are solved. In the following subsections each step of the process described above will be detailed.

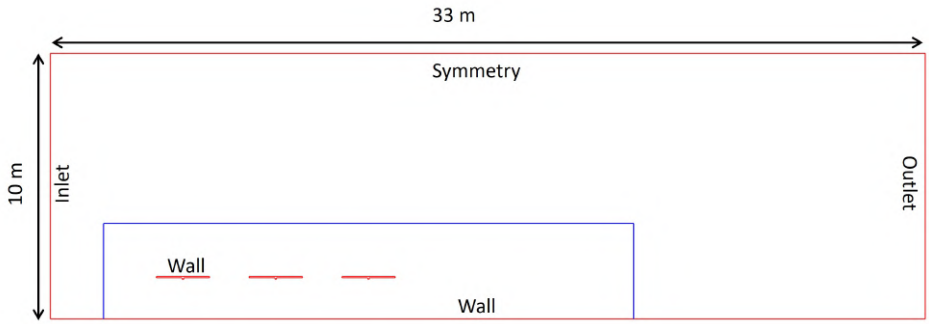


Figure 1. Simplified 2D geometry of solar tracker rows over a flat surface

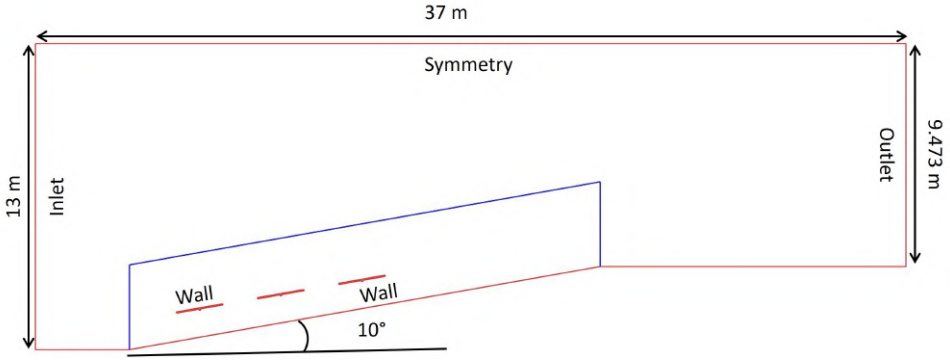


Figure 2. Simplified 2D geometry of solar tracker rows over inclined terrain

2.1 Geometric Domain

As aforementioned two domains were created for the present study one representing a flat landscape and one representing the inclined terrain, each with tracker rows represented inside the domain.

The domain with Flat Surface as depicted in Fig. (1) consists of a rectangular domain with dimensions set at $Height = 10m$ and $Width = 33m$. Within this area 3 simplified solar tracker rows were depicted with a Chord of $2m$ and Height of $0.05m$ each, with a distance of $1.5m$ from the trailing edge of the previous row to the Leading edge of the following row and $1.6m$ from the panels top edge to the ground.

As for the Inclined terrain observed in Fig. (2), the domain was generated with the dimensions of $Height1 = 13m$ upstream the inclined terrain, $Width = 37m$, a $10degrees$ inclination of the terrain and the $Height2 = 9.473m$ downstream of the inclined ground. The tracker rows follow the same configuration as applied in the previous domain regarding aspect ratio and row spacing, but in this domain the trackers follow the ground line, meaning when parallel to the ground they are inclined 10 deg relative to the global reference frame. The second domain needed to be enlarged as the inclined terrain is an obstacle itself larger than the tracker rows.

In this step of the setup were also defined the angles of the first row of trackers relative to the ground as parameters to be varied in order to study the shielding effect it would have over the other rows.

2.2 Computational Mesh

In order to solve the fluid flow equations numerically, each domain must be discretized into a computational mesh. The computational meshes of the flat terrain and of the inclined one were defined very similarly, reaching up to 283k and 526k elements with maximum size of $5mm$ and $3mm$ respectively.

As a means to properly resolve the boundary layer behavior, a prismatic element layer consisting of 20 elements through the height of the layer was defined as shown in Fig. (3). The mesh around the trackers was refined aiming for accurate results in the wake regions created by the flow around the obstacles, these regions are depicted in Fig. (1) and Fig. (2) as the regions around the trackers highlighted with blue lines and can be observed in the mesh snapshot in Fig. (4) as the darker area, result of a higher concentration of volumes.

2.3 Modeling Hypotheses and Boundary Conditions

Upon achieving the desired mesh quality and size, the hypotheses adopted and boundary conditions must be defined in the solver. As the present work proposes a comparison between two simulations, both should use the same hypotheses and assumptions. The assumptions made in this present study for both cases are enumerated as follows:

1. Steady State Flow,
2. Heat transfer: Not considered,
3. Fluid: Incompressible Air (Specific Mass considered constant and equal to $1,225kg/m^3$),
4. Turbulence: Modeled as K-omega SST model
5. Tracker angle variation: from -45 to 45 deg varying 10 deg from 0 up to 40 deg and then 5 deg to reach 45

With such assumptions made, the boundary conditions should also be similar as a way to validate the comparison between simulations. The boundary conditions were disposed as outlined in Fig. (1) and Fig. (2) and are detailed below:

1. Inlet: $30m/s$,
2. Symmetry: Used as a free slip wall,
3. Outlet: $0Pa$ (Gauge pressure),
4. Wall: No slip wall condition

These conditions were simulated for each panel tilt angle previously defined in the geometry definition step. So the results could be evaluated over the range of tilt angles for the first panel.

3. RESULTS

The most relevant variables to be evaluated in this study are forces and moment acting in the structure, as these are the effects the first row should protect the following rows against. Those important variables are a result of pressure and

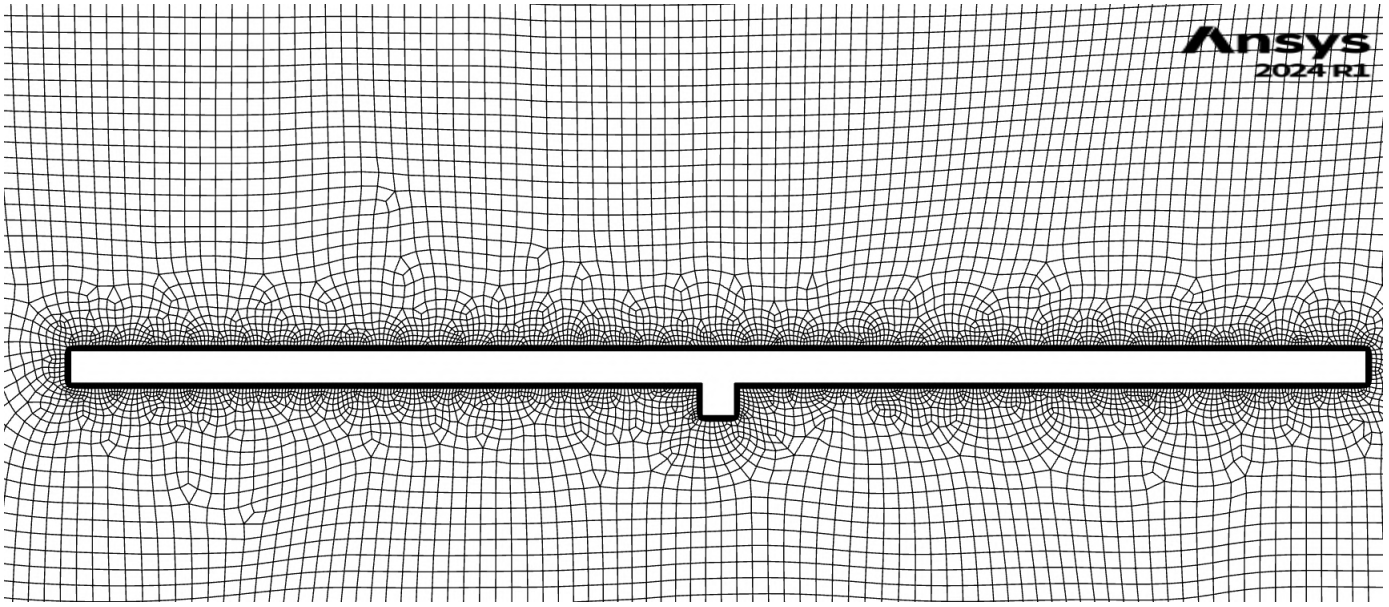


Figure 3. Snapshot of the mesh closer to the tracker

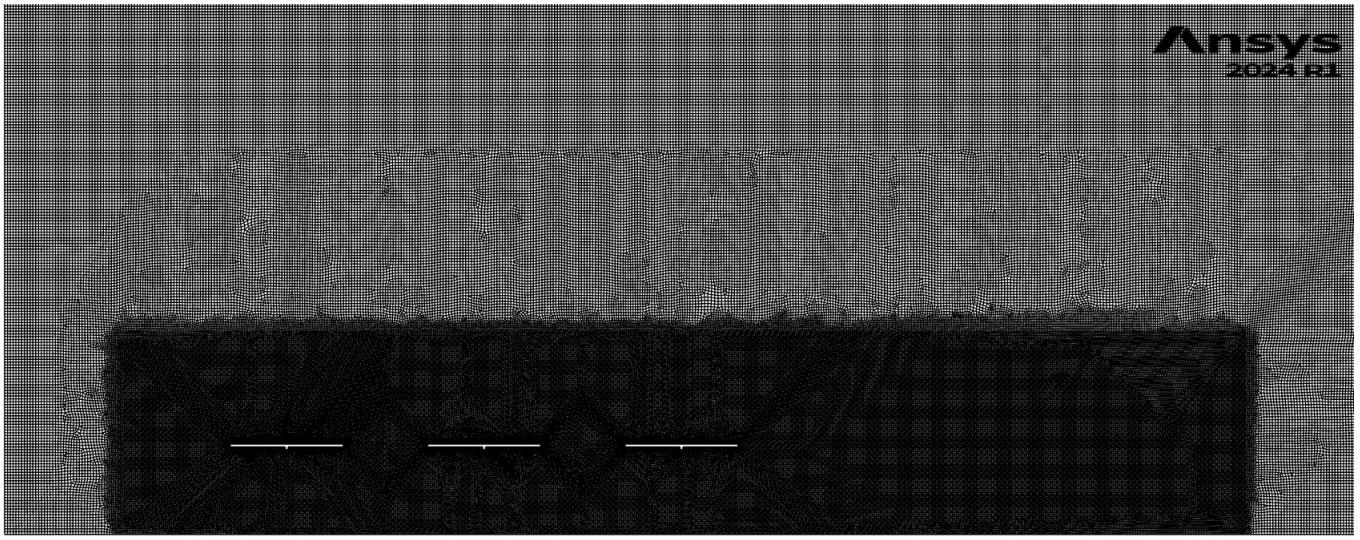


Figure 4. Boundary conditions disposition in the inclined landscape domain

velocity distributions over the domain and tracker surfaces, so for a deeper understanding of the results of force in each direction and of moment it is reasonable to evaluate pressure and velocity distributions first.

As a matter of comparison, when evaluating the flat landscape, the pressure distributions is similar in all three rows when the first tracker is positioned at 0 tilt angle. As the tracker starts to tilt, at either a positive or negative angle, the pressure over the subsequent rows tend to decrease and the overall pressure pattern changes. As the first row tilts up to higher angles such as seen in Fig. 5 the subsequent rows are caught in a low pressure zone generated by the wake region.

Velocity and pressure results are deeply intertwined, the velocity magnitude presented in Fig. 6 illustrate the reasons for the pressure distribution, as in 0 degrees tilt the flow stream reaches the second and third row almost the same way it reaches the first then the resulting pressure distribution has to be similar. As the panel tilts, it begins to shield the subsequent rows due to the wake region generated. This effect becomes more obvious when evaluating higher angles such as 45 degrees, where the wake region covers both subsequent trackers completely and leads to the low pressure zone seen in Fig. 5.

When considering the inclined results, the general pressure distribution presented in Fig. 7 is actually similar to the one observed in Fig. 5 specially for the higher angles as the shielding effect appears once more. Although the general distribution is similar, the magnitude of the pressure involved differs and this difference will impact in the forces and moments generated. The inclined landscape, as predicted, impacts significantly the behavior of the shielding effect

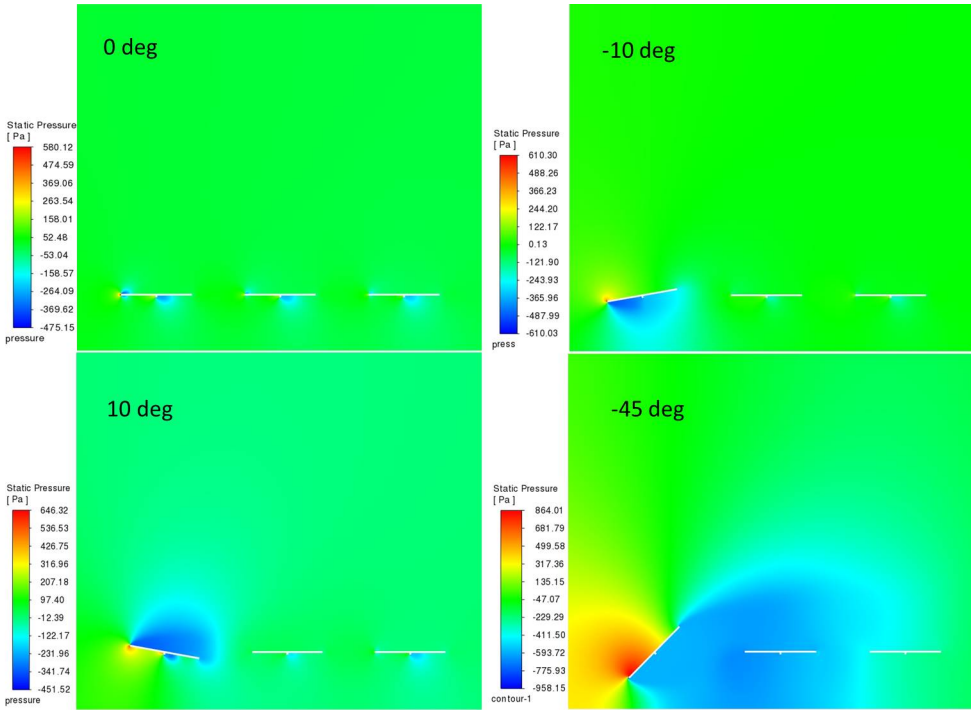


Figure 5. Pressure contours around the solar tracker systems over the flat landscape for various tilt angles

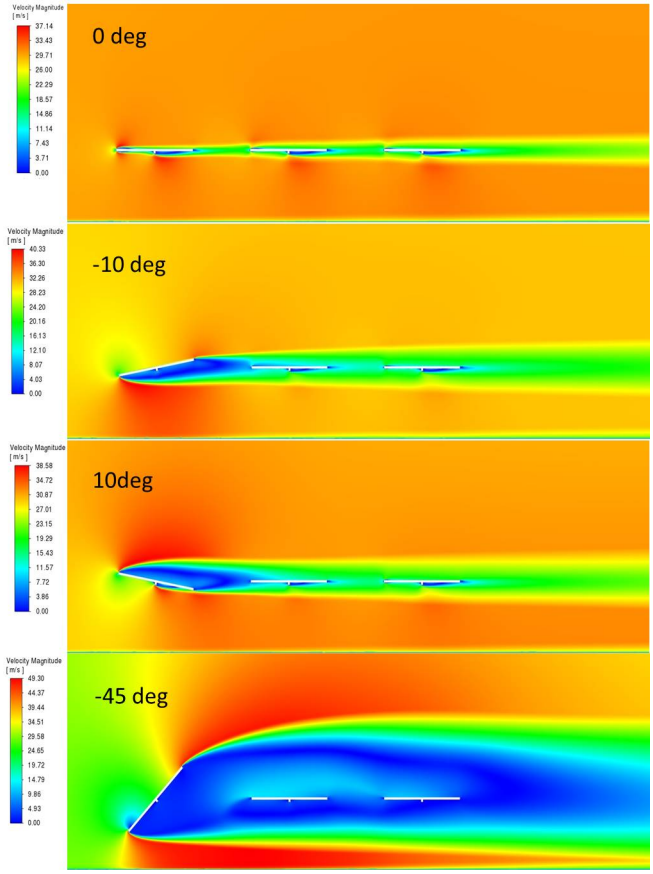


Figure 6. Velocity contours around the solar tracker systems over the flat landscape for various tilt angles

specially in lower tilt angles and in the latter row of trackers.

The velocity profiles observed in Fig. 8 also follow similar patterns. Past the incline angle, the shielding effect once more starts to present itself as the wake regions starts to form. It is notable, although that the shielding is more effective for higher tilt angles and for the second row when compared to the third row and that is related to general form and extension

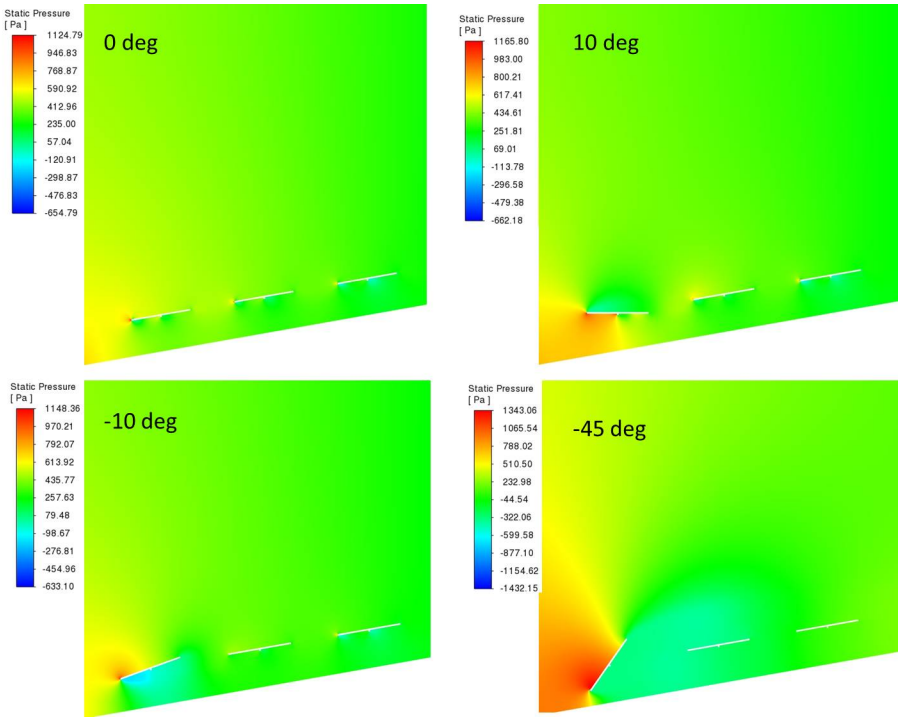


Figure 7. Pressure contours around the solar tracker systems over the inclined terrain for various tilt angles

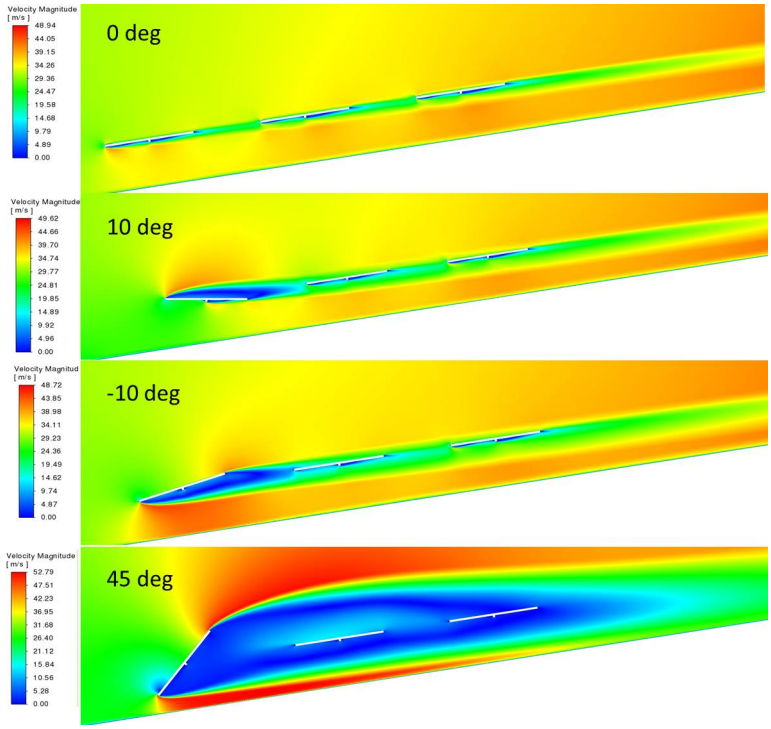


Figure 8. Velocity contours around the solar tracker systems over inclined terrain for various tilt angles

of the wake regions generated. So if there were more rows, they would not be much affected by shielding or if the row spacing was higher, even the third row could be completely affected by the free stream flow.

The force graphs in Fig. 9 and Fig. 10 present a comparison of the shielding effect in both inclined and flat surfaces, as it compares the forces acting in tracker rows 2 and 3 for both scenarios. while the dash lines present the results for the inclined terrain the full lines present the results for the flat terrain. It is notable that, although the shielding effect still occurs, the magnitude of the forces acting in both trackers in both directions has drastically increased. The difference regarding the effects in trackers 2 and 3 is also observed as predicted as the shielding effect, noted by the reduction of the forces magnitude, is observed for tracker 2 at lower tilt angles than those observed for tracker 3.

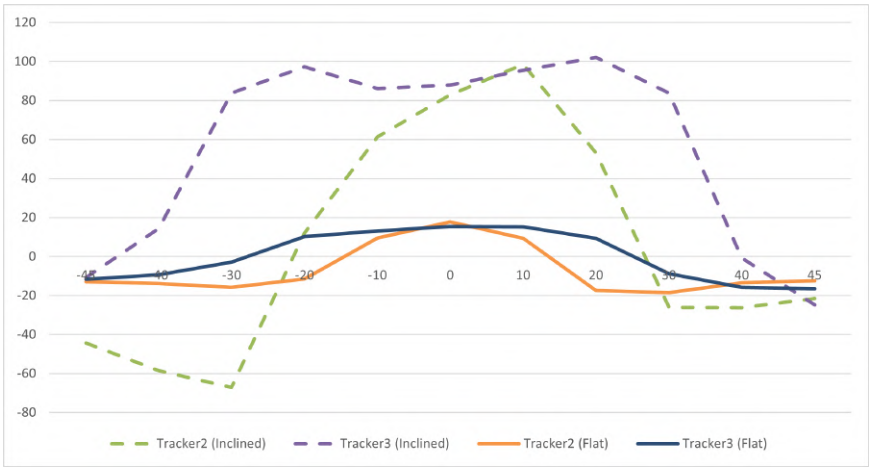


Figure 9. Force in X direction (N) versus first row tilt Angle (degrees)

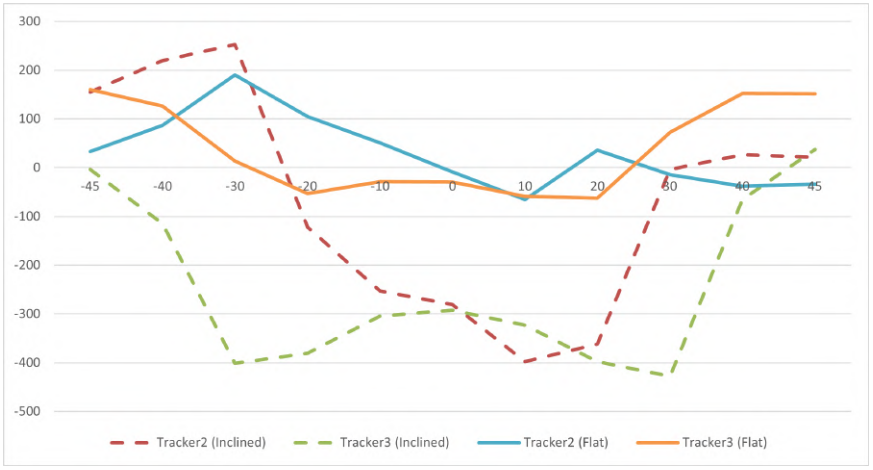


Figure 10. Force in Y direction (N) versus first row tilt Angle (degrees)

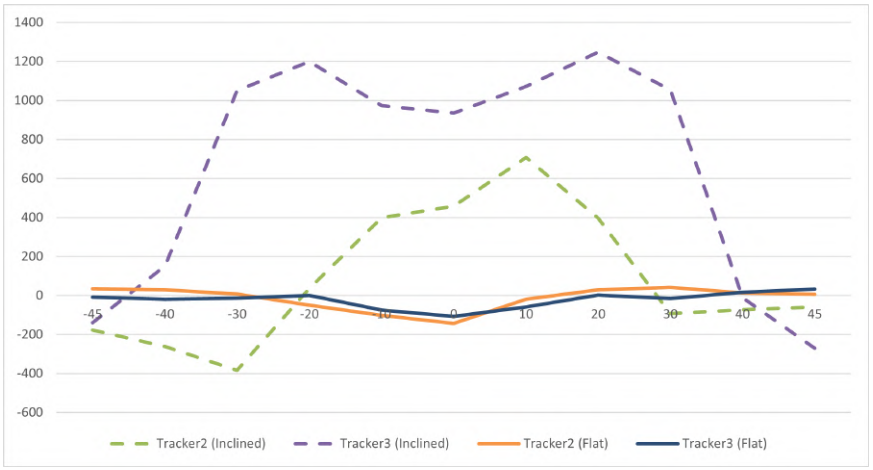


Figure 11. Moment coefficient versus first row tilt Angle (degrees)

When evaluating the moment produced over the structure as presented by Fig. 11 it is notable the shielding follows the same pattern, much higher moment coefficients for the inclined surfaces when compared to the flat surfaces. Another interesting observation is that the effect is much higher in the third row when compared to the second row of the inclined results, this behavior is explained by the reestablishment of the flow, as the wake region starts to fade, the moment effects start to act over the structure once more. The shielding starts to be accountable for the inclined terrain, only when the first row reaches higher angles.

4. CONCLUSIONS

The present work envisioned to study the behavior of wind-induced loads on solar tracker rows over inclined terrain. By creating 2D simplified models and simulating the flow over these systems using the finite volume method. Observing the obtained results, it is possible to conclude the general behavior of the solar tracker regarding the wind loads, specially regarding the shielding effect expected from tilting the first row. As evaluated, the shielding effect for two rows is maintained for higher angles but its effectiveness is drastically reduced as the forces and moments acting over the trackers are significantly higher for the trackers in the inclined terrain.

Another remarkable conclusion is that the shielding effect, specially in inclined terrains is significantly more relevant to the tracker immediately subsequent to the shielding row, as the other rows downstream are likely to be caught in the reestablishing region of the flow, neglecting the shielding effect specially for lower tilt angles.

As a next step, it is suggested the study of the dynamic response of the tracker rows when submitted to conditions similar to the ones used in this study. Not only to explore another important failure mode not explored in this study but also to assess how alarming are the Moment results presented here.

5. REFERENCES

Alrawashdeh, H. and Stathopoulos, T., 2020. "Wind loads on solar panels mounted on flat roofs: Effect of geometric scale". *Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics*, Vol. 206.

Eva Martínez-García, Eduardo Blanco-Marigorta, J.P.G.A.N.M., 2021. "Influence of inertia and aspect ratio on the torsional galloping of single-axis solar trackers". *Engineering Structures*, Vol. 243.

Fukuda, K., Balachandar, R. and Barron, R.M., 2021. "Numericla simulation of a ground-supported solar panel pv array subjected to periodic flow". *NTU Journal of Renewable Energy*, Vol. 1.

Jubayer, C.M. and Hangan, H., 2014. "Numerical simulation of wind effects on a stand-alone ground mounted photovoltaic (pv) system". *Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics*, Vol. 134, pp. 56–64.

k. Fukuda, Balachandar, R. and Barron, R.M., 2020. "Analysis of the ground effect on development of flow structures around an inclined solar panel". *Environmental Fluid Mechanics*, Vol. 20, pp. 1463–1484.

M. Shademan, R.M. Barron, R.B. and Hangan, H., 2014. "Numerical simulation of wind loading on ground-mounted solar panels at different flow configurations". *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 41, pp. 728–738.

McIntosh, K.R., Abbott, M., Sudbury, B.A., Aneja, S.P., Bowman, M., Brown, L., Kahane, B., Nicholas, N. and Nolde, K., 2022. "The influence of wind and module tilt on the operating temperature of single-axis trackers". doi: 10.1109/PVSC48317.2022.9938577.

Rohr, C., Bourke, P. and Banks, D., 2015. "Torsional instability of single-axis solar tracking systems". In *Proceedings of the 14th International Conference on Wind Engineering*. Proto Alegre, RS.

Vasel, A. and Iakovidis, F., 2017. "The effect of wind direction on the performance of solar pv plants". *Energy Conversion and Management*, Vol. 153, pp. 455–461.

Yemenici, O. and Aksoy, M.O., 2021. "An experimental and numerical study of wind effects on a ground-mounted solar panel at different panel tilt angles and wind directions". *Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics*, Vol. 213.

6. RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are solely responsible for the printed material included in this paper.