

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE NUMÉRICA DE UM ELEMENTO DE PÁ DE UMA TURBINA EÓLICA H. DARRIEUS
EMPREGANDO MALHA POLIÉDRICA EM COMPARAÇÃO À UMA MALHA HEXAÉDRICA

por

Arthur Henrique Hugen

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

Porto Alegre, Dezembro de 2017

ANÁLISE NUMÉRICA DE UM ELEMENTO DE PÁ DE UMA TURBINA EÓLICA H. DARRIEUS
EMPREGANDO MALHA POLIÉDRICA EM COMPARAÇÃO À UMA MALHA HEXAÉDRICA

por

Arthur Henrique Hugen

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

Prof.^a Dra. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Prof.^a Dra. Adriane Prisco Petry

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Bardo Ernst Josef Bodmann

Prof. Dr. Sérgio Viçosa Möller

Prof.^a Dra. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 19 de Dezembro de 2017.

Agradecimentos

À Prof.^a Adriane Prisco Petry, pela orientação, apoio e ensinamentos proporcionados não somente na realização do trabalho de conclusão de curso, mas também durante partes da minha vida acadêmica que serviram de inspiração na escolha do tema deste trabalho.

À M.^a Eng. Cássia Pederiva de Oliveira, pelo apoio proporcionado durante toda a realização do presente trabalho, essencial para o desenvolvimento do mesmo.

Ao Grupo de Estudos Térmicos e Energéticos (GESTE), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), por disponibilizar a licença para o software comercial empregado.

Ao Centro Nacional de Supercomputação (CESUP), pela disponibilização dos recursos computacionais necessários para a execução das análises numéricas presentes neste trabalho.

Aos amigos e família que me apoiaram durante todo o curso superior.

HUGEN, A. H. **Análise Numérica de um Elemento de Pá de uma Turbina Eólica H. Darrieus empregando Malha Poliédrica em Comparação à uma Malha Hexaédrica.** 2017. 24 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

RESUMO

Neste trabalho, se utiliza a dinâmica dos fluidos computacional a fim de discutir o desempenho de dois tipos de malhas aplicadas a um mesmo problema específico, com o intuito de avaliar o desempenho das mesmas em seu tratamento. O problema em si é baseado no estudo realizado por Li. et. al., 2013 e consiste na análise numérica, através do software STAR-CCM+, de um elemento de pá de uma turbina eólica H. Darrieus. A metodologia empregada consiste na utilização do método dos volumes finitos com médias de Reynolds, modelo de turbulência $k-\omega$ SST, um domínio computacional em 3D que desconsidera os efeitos de ponta de pá e um elemento de pá de perfil aerodinâmico NACA0018. São criadas três malhas poliédricas de diferentes refinamentos e a qualidade de malha é verificada através de uma análise de influência do refinamento de malha, esta é desenvolvida ao se comparar os resultados obtidos para cada malha com resultados experimentais, o que determina como válido o tipo de malha poliédrica para o problema em questão devido à semelhança dos resultados obtidos pela análise numérica com os resultados experimentais. Por fim, é realizada uma comparação entre os resultados numéricos deste estudo e os obtidos por Li. et. al., 2013, que utiliza uma malha hexaédrica estruturada em sua análise. Ao comparar as diferenças entre os resultados numéricos de ambos os estudos com os resultados experimentais, conclui-se que a malha hexaédrica estruturada tem um melhor desempenho do que a malha poliédrica em se tratando do problema específico considerado neste trabalho.

PALAVRAS-CHAVE: Malha poliédrica. Malha hexaédrica estruturada. Turbina H. Darrieus. Dinâmica dos fluidos computacional.

HUGEN, A. H. **Numerical Analysis of a Blade Element from a H. Darrieus Wind Turbine using Polyhedral Mesh in Comparison to a Hexahedral Mesh.** 2017. 24 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ABSTRACT

In this work, computational fluid dynamics is used to discuss the performance of two types of meshes applied to the same specific problem, in order to evaluate the performance of both meshes in its treatment. The problem itself is based on the study by Li et al. al., 2013 and consists of a numerical analysis, using the STAR-CCM + software, of a blade element of a H. Darrieus wind turbine. The methodology consists in the use of the finite volume method with Reynolds averaged equations, k- ω SST turbulence model, a computational domain in 3D which disregards the blade tip effects and a blade element of aerodynamic profile NACA0018. Three polyhedral meshes of different refinements are created and the mesh quality is verified through an analysis of the influence of the mesh refinement, this analysis is developed by comparing the results obtained for each mesh with experimental results, which determines the type of polyhedral mesh to be valid as a way of solving the specific problem due to the resemblance of results obtained from the numerical analysis in comparison to experimental results. Finally, a comparison is made between the numerical results of this study and the ones obtained by Li et. al., 2013, which uses a structured hexahedral mesh in its analysis. When comparing the differences between the numerical results of both studies with the experimental results, it's concluded that the structured hexahedral mesh has a better performance than the polyhedral mesh in dealing with the specific problem considered in this work.

KEYWORDS: Polyhedral mesh. Structured hexahedral mesh. H. Darrieus turbine. Computational fluid dynamics.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
4. METODOLOGIA	2
4.1 MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS	2
4.2 MODELAGEM MATEMÁTICA	2
4.2.1 Modelo de turbulência $k-\omega$ SST	3
4.2.2 A Turbina Eólica H. Darrieus e Fundamentos Aerodinâmicos.....	3
4.3 MODELAGEM COMPUTACIONAL	5
4.3.1 Função de Interpolação, Método para Acoplamento Pressão/Velocidade e Método Iterativo.....	5
4.3.2 Critério de Parada.....	6
4.3.3 Geometria, Domínio Computacional e Condições de Contorno	6
4.3.4 Discretização Espacial e Temporal	8
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	10
5.1 COEFICIENTES AERODINÂMICOS OBTIDOS E ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO REFINAMENTO DE MALHA	10
5.2 DISCUSSÃO SOBRE A COMPARAÇÃO DE ESTUDOS	13
6. CONCLUSÕES	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
APÊNDICE A	16
APÊNDICE B	17

1. INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda por fontes de energia renováveis e de baixo impacto ambiental, a geração de energia a partir do vento, que além de ser um recurso abundante, é uma fonte limpa e de grande disponibilidade, se mostra como uma ótima alternativa a combustíveis fósseis como geradores de energia.

A fim de aumentar a presença deste tipo de energia renovável no mercado, diversos estudos são desenvolvidos com o intuito de melhor compreender os fenômenos físicos envolvidos no processo, esperando contribuir, a partir deste conhecimento, para o desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias que venham a melhorar a eficiência de tais turbinas.

Li. et. al. 2013 indica que a maioria destes estudos tem foco em turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH), devido à sua maior aceitação no mercado, entretanto, turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV) tem chamado a atenção de pesquisadores por possuírem certas vantagens como as citadas por Paraschivoiu, 2002: são independentes à direção do vento, não causam tanto ruído devido à velocidade de rotação mais baixa e possuem menor sensibilidade a turbulências, o que facilita a instalação de turbinas menores em ambientes urbanos, por exemplo. Com a crescente necessidade por fontes de geração de energia que estejam mais próximas da demanda ou que possam ser instaladas individualmente para cada usuário em particular, TEEVs como a H. Darrieus, estudada neste trabalho, se destacam como ótimas alternativas para instalação em áreas urbanas, no que é um campo de aplicação relativamente novo para turbinas eólicas.

Considerando que estudos experimentais demandam muito tempo e custos, este trabalho tem como principal foco os efeitos que a combinação dos diferentes parâmetros empregados em uma análise numérica possuem sobre os resultados finais da mesma, assim esperando encontrar o melhor comprometimento entre resultados próximos dos experimentais e um menor tempo de processamento. Entre estes parâmetros está o tipo de malha utilizado na discretização espacial do problema, ou seja, a forma com que é feita a divisão do domínio computacional. Entre os diversos tipos de malhas existentes, a malha poliédrica empregada neste estudo é dita como sendo relativamente fácil e eficiente de construir, não necessitando de maior preparação da superfície em relação à uma malha tetraédrica equivalente e possuindo até cinco vezes menos elementos do que a mesma [Star CCM+, 2017]. A malha ainda pode ser definida como estruturada, cujas características permitem um menor uso de memória e maior eficiência na codificação, na utilização do cache e na vetorização, e não estruturada, que oferece mais flexibilidade tanto nos tipos de elementos disponíveis quanto onde estes podem ser concentrados, esta flexibilidade, entretanto, tem como revés a sua complexibilidade adicional [Moukalled et. al., 2016].

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo a realização de uma comparação entre dois tipos diferentes de malhas aplicados à um mesmo problema, tendo como base o método empregado por Li. et. al., 2013 para tal. O método em questão é proveniente da simulação 2,5D, denominação dada pelos autores ao domínio em 3D que desconsidera os efeitos de ponta de pá, que os mesmos realizam sobre um elemento de pá de uma turbina H. Darrieus com perfil aerodinâmico NACA0018, utilizando o modelo de turbulência $k-\omega$ SST e uma malha hexaédrica estruturada. Ao realizar neste trabalho uma análise numérica equivalente à de Li. et. al., 2013, porém, empregando uma malha poliédrica, espera-se discutir, a partir de uma comparação dos resultados numéricos com os resultados experimentais oriundos de Claessens, 2006, a validade na utilização de um ou outro tipo de malha na resolução deste tipo de problema.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apesar de não figurarem entre as turbinas eólicas mais comuns no mercado, os estudos sobre turbinas H. Darrieus são extensos e tem crescido em dimensão devido ao grande interesse em energias renováveis em conjunto com algumas vantagens que este tipo de turbina proporciona.

Eriksson et. al. 2008 afirmam que as TEEVs possuem uma eficiência quase tão boa quanto a das TEEHs, e que a diferença no coeficiente de potência (C_p), que indica o quanto da potência do vento é absorvida pela turbina eólica, entre os dois tipos se dá em parte à maior experiência que o mercado tem com as TEEHs, proporcionando-lhes um design mais otimizado. Mesmo possuindo um C_p menor que o das TEEHs, segundo Paraschivoiu 2002, a diferença entre os valores de C_p das duas turbinas não é grande e a performance da turbina Darrieus pode ser melhorada ao se utilizar perfis aerodinâmicos que reduzam o arrasto.

Ao considerar o tipo de malha utilizado em análises numéricas que envolvam turbinas eólicas H. Darrieus, diversos estudos utilizam malhas poliédricas para tal fim. A análise realizada por S. Joo et al., 2015, que estuda as características aerodinâmicas de uma turbina de duas pás com diversos valores de solidez e velocidades de rotação, utiliza uma malha de elementos poliédricos aplicada em um domínio 3D, obtendo resultados de C_p que concordam bem com o comportamento encontrado em resultados experimentais. Outro exemplo do emprego de uma malha poliédrica em um estudo de uma turbina eólica H. Darrieus se encontra no texto de H. Lei et. al., 2016, que realiza uma análise 3D sobre uma turbina de duas pás. Ao comparar os resultados obtidos numericamente com resultados experimentais, um erro relativo mínimo de 4,05% é encontrado para a malha mais refinada. Castelli et. al., 2013 realizam um estudo em 3D sobre uma turbina de três pás a fim de obter a distribuição de pressão sobre as mesmas, a malha poliédrica é empregada pelos autores pois os mesmos afirmam que a mesma resulta em uma redução de 60-70% no número de elementos em relação à uma malha tetraédrica equivalente.

Assim como a malha poliédrica, a malha hexaédrica é empregada com frequência em estudos envolvendo turbinas eólicas H. Darrieus. Rossetti e Pavesi, 2013 desenvolvem uma análise 3D com emprego de malha hexaédrica a fim de estudar a auto-partida de turbinas H. Darrieus. Balduzzi et. al. 2017 utilizam uma malha hexaédrica em uma análise 3D de uma única pá em movimento, procurando relevar os efeitos que a tridimensionalidade proporciona aos resultados numéricos obtidos. Por fim, Li et. al. 2013, dentre as várias análises realizadas em seu texto, utilizam uma malha hexaédrica estruturada na análise de uma pá de uma turbina H. Darrieus. A partir da comparação com resultados experimentais, os autores concluem que o comportamento dos resultados numéricos obtidos com modelo de turbulência $k-\omega$ SST para baixos ângulos de ataque concorda bem com o comportamento da análise experimental.

4. METODOLOGIA

4.1 MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

No Método dos Volumes Finitos (MVF), o domínio computacional delimitado é dividido em um número finito de volumes onde o conjunto de equações de conservação são aplicadas a cada volume, o resultado é um sistema de equações algébricas, uma para cada volume de controle, que é resolvido iterativamente [Maliska, 2004]. O software STAR CCM+, empregado em todas as simulações numéricas realizadas neste texto, utiliza o MVF, sendo este amplamente utilizado na literatura para a resolução de problemas de mecânica dos fluidos.

4.2 MODELAGEM MATEMÁTICA

Ao aplicar o Método dos Volumes Finitos, as equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds (RANS) são resolvidas para escoamento incompressível. A Equação 4.1 é denominada de equação de conservação de massa, onde \bar{u}_i representa a média temporal da

velocidade do escoamento na direção i , u'_i é a flutuação devido aos efeitos da turbulência e x_i representa a direção no espaço. As equações a seguir utilizam a convenção do somatório de Einstein, sendo assim, índices repetidos são índices mudos.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{u}_i + u'_i) = 0 \quad (4.1)$$

A Equação 4.2 representa a equação de conservação de quantidade de movimento, onde ρ é a massa específica do fluido, t é o tempo, \bar{p} é a média temporal da pressão, μ é a viscosidade dinâmica do fluido e $\overline{u'_i u'_j}$ é a perturbação média das flutuações, conhecida como tensor de Reynolds.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\delta \bar{p}}{\delta x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{u'_i u'_j} \quad (4.2)$$

O tensor de Reynolds presente na equação insere novas incógnitas no problema, significando que há mais incógnitas do que equações. Assim, se mostra necessário o emprego de um modelo de turbulência a fim de realizar o fechamento do problema. Neste trabalho, o modelo de turbulência utilizado é o $k-\omega$ SST, mesmo utilizado por Li. et. al., 2013, e melhor descrito na seção 4.2.1.

Por fim, temos a Equação 4.3 que representa o número de Reynolds (Re), um número adimensional que indica se o escoamento é laminar ou turbulento, contribuindo para verificar a semelhança no escoamento de diferentes estudos aerodinâmicos. Onde c é a corda do perfil aerodinâmico, ρ é a massa específica do fluido, μ é a viscosidade dinâmica do fluido e U_∞ é a velocidade do escoamento.

$$Re = \frac{\rho c U_\infty}{\mu} \quad (4.3)$$

4.2.1 Modelo de turbulência $k-\omega$ SST

O modelo de turbulência $k-\omega$ SST (*Shear Stress Transport*) se origina de uma combinação de outros dois modelos de turbulência RANS com o intuito de agregar os pontos positivos de ambos. O primeiro é o modelo $k-\omega$, que resolve com precisão o escoamento próximo à parede e o segundo é o modelo $k-\epsilon$, este sendo mais indicado para escoamentos livres distantes da parede. Sendo assim, o modelo $k-\omega$ SST utiliza o primeiro para regiões próximas à pá, no caso deste trabalho, e utiliza o $k-\epsilon$ em uma formulação $k-\omega$ para as regiões que se encontram além da camada limite onde o escoamento é livre, garantindo assim que os efeitos turbulentos serão modelados de forma eficiente. Menter, 2003, autor que desenvolveu o modelo de turbulência $k-\omega$ SST, afirma que este é considerado promissor para a simulação de escoamentos com gradientes de pressão adverso e separação.

4.2.2 A Turbina Eólica H. Darrieus e Fundamentos Aerodinâmicos

A turbina H. Darrieus, exemplificada na Figura 4.1, consiste normalmente de duas ou três pás, ou asas, que são posicionadas paralelamente por meio de hastes a um eixo de rotação, que se encontra na posição vertical em relação ao solo. Estas pás são caracterizadas por possuírem um perfil aerodinâmico que, a partir do escoamento do vento sobre o mesmo, dá origem a forças aerodinâmicas que quando projetadas sobre a corda da asa resultam em um balanço de forças, este leva a rotação do eixo e conseqüentemente, à geração de torque no mesmo. Produz-se energia a partir deste movimento ao acoplar o eixo à um gerador elétrico.



Figura 4.1 – Exemplo de turbina eólica H. Darrieus de três pás.

A fim de demonstrar os princípios básicos do funcionamento de uma turbina eólica de eixo vertical, se faz uso dos textos de Paraschivoiu, 2004 e de Anderson, 2001. A figura 4.2 demonstra uma esquematização do funcionamento de uma turbina eólica de eixo vertical junto de um perfil aerodinâmico em maiores detalhes.

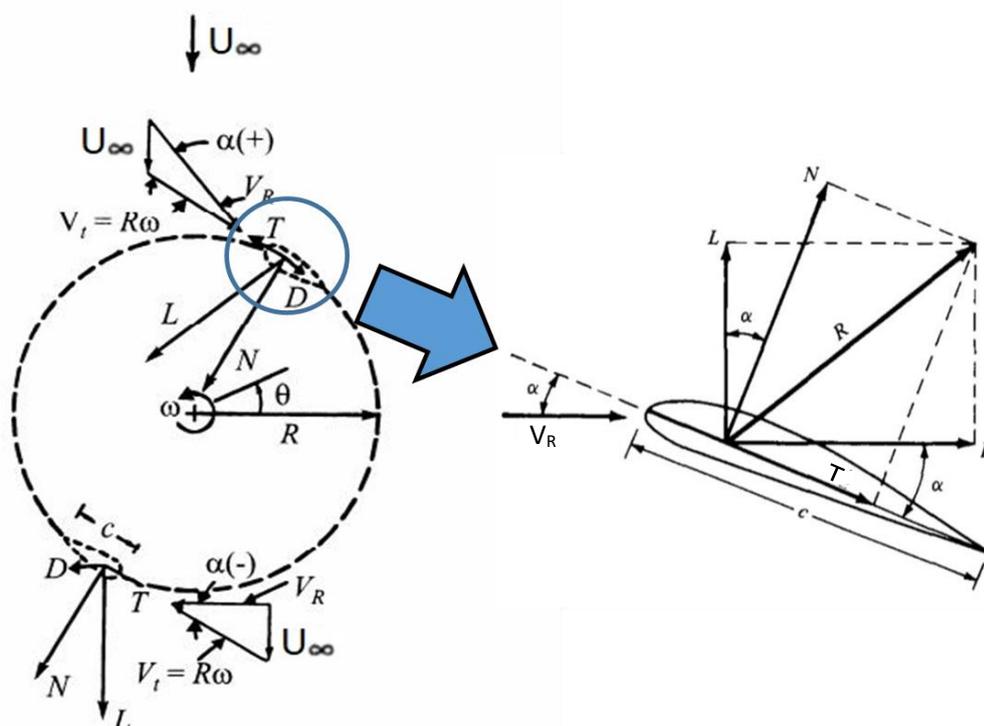


Figura 4.2 – Esquemática do funcionamento básico de uma turbina eólica de eixo vertical e forças aerodinâmicas para um elemento de pá típico [adaptado de Paraschivoiu, 2004 e de Anderson, 2001].

A velocidade tangencial (V_t) e a velocidade de corrente livre (U_∞) dão origem a uma velocidade relativa (V_R) que incide sobre o perfil aerodinâmico com um certo ângulo de ataque (α). Este escoamento sobre o perfil gera forças aerodinâmicas de sustentação (L) e arrasto (D)

que, projetadas nas direções da corda e radial, nos dão a força tangencial (T) e a força normal (N), respectivamente. Quando a força tangencial excede a componente da força de arrasto sobre a corda da asa, o torque aerodinâmico da turbina completa é obtido pela integração das forças aerodinâmicas ao longo do comprimento de cada pá para uma rotação completa [Paraschivoiu, 2004].

É possível ainda, a partir das forças aerodinâmicas encontradas em um elemento de pá, obter expressões para os coeficientes aerodinâmicos. Segue desenvolvimento adaptado de Anderson, 2001: devido à distribuição de pressão e da tensão de cisalhamento, temos como resultado uma força aerodinâmica R que incide sobre o corpo. Esta força pode então ser dividida em dois componentes, por definição: a força de sustentação (L) e a força de arrasto (D). Também por definição, temos a força tangencial (T) e a força normal (N) ao corpo. O ângulo de ataque (α) é definido como o ângulo entre a corda (c) e a velocidade relativa (V_R), ao se considerar um elemento de pá de uma turbina eólica de eixo vertical. Portanto, α também é o ângulo entre L e N assim como entre D e T. As relações geométricas entre estes conjuntos são expressadas pelas Equações 4.4 e 4.5:

$$L = N \cos \alpha - T \sin \alpha \quad (4.4)$$

$$D = N \sin \alpha + T \cos \alpha \quad (4.5)$$

A pressão dinâmica (q_∞) é definida pela Equação 4.6, onde ρ é a massa específica:

$$q_\infty = \frac{1}{2} \rho V_R^2 \quad (4.6)$$

Considerando S como a área de referência, temos o coeficiente de sustentação na Equação 4.7 e o coeficiente de arrasto na Equação 4.8.

$$C_L = \frac{L}{q_\infty S} \quad (4.7)$$

$$C_D = \frac{D}{q_\infty S} \quad (4.8)$$

4.3 MODELAGEM COMPUTACIONAL

4.3.1 Função de Interpolação, Método para Acoplamento Pressão/Velocidade e Método Iterativo

As funções de interpolação no Método dos Volumes Finitos são utilizadas na aproximação dos fluxos nas interfaces dos volumes de controle, ou seja, os valores das variáveis armazenadas nas faces dos volumes de controle são expressos por meio destas funções de interpolação, permitindo assim, obter estes valores no local de interesse. O esquema de interpolação empregado neste trabalho é o de Segunda Ordem Upwind [Maliska, 2004].

A fim de resolver o sistema de equações algébricas, adota-se a solução segregada, onde os sistemas lineares são resolvidos um a um, atualizando os coeficientes. Como é adotada a hipótese de escoamento incompressível para o estudo realizado neste trabalho, a solução segregada exige a utilização de um método para acoplamento dos campos de pressão e velocidade, pois a variável de pressão não possui uma equação evolutiva a ser avançada. Existem diversos métodos para tratamento deste acoplamento, sendo que o objetivo de todos é criar uma equação para a pressão que permita que o processo iterativo avance, respeitando a conservação da massa. Neste trabalho, o método empregado é o SIMPLE (*Semi Implicit Linked Equations*), que se desenvolve em dois passos: no primeiro, as velocidades são corrigidas a

fim de satisfazer a equação da conservação de massa, como particularidade deste método, as equações para a correção das velocidades são obtidas a partir das equações do movimento; no segundo passo, as pressões são avançadas para completar o ciclo iterativo. Uma das vantagens do SIMPLE é o fato de não ser necessária a solução de um sistema linear para determinar a pressão. Entretanto, a velocidade de convergência é pequena [Maliska, 2004].

O método iterativo utilizado neste trabalho para resolver o sistema de equações algébricas lineares oriundo das equações diferenciais aplicadas em cada volume de controle é o método de Gauss Seidel. Este método pertence à classe dos métodos ponto a ponto, resolvendo o sistema linear ao iterativamente visitar equação por equação usando os valores das variáveis do nível iterativo anterior, como diferencial, durante o mesmo ciclo iterativo, o método de Gauss Seidel utiliza valores de variáveis já calculadas neste ciclo [Maliska, 2004].

4.3.2 Critério de Parada

Em relação ao método iterativo já discutido na sessão anterior, consideramos que a solução fornecida pelo mesmo é válida quando a diferença entre os valores obtidos iterativamente pelo método chegue à 10^{-6} ou após a execução de 100 iterações dentro do mesmo passo de tempo.

Segundo Li. et. al. 2013, o passo de tempo é um parâmetro crucial em simulações transientes. O passo de tempo (Δt) adotado neste estudo, calculado conforme Equação 4.9, é o mesmo utilizado por Li. et. al., 2013, que por sua vez o obtém da formulação sugerida por Sørensen et. al., 2004 e Travin et. al., 2000, onde o passo de tempo adimensional (T) é de 0,01 e 0,025, respectivamente.

$$T = \Delta t U_{\infty} / c \quad (4.9)$$

O critério de parada temporal adotado corresponde a 0,2s, o tempo necessário para uma partícula percorrer todo o comprimento do domínio computacional por pelo menos uma vez.

4.3.3 Geometria, Domínio Computacional e Condições de Contorno

A geometria do problema consiste em um elemento de pá de uma turbina eólica H. Darrieus com perfil aerodinâmico NACA0018, apresentado na Figura 4.3. A pá possui uma corda de 0,10m e envergadura de 0,20m. O ângulo de ataque, que é definido como o ângulo entre a corda do perfil aerodinâmico e a direção da velocidade de entrada (U_{∞}), é fixo para toda a simulação numérica em 10° para fins de comparação com o estudo de Li. et. al., 2013.

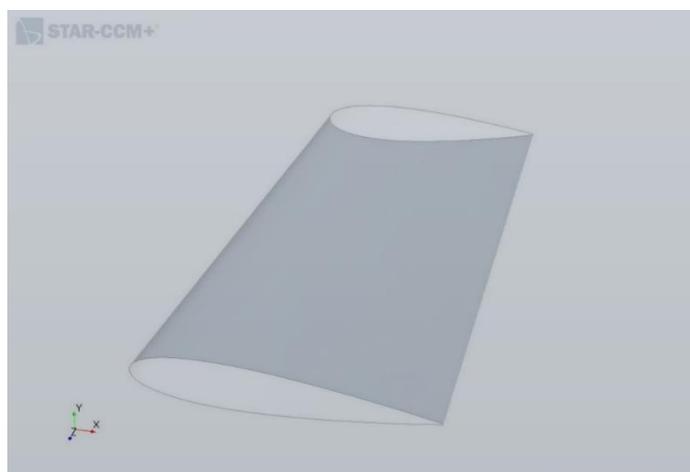


Figura 4.3 – Modelo 3D da pá com perfil NACA 0018.

A Figura 4.4 demonstra o domínio computacional empregado, mesmo utilizado por Li. et. al., 2013, sendo este definido por um cilindro com raio igual a trinta vezes o comprimento da corda do perfil e altura igual a duas vezes do mesmo comprimento de corda, a pá é posicionada no centro do domínio de forma que sua envergadura se encontre paralela à altura do cilindro. Sendo assim, por ter altura igual à envergadura da pá, o domínio desconsidera os efeitos de ponta de pá, porém ainda mantém outros efeitos aerodinâmicos importantes para a análise aerodinâmica do perfil por não desprezar a envergadura do perfil aerodinâmico à exemplo de uma análise 2D. A topologia de malha aplicada neste estudo é do tipo “O”, mesma empregada por Li. et al, 2013.

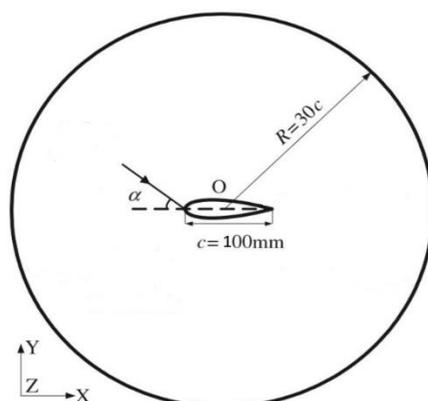


Figura 4.4 – Esquema do Domínio Computacional [adaptado de Li. et. al., 2013].

A Figura 4.5 demonstra o domínio gerado no software STAR CCM+ com as devidas condições de contorno aplicadas. Todo o entorno do domínio, ou seja, a face lateral do cilindro (área vermelha), é considerado como entrada de velocidade, enquanto que as outras duas faces (áreas azuis) são consideradas como paredes de deslizamento (*slip wall*), ou seja, não existem forças de cisalhamento em decorrência do escoamento do fluido nestas paredes e o valor da velocidade na parede é calculado pela extrapolação da componente paralela da velocidade no elemento adjacente. Por fim, a superfície da pá (área sobre a pá no centro do domínio) é definida como parede sem deslizamento (*no-slip wall*), o que significa que nesta parede existem forças cisalhantes decorrentes do escoamento e que a velocidade tangencial é explicitamente definida como sendo igual a zero [Star CCM+, 2017].

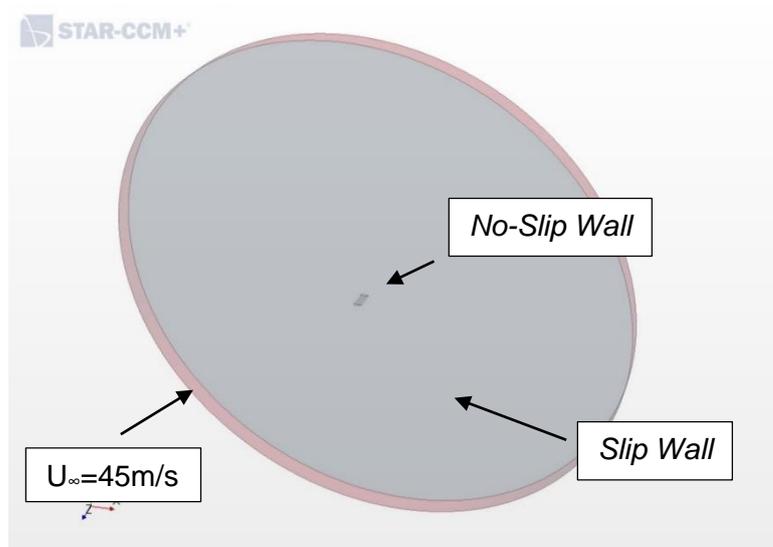


Figura 4.5 – Domínio computacional e condições de contorno.

Um dos aspectos importantes a fim de realizar uma comparação válida entre estudos aerodinâmicos distintos é a semelhança do número de Reynolds (Re) entre os mesmos, sendo assim, considerando um comprimento de corda (c) de 0,1m, massa específica (ρ) igual a $1,21\text{kg/m}^3$ e viscosidade dinâmica (μ) igual a $1,81 \times 10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s}$, ao aplicar estes valores na Equação 4.3 e assumindo uma velocidade de entrada (U_∞) igual à 45m/s, obtém-se como resultado um número de Reynolds (Re) próximo de 300.000, valor utilizado no estudo de Li. et. al., 2013.

4.3.4 Discretização Espacial e Temporal

As três malhas criadas sobre o domínio computacional já mencionado são formadas por elementos poliédricos. As malhas criadas com elementos poliédricos, ou malhas poliédricas, são relativamente fáceis e eficientes de se construir, não requerem tanta preparação da superfície inicial como as malhas tetraédricas e também possuem aproximadamente cinco vezes menos elementos do que estas para uma mesma superfície. O modelo de malha poliédrico utiliza um elemento poliédrico de formato arbitrário a fim de construir a malha central. No software STAR-CCM+, um esquema de dualização especial é utilizado para criar a malha poliédrica a partir de uma malha tetraédrica subjacente, que é automaticamente criada como parte do processo. O software calcula a contagem inicial de células a partir desta malha tetraédrica subjacente [STAR CCM+, 2017].

A malha poliédrica é uma malha não estruturada, isso significa que ela é mais flexível, facilitando a discretização de geometrias mais complexas. Entretanto, por não apresentar uma estrutura organizada, como demonstrado na Figura 4.6 (a), não existe uma forma direta de conectar várias entidades (elementos, faces, nós) a partir de um índice somente, por exemplo, de um elemento. Portanto, uma informação topológica detalhada sobre elementos, faces e nós é necessário para complementar a indexação global da malha. No estudo realizado por Li. et. al., 2013, a malha empregada é do tipo hexaédrica estruturada. Na malha estruturada, todo elemento interior no domínio é conectado ao mesmo número de elementos vizinhos. Como demonstrado na Figura 4.6 (b), esses elementos vizinhos podem ser identificados ao se utilizar os índices i , j , e (k) nas direções de coordenadas x , y e (z), respectivamente, e podem ser acessados diretamente ao aumentar ou diminuir os respectivos índices. Isso permite um menor uso de memória já que a informação topológica está incorporada na estrutura da malha através do sistema de indexação [Moukalled et. al., 2016].

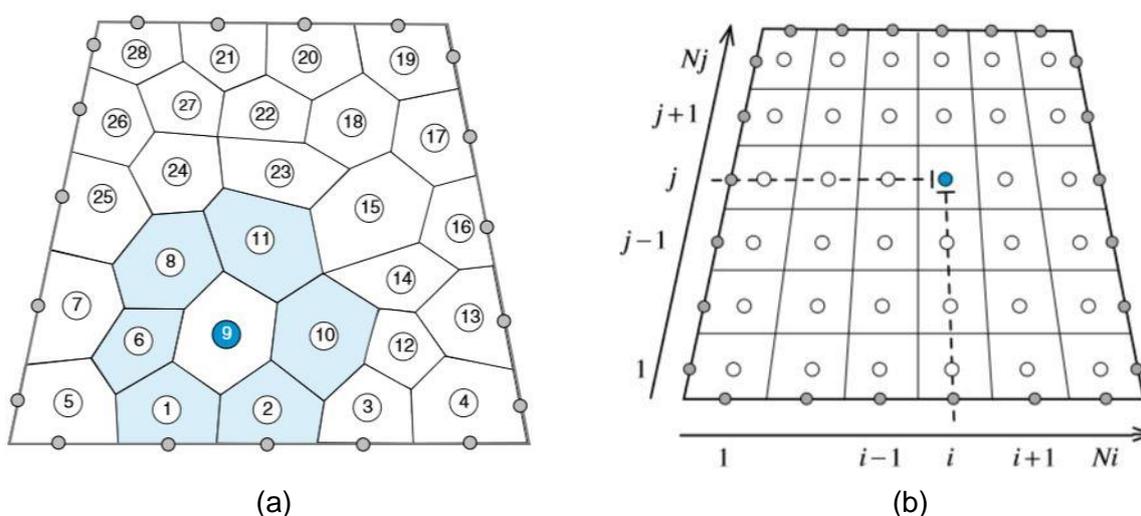


Figura 4.6 – Tipos de malha: (a) indexação global de malha não estruturada e (b) índices locais e topologia de malha estruturada [adaptado de Moukalled et. al., 2016].

O domínio computacional é discretizado em três malhas de distintos refinamentos, uma malha de refinamento grosso (M3), uma malha de refinamento médio (M2) e por fim uma malha de refinamento fino (M1), esta demonstrada na Figura 4.7.

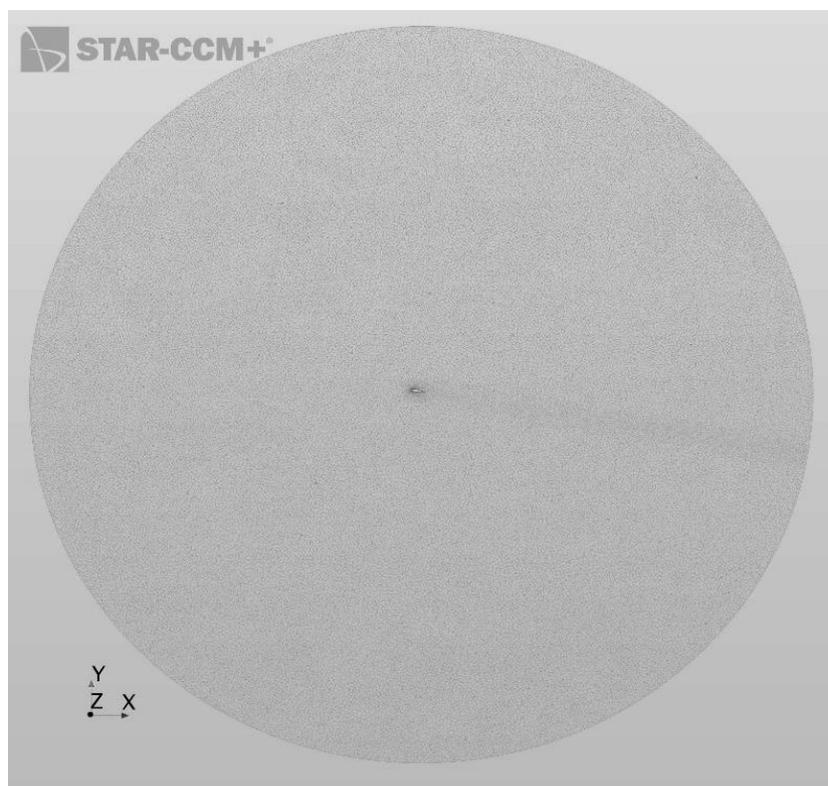


Figura 4.7 – Visão geral da malha M1.

Ao construir cada malha, altera-se os valores de tamanho base, tamanho mínimo e razão de crescimento à cada refinamento, proporcionando assim uma malha mais ou menos refinada. Na Tabela 4.1, é possível comparar estes parâmetros empregados na geração de cada malha, assim como o número de elementos resultante de tais variáveis. Para efeitos de comparação, a malha empregada no estudo de Li. et. al., 2013 possui aproximadamente 1.400.000 elementos.

Tabela 4.1 – Parâmetros pertinentes às malhas geradas.

Malha	Tamanho Base (m)	Tamanho Mín. (m)	Razão de Crescimento	Nº Elementos
M1	0,02	0,016	1,2	4308309
M2	0,03	0,024	1,3	2035934
M3	0,05	0,040	1,4	950921

Além dos elementos poliédricos já mencionados, há outro fator que contribui para a o refinamento de cada malha construída. Devido à importância que a região próxima à parede da pá possui em consequência dos fenômenos aerodinâmicos que ali ocorrem, se implementa junto à parede não deslizante uma camada de elementos prismáticos, demonstrada em maiores detalhes na Figura 4.8, o que proporciona uma maior sensibilidade no tratamento da camada limite. Deste modo, os valores obtidos para os coeficientes aerodinâmicos, que são especialmente dependentes da solução do escoamento muito próximo à parede, são afetados diretamente pelo refinamento da camada prismática.

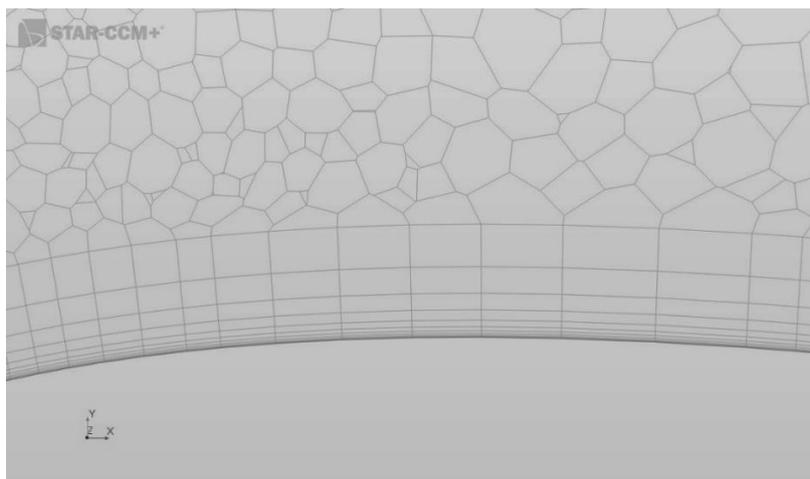


Figura 4.8 – Detalhe da camada prismática sobre a pá na malha M1.

Ao construir a camada prismática para cada malha, define-se o número de camadas, razão de crescimento, espessura da primeira camada e espessura total da camada prismática. Sendo assim, os diferentes parâmetros da camada prismática implementados para cada uma das três malhas de diferentes refinamentos construídas neste estudo são demonstrados na Tabela 4.2. No Apêndice A, se encontram figuras da malha poliédrica M1 em maiores detalhes junto de uma comparação com a malha hexaédrica estruturada gerada por Li. et. al., 2013.

Tabela 4.2 –Parâmetros pertinentes à camada prismática para cada malha gerada.

Malha	Nº de camadas	Razão de Crescimento	Espessura da 1º Camada (m)	Espessura Total (m)
M1	15	1,3	1,0E-6	1,7E-4
M2	12	1,3	1,0E-5	7,4E-4
M3	10	1,3	9,0E-5	3,8E-3

Por se tratar de uma simulação em regime transiente, emprega-se a equação 4.9 a fim de encontrar um valor adequado para o passo de tempo a ser aplicado no problema. A partir das sugestões disponíveis na literatura, melhor explicadas na seção 4.3.2, decide-se por usar um passo de tempo adimensional (T) igual à 0,0225, resultando em um passo de tempo (Δt) de 0,00005s.

Este passo de tempo é utilizado durante toda a simulação até que se atinja o critério de parada temporal de 0,2s.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Sendo o objetivo deste trabalho a comparação entre dois tipos diferentes de malhas aplicadas no mesmo problema ao utilizar o método empregado por Li. et. al., 2013, nesta seção são discutidos os resultados obtidos a partir da comparação entre os estudos. Em um primeiro momento, se estuda a influência do refinamento da malha nos resultados obtidos, assim verificando a eficiência da mesma ao tratar do problema. Posteriormente, realiza-se uma discussão frente a comparação dos resultados numéricos obtidos por Li. et. al., 2013 e os valores encontrados neste trabalho, com foco nos dois tipos de malha empregados. Por fim, são apresentadas as conclusões finais sobre o trabalho e sugestões de estudos futuros.

5.1 COEFICIENTES AERODINÂMICOS OBTIDOS E ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO REFINAMENTO DE MALHA

A partir da análise numérica realizada com os parâmetros anteriormente discutidos, foram obtidos valores para os coeficientes de sustentação (C_L) e de arrasto (C_D) da pá para cada uma das três malhas geradas. A Tabela 5.1 contém estes resultados.

Nas Figuras 5.1 e 5.2, se apresenta a evolução das soluções conforme o tempo físico para C_L e C_D , respectivamente, para a malha M1.

Tabela 5.1 – Coeficientes aerodinâmicos obtidos para cada malha.

Malha	C_L	C_D
M1	1,04883	0,03029
M2	1,04523	0,02848
M3	1,07691	0,03900

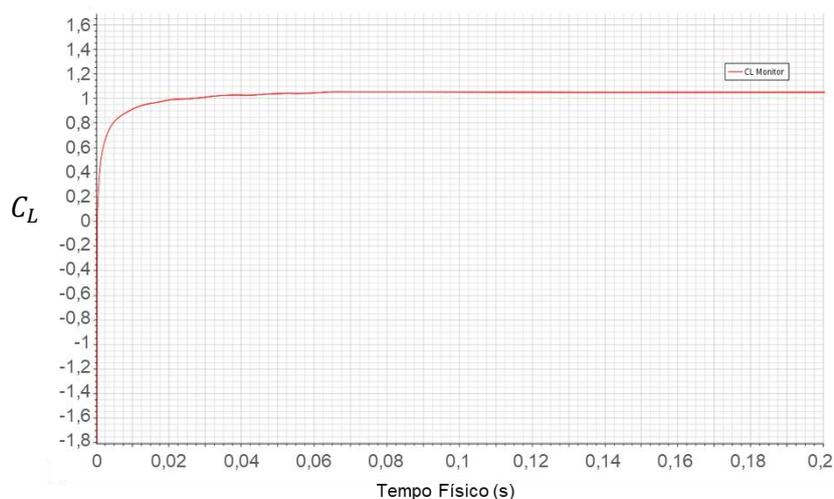


Figura 5.1 – Comportamento de C_L conforme o avanço do tempo físico para a malha M1.



Figura 5.2 - Comportamento de C_D conforme o avanço do tempo físico para a malha M1.

Ao observar o comportamento dos coeficientes aerodinâmicos ao longo do tempo por meio das curvas demonstradas nas Figuras 5.1 e 5.2, pode-se concluir que os resultados convergiram para uma solução estável rapidamente em todas as malhas.

As figuras com os gráficos do comportamento da solução em relação ao tempo físico para as malhas M2 e M3 se encontram no Apêndice B.

Com base nos resultados obtidos para cada malha, e considerando que a cada refinamento de malha espera-se chegar a um resultado mais próximo do experimental em relação ao refinamento anterior, torna-se necessário a realização de uma avaliação sobre a influência que o refinamento possui sobre os resultados gerados, a fim de obter, desse modo, um indicativo sobre a qualidade da malha empregada.

Os resultados experimentais utilizados para tal fim são os obtidos por Claessens, 2006, que encontrou valores de 0,95008 para o coeficiente de sustentação e 0,03289 para o coeficiente de arrasto. Devido a Li. et. al., 2013 utilizarem tais resultados experimentais na comparação com seus resultados numéricos em seu estudo, estes se tornam válidos para a análise da influência do refinamento de malha realizada deste trabalho.

Na Tabela 5.2 se encontram as diferenças calculadas entre os resultados obtidos por cada malha e os valores experimentais de Claessens, 2006. Se tratando do coeficiente de sustentação (C_L), entre as malhas geradas a malha M2 foi a que obteve o melhor resultado, apresentando uma diferença de 9,103% em relação ao resultado experimental. Entre as malhas M3 e M2 houve uma redução da diferença, enquanto que entre as malhas M2 e M1 houve um aumento da mesma. Sobre as diferenças encontradas para o coeficiente de arrasto (C_D), a malha M1 foi a que obteve o melhor resultado, apresentando uma diferença mínima de -8,584% em relação ao resultado experimental. Entre as malhas M3 e M2 houve uma redução da diferença assim como entre as malhas M2 e M1.

Apesar de o comportamento entre as malhas M2 e M1 mudar entre os dois coeficientes aerodinâmicos, é evidente que a diferença entre as mesmas é maior sobre os valores de C_D , com 6,9% entre as diferenças encontradas para cada malha, em comparação a -0,312% encontrado para as mesmas sobre os valores de C_L . Sendo assim, ao levar em consideração ambos os coeficientes aerodinâmicos, a malha M1 obteve as menores diferenças e, conseqüentemente, os melhores resultados. A Figura 5.3, que contém os gráficos de comparação entre os valores experimentais de Claessens, 2006 e valores numéricos obtidos neste trabalho, contribui para o entendimento que a influência do refinamento de malha tem sobre as diferenças encontradas.

Tabela 5.2 – Diferença entre os resultados de coeficientes aerodinâmicos obtidos para cada malha e resultados experimentais obtidos por Claessens, 2006.

Malha	Diferença C_L (%)	Diferença C_D (%)
M1	9,415	-8,584
M2	9,103	-15,484
M3	11,777	15,667



Figura 5.3 – Comparação dos resultados experimentais de Claessens, 2006 (em preto) com os resultados numéricos obtidos neste trabalho (em azul).

Ao atestar uma redução das diferenças nos resultados de coeficientes aerodinâmicos obtidos a partir do refinamento de malha aplicado neste trabalho, conclui-se que o refinamento

resultou em uma aproximação dos resultados numéricos em relação aos resultados experimentais. Ainda, devido à semelhança dos mesmos, pode-se considerar a malha poliédrica empregada como válida na resolução do problema proposto.

5.2 DISCUSSÃO SOBRE A COMPARAÇÃO DE ESTUDOS

Como discutido em maiores detalhes na seção 4.3.4, ao realizar a escolha do tipo de malha a ser empregado em uma análise numérica, vários parâmetros da mesma tendem a ser influenciados por tal escolha. Sendo assim, é de interesse realizar uma comparação entre os resultados obtidos neste trabalho a partir do emprego de uma malha poliédrica, em relação à malha hexaédrica estruturada utilizada na análise de Li. et. al., 2013. A partir da semelhança com que a análise numérica deste trabalho foi desenvolvida em relação à realizada por Li. et. al., 2013, pode-se atribuir qualquer diferença existente entre os resultados obtidos por ambos os estudos à fatores atribuídos à malha empregada. Para tal fim de comparação, os valores experimentais de Claessens, 2006 são assumidos como base para a qualidade dos resultados numéricos, ou seja, quanto mais próximos estes se encontram dos resultados experimentais, melhor o resultado numérico obtido.

Como discutido na sessão 5.1, a malha M1 apresentou os melhores resultados se levado em consideração ambos os coeficientes aerodinâmicos, portanto os valores obtidos por esta malha são utilizados na comparação com os valores de coeficientes aerodinâmicos obtidos na análise numérica de Li. et. al., 2013, sendo estes de 0,89445 para o coeficiente de sustentação e de 0,03222 para o coeficiente de arrasto.

A Tabela 5.3 demonstra as diferenças dos resultados obtidos pelas análises numéricas citadas acima em relação aos obtidos pela análise experimental de Claessens, 2006. Ambas as diferenças dos coeficientes aerodinâmicos de Li. et. al., 2013 são menores do que as encontradas neste estudo, sendo que este fato é mais pronunciado no coeficiente de arrasto (C_D), onde há uma diferença de 6,505% entre as diferenças dos resultados numéricos em relação aos resultados experimentais, do que no coeficiente de sustentação (C_L), onde há uma diferença de 3,196% entre as diferenças dos resultados numéricos em relação aos resultados experimentais. A Figura 5.2 realiza uma comparação entre os resultados dos coeficientes aerodinâmicos obtidos para os três estudos já comentados.

Tabela 5.3 – Diferenças de coeficientes aerodinâmicos obtidos pelas análises numéricas deste trabalho e de Li. et. al., 2013 em relação aos resultados experimentais de Claessens, 2006.

Estudo Numérico	Diferença C_L (%)	Diferença C_D (%)
M1	9,415	-8,584
Li. et. al., 2013	-6,219	-2,079

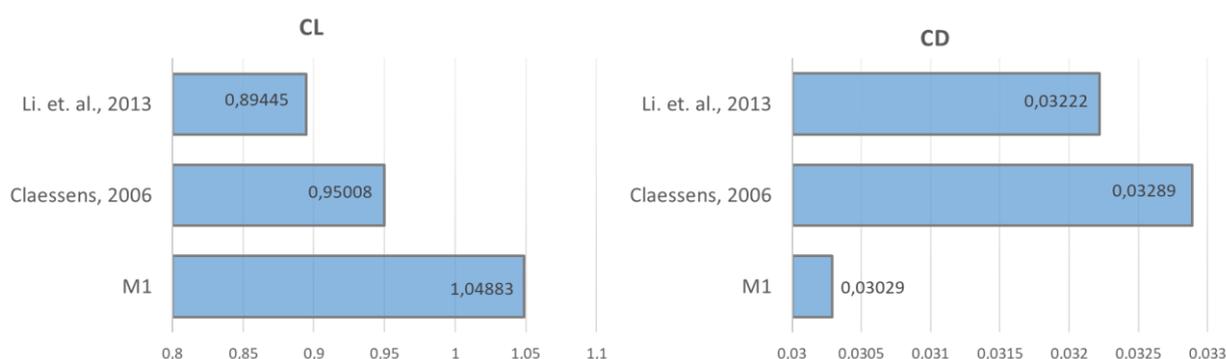


Figura 5.2 - Comparação entre os resultados obtidos de coeficientes aerodinâmicos para os estudos discutidos.

Sendo assim, apesar de a malha poliédrica ser uma opção válida para a resolução do problema em questão, a malha hexaédrica estruturada mostrou melhores resultados neste caso, pois os mesmos se encontram mais próximos dos resultados experimentais. Ainda é interessante destacar que além de apresentar melhores resultados, a malha de Li. et. al., 2013 possui menos elementos, aproximadamente 1,4 milhões, em relação à malha M1 utilizada para esta comparação, esta com 4,3 milhões de elementos, o que na maioria dos casos significa uma economia em recursos computacionais. Deste modo, a malha hexaédrica estruturada obteve um melhor desempenho no problema específico considerado neste trabalho.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho, utiliza-se a dinâmica dos fluidos computacional para a realização de uma análise numérica sobre um elemento de pá de uma turbina H. Darrieus à exemplo da metodologia aplicada por Li. et. al., 2013, empregando uma malha poliédrica em contrapartida à malha hexaédrica estruturada utilizada pelos autores, espera-se comparar os coeficientes aerodinâmicos obtidos pelos dois tipos de malha a fim de avaliar o desempenho de ambas na resolução do problema específico.

Primeiramente, são criadas três malhas de diferentes refinamentos ao aplicar os parâmetros utilizados no método utilizado por Li. et. al., 2013, excluindo o tipo de malha empregado. Sendo assim, a semelhança entre os dois estudos garante que as diferenças nos resultados obtidos se dão somente por parâmetros relacionados as malhas utilizadas.

A fim de estudar a qualidade de malha, é feita uma análise sobre a influência do refinamento de malha utilizado. Para tanto, os resultados de coeficientes aerodinâmicos obtidos para cada malha são comparados com resultados experimentais de Claessens, 2006, onde a partir da afirmação que a malha mais refinada é a que possui os melhores resultados ao considerar ambos os coeficientes aerodinâmicos, conclui-se que o refinamento aplicado aproxima os resultados numéricos dos experimentais e que, por ambos serem semelhantes, a malha poliédrica é válida para a resolução do problema específico.

Por fim, é realizada uma comparação dos resultados obtidos neste estudo com os resultados obtidos por Li. et. al., 2013. Para tal, as diferenças entre os resultados numéricos de ambos os estudos e os resultados experimentais são comparadas, assim que, ao considerar os resultados experimentais como base para a qualidade dos resultados numéricos, quanto mais próximos estes se encontram dos resultados experimentais, melhor o resultado numérico obtido. Com base nessa afirmação, conclui-se que apesar de a malha poliédrica ser uma opção válida para o problema em questão, os resultados para ambos os coeficientes aerodinâmicos obtidos pela malha hexaédrica estruturada de Li. et. al., 2013 são melhores, pois se encontram mais próximos dos resultados experimentais. Assim, conclui-se que a malha hexaédrica estruturada obteve um melhor desempenho no problema tratado neste trabalho.

É importante destacar que ainda que os resultados obtidos por este estudo mostrem um melhor desempenho da malha hexaédrica estruturada em contrapartida a malha poliédrica, esta conclusão é válida somente para o problema específico deste trabalho, o que abre espaço para estudos futuros, onde a aplicação de ambos os tipos de malhas em diferentes casos, com geometrias mais complexas, em três dimensões ou com diferentes ângulos de ataque, por exemplo, pode levar a conclusões mais aprofundadas sobre o tema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, J. D. Fundamentals of aerodynamics, Aeronautical and aerospace engineering Series. 2001.

BALDUZZI, Francesco et al. Darrieus wind turbine blade unsteady aerodynamics: a three-dimensional Navier-Stokes CFD assessment. Energy, v. 128, p. 550-563, 2017.

CASTELLI, Marco Raciti et al. Numerical evaluation of aerodynamic and inertial contributions to Darrieus wind turbine blade deformation. **Renewable Energy**, v. 51, p. 101-112, 2013.

CLAESSENS, M. C. The design and testing of airfoils for application in small vertical axis wind turbines. **Master of Science Thesis**, 2006.

ERIKSSON, Sandra; BERNHOFF, Hans; LEIJON, Mats. Evaluation of different turbine concepts for wind power. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, n. 5, p. 1419-1434, 2008.

HOWELL, Robert et al. Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine. **Renewable energy**, v. 35, n. 2, p. 412-422, 2010.

JOO, Sungjun; CHOI, Heungsoap; LEE, Juhee. Aerodynamic characteristics of two-bladed H-Darrieus at various solidities and rotating speeds. **Energy**, v. 90, p. 439-451, 2015

LEI, Hang et al. Three-dimensional Improved Delayed Detached Eddy Simulation of a two-bladed vertical axis wind turbine. **Energy Conversion and Management**, v. 133, p. 235-248, 2017.

LI, Chao et al. 2.5 D large eddy simulation of vertical axis wind turbine in consideration of high angle of attack flow. **Renewable energy**, v. 51, p. 317-330, 2013.

MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. LTC, 2ª Edição, Rio de Janeiro, 2004.

MENTER, Florian R.; KUNTZ, Martin; LANGTRY, Robin. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. **Turbulence, heat and mass transfer**, v. 4, n. 1, p. 625-632, 2003.

MOUKALLED, F. et al. The finite volume method in computational fluid dynamics. 2016.

PARASCHIVOIU, Ion. **Wind turbine design: with emphasis on Darrieus concept**. Presses inter Polytechnique, 2002.

ROSSETTI, A.; PAVESI, G. Comparison of different numerical approaches to the study of the H-Darrieus turbines start-up. **Renewable Energy**, v. 50, p. 7-19, 2013.

SORENSEN, N. N. et al. Drag prediction for blades at high angle of attack using CFD. **TRANSACTIONS-AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS JOURNAL OF SOLAR ENERGY ENGINEERING**, v. 126, n. 4, p. 1011-1016, 2004.

STAR CCM+. **Metodologia**. CD-adapco, 2017.

TRAVIN, A. et al. Physical and numerical upgrades in the detached-eddy simulation of complex turbulent flows. In: *Advances in LES of complex flows*. Springer Netherlands, 2002. p. 239-254.

APÊNDICE A – Detalhes da malha M1 junto de comparativo com a malha gerada por Li. et. al., 2013.

A Figura A.1 demonstra uma comparação entre a malha hexaédrica estruturada gerada por Li. et. al., 2013 com foco na malha em torno da pá (a) e sobre a pá (b), e a malha poliédrica M1 gerada neste estudo com foco na malha em torno da pá (c) e sobre a pá (d).

A Figura A.2 demonstra a malha M1 gerada neste estudo com foco na interação entre a camada prismática e os elementos poliédricos.

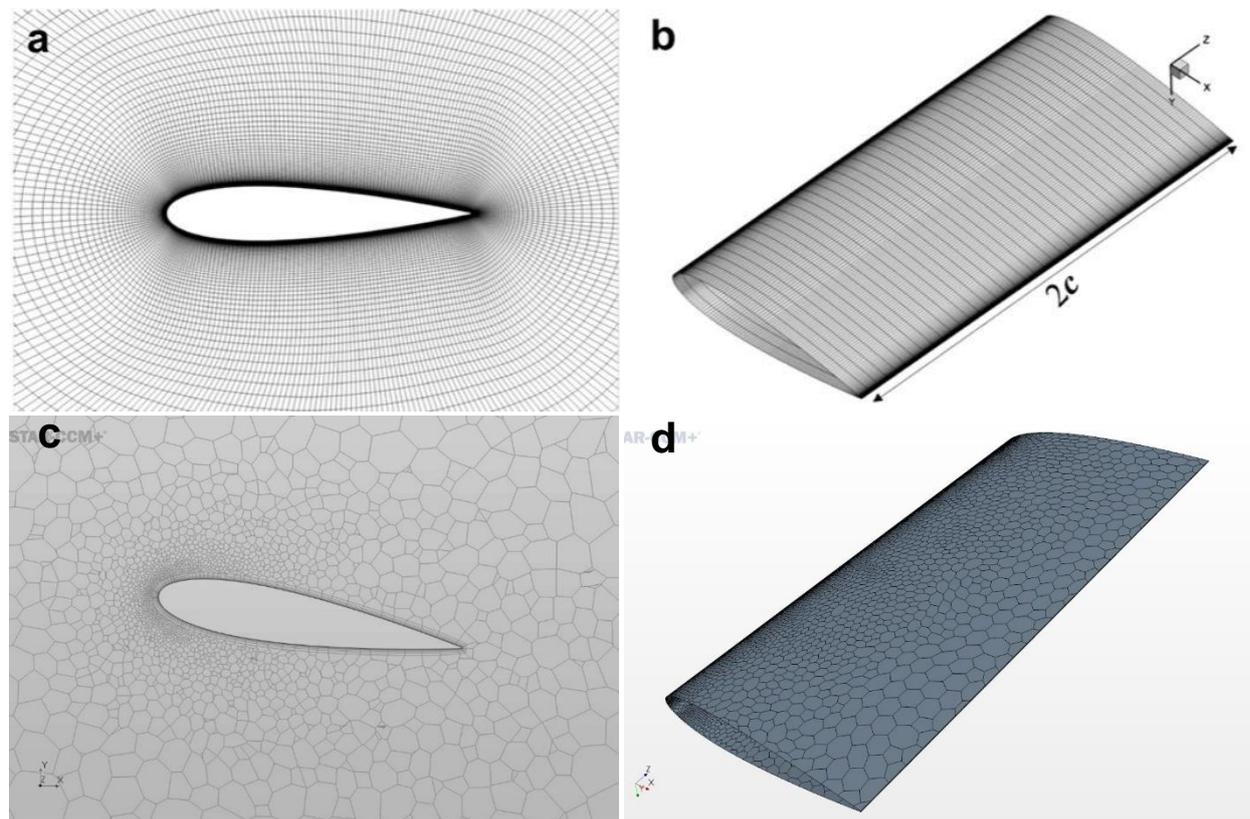


Figura A.1 – Comparação entre malhas: (a) malha hexaédrica estruturada em torno da pá, (b) malha hexaédrica estruturada sobre a pá, (c) malha poliédrica em torno da pá e (d) malha poliédrica sobre a pá.

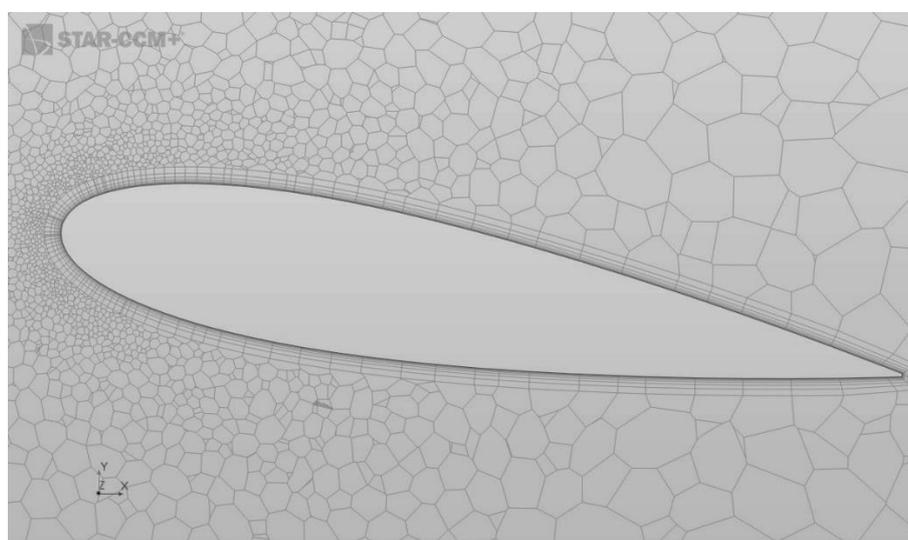


Figura A.2 – Camada prismática sobre a pá na malha M1.

APÊNDICE B – Curvas do desenvolvimento dos valores de coeficientes aerodinâmicos ao longo do tempo.

As Figuras B.1 e B.2 demonstra as curvas do desenvolvimento dos valores do coeficiente de sustentação (C_L) e do coeficiente de arrasto (C_D), respectivamente, ao longo do tempo físico para a malha M2, as Figuras B.3 e B.4 demonstram o mesmo conteúdo para a malha M3.

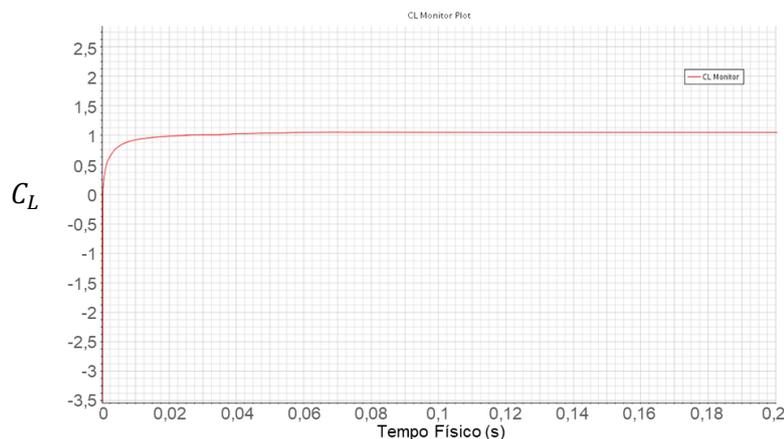


Figura B.1 - Comportamento de C_L conforme o avanço do tempo físico para a malha M2.

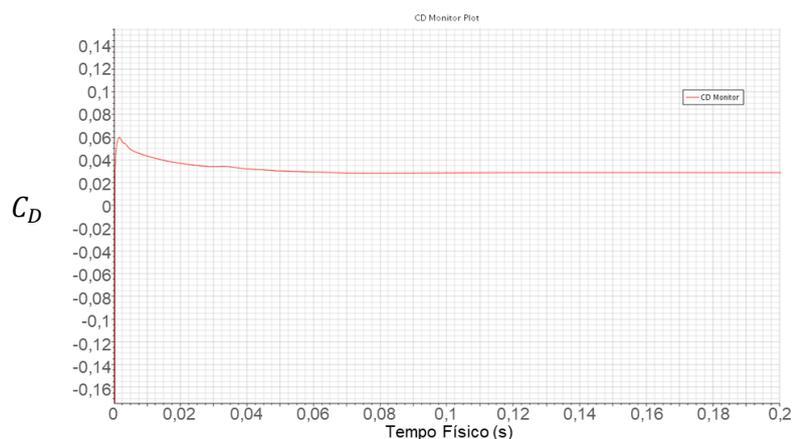


Figura B.2 - Comportamento de C_D conforme o avanço do tempo físico para a malha M2.

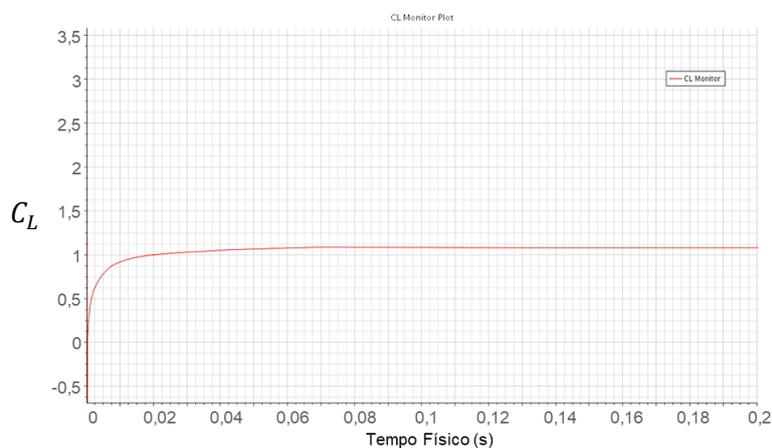


Figura B.3 - Comportamento de C_L conforme o avanço do tempo físico para a malha M3.

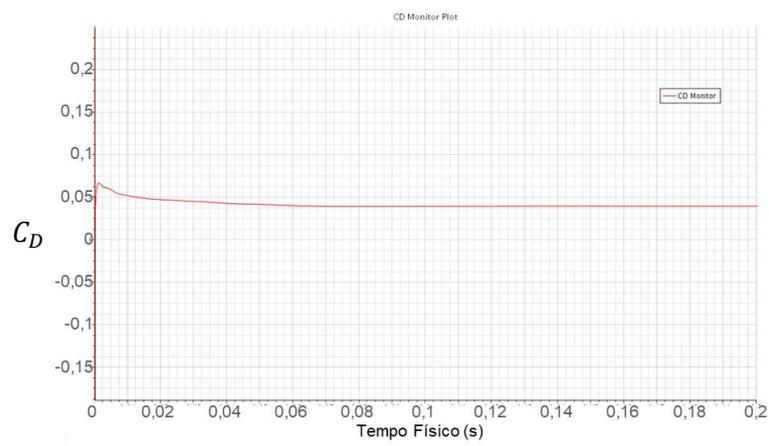


Figura B.4 - Comportamento de C_D conforme o avanço do tempo físico para a malha M2.