



LUÍS MANUEL GOMES

Licenciatura em Engenharia Mecânica

**SOBRE O DESENVOLVIMENTO E UTILIZAÇÃO
DE UM MODELO DE TESTES PARA
IDENTIFICAÇÃO DE DANO EM PÁS DE
TURBINAS EÓLICAS**

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa
Setembro, 2024



NOVA

NOVA SCHOOL OF
SCIENCE & TECHNOLOGY

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA E INDUSTRIAL

SOBRE O DESENVOLVIMENTO E UTILIZAÇÃO DE UM MODELO DE TESTES PARA IDENTIFICAÇÃO DE DANO EM PÁS DE TURBINAS EÓLICAS

LUÍS MANUEL GOMES

Licenciatura em Engenharia Mecânica

Orientador: Tiago Alexandre Narciso da Silva

Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa

Júri

Presidente: Rui Fernando dos Santos Pereira Martins

Professor Associado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de

Lisboa

Arguente: Cláudia Dias Sequeira

Professora Adjunta, Instituto Superior de Engenharia, Universidade do Algarve

Vogal: Tiago Alexandre Narciso da Silva

Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa

Setembro, 2024

SOBRE O DESENVOLVIMENTO E UTILIZAÇÃO DE UM MODELO DE TESTES PARA IDENTIFICAÇÃO DE DANO EM PÁS DE TURBINAS EÓLICAS

Copyright © Luís Manuel Gomes, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Dedico esta dissertação à minha mãe, *Rosalina Segunda*, cuja força, amor incondicional e apoio constante foram fundamentais ao longo da minha jornada acadêmica. A sua dedicação e coragem inspiraram-me a superar desafios e a seguir os meus sonhos. Esta conquista é tão sua quanto minha.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus Pai Todo-Poderoso, pela saúde e bênção que me permitiram realizar esta jornada.

Quero expressar a minha sincera gratidão ao meu professor e orientador, Tiago Silva, pelo seu encorajamento, força e apoio constante desde a escolha do tema da dissertação até à sua conclusão. Agradeço por estar sempre disponível, mesmo que por breves momentos, para esclarecer as minhas dúvidas. O professor compreendeu os meus objetivos, abraçou-me e caminhou comigo, especialmente nos momentos mais desafiantes.

Agradeço à Universidade Nova de Lisboa, à Faculdade de Ciência e Tecnologia, ao Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial e, em particular, ao grupo de Mecânica Estrutural e ao corpo docente, pela excelente educação e pela sólida base que me proporcionaram para o meu futuro. A transição de um país com uma metodologia de estudo diferente, como a Rússia, foi difícil, mas com dedicação e os valiosos conselhos dos professores Ruy Araújo da Costa e Nuno Filipe Marcelino Martins, consegui mudar o rumo da minha jornada na FCT. O meu muito obrigado.

Agradeço também aos amigos e colegas que cruzaram o meu caminho, por caminharem esta jornada comigo. À minha família, pelo apoio constante e por sempre me ajudarem a reerguer-me.

E, finalmente, ao Governo Angolano, representado pelo Instituto Nacional de Gestão de Bolsas de Estudo, que sempre valorizou o meu desempenho e apoiou os meus estudos, desde a licenciatura.

O meu muito obrigado a todos.

”

«A inovação é o motor que impulsiona a energia renovável e a energia eólica é uma das suas expressões mais poderosas — .»

— **Elon Musk**, Em entrevista com Lex Fridman
(CEO da X, xAI, SpaceX, Tesla, Neuralink, e The Boring
Company)

RESUMO

O aumento da dependência global de fontes de energia renováveis tem reforçado a necessidade de uma monitorização e manutenção eficazes de turbinas eólicas. Um dos componentes mais críticos destes sistemas são as pás das turbinas, sujeitas a várias solicitações e potenciais danos estruturais ao longo do tempo. Esta dissertação aborda o desafio de desenvolver um modelo de teste para a simulação e posterior identificação de dano em pás de turbinas eólicas, com foco no projeto do protótipo físico e no aprimoramento dos métodos de deteção de dano. O problema é particularmente relevante devido às exigências operacionais sobre as pás, que estão expostas a condições ambientais severas. Os danos, se não forem detetados atempadamente, podem resultar em perdas de eficiência ou até em falhas catastróficas. Embora os métodos de deteção tradicionais sejam úteis, podem faltar-lhes precisão na identificação de anomalias em fases iniciais, tornando esta questão desafiante e importante no âmbito da manutenção da energia eólica. Para resolver este problema, a solução proposta envolve o desenvolvimento de um modelo computacional da pá, baseado no perfil aerodinâmico NREL S809, otimizado tanto para a eficiência aerodinâmica quanto para a integridade estrutural. O trabalho, além de fornecer um projeto detalhado, introduz uma nova abordagem para a identificação de dano, baseada na técnica "*Cloud of Spheres*", como alternativa ao método baseado na Distância de Mahalanobis. Esta técnica oferece a capacidade para detetar anomalias em espaços de dados multidimensionais, permitindo uma solução mais intuitiva e robusta para a monitorização da integridade estrutural. Os resultados, demonstram o potencial da metodologia implementada. A técnica "*Cloud of Spheres*" mostrou-se eficaz em distinguir entre estados danificados e não danificados das estruturas testadas, validando a sua aplicabilidade em futuros protótipos físicos e cenários de teste. As implicações desta investigação são substanciais, pois estabelecem uma base sólida para avanços futuros nas tecnologias de deteção de dano, contribuindo para sistemas de energia eólica mais fiáveis e eficientes.

Palavras-chave: Pás de turbinas eólicas, Identificação de dano, Modelação computacional, Monitorização estrutural baseada em *Cloud of Spheres*

ABSTRACT

The increasing global reliance on renewable energy sources has heightened the need for effective monitoring and maintenance of wind turbines. One of the most critical components of these systems is the turbine blades, which are subject to various structural loads and potential damage over time. This dissertation addresses the challenge of developing a test model for simulating and subsequently identifying damage in wind turbine blades, focusing on the design of the physical prototype and the improvement of damage detection methods. The problem is particularly relevant due to the operational demands on the blades, which are exposed to harsh environmental conditions. If damage is not detected in a timely manner, it can lead to efficiency losses or even catastrophic failures. While traditional detection methods are useful, they may lack precision in identifying early-stage anomalies, making this issue challenging and significant in the context of wind energy maintenance. To address this problem, the proposed solution involves developing a computational model of the blade, based on the NREL S809 aerodynamic profile, optimized for both aerodynamic efficiency and structural integrity. In addition to providing a detailed design, this work introduces a new approach to damage identification, based on the "Cloud of Spheres" technique, as an alternative to the Mahalanobis Distance-based method. This technique offers the ability to detect anomalies in multidimensional data spaces, providing a more intuitive and robust solution for structural health monitoring. The results demonstrate the potential of the implemented methodology. The "Cloud of Spheres" technique proved effective in distinguishing between damaged and undamaged states of the tested structures, validating its applicability in future physical prototypes and testing scenarios. The implications of this research are substantial, as they lay a solid foundation for future advancements in damage detection technologies, contributing to more reliable and efficient wind energy systems.

Keywords: Wind turbine blades, Damage identification, Computational modeling, Structural health monitoring based on *Cloud of Spheres*

ÍNDICE

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xi
Siglas	xii
1 Introdução	1
1.1 Contextualização	2
1.1.1 Monitorização da Integridade Estrutural	2
1.1.2 Conceção e desenvolvimento de pás de turbinas eólicas	3
1.2 Definição do problema	7
1.3 Estrutura da dissertação	8
2 Metodologia	10
3 Projeto e fabricação do protótipo físico	13
3.1 Requisitos funcionais	13
3.2 <i>Brainstorming</i>	15
3.3 Atuais processos de fabrico de pás	21
3.4 Infusão a Vácuo	26
3.5 Projeto de moldes	28
3.6 Materiais	32
3.6.1 Materiais compósitos	34
3.7 Processo de construção do protótipo físico	36
3.7.1 Construção do molde: Impressão 3D	38
3.7.2 Construção do molde: Maquinagem CNC em madeira	40
4 Identificação de Dano	41
4.1 Análise Modal Operacional	41
4.1.1 <i>Stochastic Subspace Identification</i>	45

4.1.2	<i>Enhanced Frequency Domain Decomposition</i>	48
4.2	Métodos de Expansão de Respostas	50
4.2.1	<i>Modal Decomposition and Expansion</i>	50
4.2.2	Transmissibilidade	51
4.2.3	Sensoriamento virtual	52
4.3	Model Updating	54
4.4	Deteção de dano	56
4.4.1	Distância de Mahalanobis	56
4.4.2	Método de deteção baseado em <i>cloud of spheres</i>	57
5	Apresentação e discussão dos resultados	61
5.1	Protótipo físico da pá de turbina eólica	61
5.1.1	Limitações	69
5.2	Alternativa para a identificação de dano	74
6	Conclusão	79
6.1	Recomendações futuras	81
	Bibliografia	82

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Crescimento do tamanho das pás ao longo dos anos [2].	4
1.2	Infusão a vácuo, adaptado de [5].	6
2.1	Metodologia do processo para construção do protótipo físico.	11
2.2	Metodologia do processo de identificação de dano [2].	12
3.1	<i>Airfoil</i> NREL S809 [9].	13
3.2	Perfil da pá na versão 1.	16
3.3	Perfil da pá na versão 2.	17
3.4	Perfil da pá na versão 3.	18
3.5	Perfil da pá na versão 4.	19
3.6	Parte do modelo 3D do perfil da pá na versão 4.	20
3.7	Modelo 3D final.	20
3.8	Técnica de laminação manual a húmido (<i>hand lay-up</i>), adaptado de [10].	21
3.9	Enrolamento filamental (<i>filament winding</i>), adaptado de [10].	22
3.10	Pás segmentadas da ENERCON [12].	23
3.11	Estrutura da pá e a nomenclatura convencional, adaptado de [13].	26
3.12	Elementos da estrutura interna da pá [14].	27
3.13	Esquema do processo de fabrico por infusão a vácuo, adaptado de [15].	28
3.14	Molde de uma das superfícies de pá de turbina eólica [16].	29
3.15	Movimento de ligação das partes do molde da pá [17].	31
3.16	Partes do molde da pá ligadas [18].	31
3.17	Comportamento elástico [19].	32
3.18	Fissuras de fadiga na borda de fuga [19].	33
3.19	Constituição de compósitos [19].	34
3.20	Disposição das fibras em pás de turbinas eólicas [19].	35
3.21	Fluxograma do processo de construção do protótipo físico	37
3.22	Modelação do molde da pá	38
3.23	Divisão do molde da superfície inferior em múltiplas peças	39
3.24	Simulação do tempo de impressão de uma peça	39

4.1	Metodologia detalhada do processo de identificação de dano	42
4.2	Ilustração do conceito de Análise Modal Operacional (OMA) [20].	43
4.3	Duas classes de pontos, azul e laranja [24].	59
4.4	Curva de Separação [24].	59
4.5	Esferas conectadas [24]	59
4.6	Fronteira da nuvem de esferas conectadas [24]	60
5.1	Características da pá.	63
5.2	Acessórios para fixação da pá ao solo.	64
5.3	Secção transversal e nomenclatura dos acessórios para fixação.	64
5.4	Modelo 3D do protótipo físico.	65
5.5	Modelo 3D da pá	66
5.6	Superfície inferior da pá	66
5.7	Superfície superior da pá	67
5.8	Elementos de ligação	68
5.9	<i>Shear webs</i>	69
5.10	Simulação do tempo de impressão da peça 2 do molde	70
5.11	Simulação do tempo de impressão da peça 3 do molde	70
5.12	Processo de impressão	71
5.13	Resultado das tentativas de impressão	72
5.14	Configuração para a maquinagem do molde da superfície inferior da pá	73
5.15	Sensores na viga	75
5.16	Introdução de dano	76
5.17	As quatro primeiras formas modais	76
5.18	4ª frequência natural	77
5.19	Metodologia alternativa para a identificação de dano	77
5.20	Frequências naturais com os diferentes níveis de dano introduzidos	78
5.21	Identificação de danos pela técnica baseada em <i>Cloud of Spheres</i>	78

ÍNDICE DE TABELAS

5.1	Detalhes do projeto para o protótipo físico	62
5.2	Características da viga utilizada no experimento.	74

SIGLAS

AUC	Área Sob a Curva (<i>pp. 56, 57, 74, 81</i>)
DOFs	Graus de Liberdade (<i>pp. 46, 54</i>)
EFDD	Enhanced Frequency Domain Decomposition (<i>pp. 8, 48, 49, 76</i>)
EMA	Análise Modal Experimental (<i>p. 41</i>)
FDD	Frequency Domain Decomposition (<i>p. 48</i>)
FEM	Finite Element Model (<i>pp. 51, 54, 56, 75</i>)
FRP	Polímeros Reforçados com Fibra (<i>p. 7</i>)
MAC	Modal Assurance Criterion (<i>p. 55</i>)
MD	Distância de Mahalanobis (<i>p. 56</i>)
MDE	Decomposição e Expansão Modal (<i>pp. 8, 50, 51</i>)
NREL	National Renewable Energy Laboratory (<i>pp. 13, 36, 61, 62, 79</i>)
OMA	Análise Modal Operacional (<i>pp. x, 41–45</i>)
PVC	Policloreto de Vinila (<i>p. 25</i>)
ROC	Curvas de Operação do Recetor (<i>pp. 56, 74</i>)
RTM	Moldagem por Transferência de Resina (<i>p. 26</i>)
SHM	Structural Health Monitoring (<i>pp. 1–3, 7, 8, 54</i>)
SSI	Subspace Stochastic Identification (<i>pp. 8, 45</i>)
SSI-COV	Covariance-driven Stochastic Subspace Identification (<i>pp. 46, 47, 76</i>)
SVD	Decomposição em Valores Singulares (<i>p. 47</i>)
SVM	Support Vector Machine (<i>pp. 57, 58</i>)

VARTM	Moldagem por Transferência de Resina Assistida a Vácuo (<i>pp. 26, 27</i>)
VSHM	Virtual Structural Health Monitoring (<i>p. 53</i>)

INTRODUÇÃO

O presente trabalho faz parte de uma linha de investigação dedicada à detecção de dano em estruturas através da análise das suas respostas dinâmicas. Neste contexto, esta dissertação propõe o desenvolvimento e a utilização de um modelo experimental que permita identificar e caracterizar dano em pás de turbinas eólicas. O trabalho desenvolve-se a partir de estudos anteriores, que exploraram a utilização de técnicas de sensoriamento virtual e métodos de identificação modal para a monitorização da integridade estrutural.

A detecção precoce de dano em turbinas eólicas é fundamental para garantir a sua fiabilidade e longevidade, evitando custos elevados de manutenção e a ocorrência de falhas catastróficas. As pás das turbinas, sendo componentes cruciais, estão sujeitas a condições ambientais severas e a cargas variáveis, o que torna a sua monitorização uma tarefa desafiadora. Este trabalho visa contribuir para a superação dessas dificuldades, propondo uma abordagem experimental que permita simular e estudar diferentes tipos de danos estruturais, em várias localizações da pá.

Neste capítulo, começaremos por apresentar uma contextualização do tema, abordando a importância da *Structural Health Monitoring (SHM)*, traduzido para português monitorização da integridade estrutural, em turbinas eólicas e a conceção e desenvolvimento de pás de turbinas eólicas. A seguir, definir-se-á o problema e será apresentada a estrutura geral da dissertação.

O desenvolvimento deste trabalho envolveu várias etapas relacionadas com o projeto e a conceção de um modelo físico de pá de turbina eólica, incluindo a criação de desenhos técnicos. No entanto, optou-se por não incluir esses desenhos nesta dissertação, uma vez que o objetivo não passa pelo detalhe dos desenhos técnicos e da informação para produção, mas sim a investigação de métodos para a identificação de danos estruturais num modelo físico versátil para a simulação/inclusão de diferentes tipos de danos.

Embora os desenhos técnicos sejam uma parte essencial para a concretização de qualquer projeto físico, a sua apresentação e discussão implicariam o aprofundamento de detalhes que fogem do âmbito desta dissertação. Esse nível de detalhe desviaria a atenção do tema principal, que é o desenvolvimento e aplicação de técnicas avançadas de detecção de danos.

Desta forma, a dissertação foca-se no projeto conceptual do protótipo físico e no seu papel como suporte para a simulação de danos estruturais, preservando o alinhamento com o objetivo principal do estudo. O projeto mecânico em si, incluindo os desenhos técnicos, poderá ser explorado em trabalhos futuros, que poderão complementar esta investigação ao aprofundar o desenvolvimento do protótipo físico para aplicações mais realistas.

1.1 Contextualização

1.1.1 Monitorização da Integridade Estrutural

Nos últimos anos, o setor das energias renováveis tem registado um crescimento significativo, impulsionado pela necessidade de fontes de energia mais sustentáveis e pela procura de alternativas aos combustíveis fósseis. Entre as várias tecnologias disponíveis, a energia eólica destaca-se como uma das mais promissoras, sendo atualmente uma das principais fontes de energia limpa em todo o mundo. As turbinas eólicas, que convertem a energia cinética do vento em energia elétrica, são os componentes centrais desta tecnologia.

À medida que as turbinas eólicas se tornam maiores e mais complexas, as exigências de manutenção e reparação também aumentam. Como já dito, as pás das turbinas eólicas, por serem estruturas críticas que estão constantemente expostas a cargas aerodinâmicas, variações climáticas e outros fatores ambientais adversos, a falha na deteção de dano nessas estruturas pode resultar em falhas catastróficas, originando elevados custos de reparação, perda de eficiência e, em casos extremos, acidentes graves.

Neste contexto, a SHM surge como uma solução essencial. A SHM é um conjunto de métodos e tecnologias utilizados para avaliar continuamente a integridade estrutural de um sistema ao longo do tempo. Nas turbinas eólicas, a SHM permite a deteção precoce de dano, possibilitando a intervenção antes que ocorram falhas significativas. Isto não só aumenta a segurança e a fiabilidade das turbinas, como também reduz os custos de manutenção e prolonga a vida útil dos equipamentos.

A deteção de dano em pás de turbinas eólicas é, portanto, uma área de investigação de grande relevância. Vários métodos de SHM foram desenvolvidos, com destaque para os métodos baseados em vibração, que analisam as respostas dinâmicas da estrutura para identificar alterações nos parâmetros modais, como frequências naturais e modos de vibração, que podem ser indicadores de dano.

Contudo, a implementação de sensores físicos nas pás das turbinas em funcionamento enfrenta diversas limitações, como o difícil acesso, os elevados custos e a suscetibilidade a falhas dos sensores. Para superar estas limitações, o sensoriamento virtual tem sido explorado como uma técnica promissora. O sensoriamento virtual permite a estimativa de respostas estruturais em locais onde sensores físicos não estão presentes, utilizando dados de sensores físicos em conjunto com modelos numéricos da estrutura. Esta abordagem

tem demonstrado potencial para aumentar a sensibilidade do sistema à detecção de dano, melhorando a capacidade de monitorização sem a necessidade de sensores adicionais.

O estado atual da tecnologia e da investigação na área de SHM em turbinas eólicas continua a evoluir, com foco na melhoria da precisão e fiabilidade dos métodos de detecção de dano [1]. Este trabalho visa contribuir para esta evolução, desenvolvendo e utilizando um modelo experimental de uma pá de turbina eólica, capaz de simular diversos tipos de danos estruturais em diferentes localizações. Ao integrar métodos avançados de SHM e sensoriamento virtual, este estudo pretende fornecer contributos valiosos sobre a eficácia destas técnicas na prática, contribuindo para o avanço do conhecimento na área e para a melhoria da segurança e eficiência das turbinas eólicas.

1.1.2 Conceção e desenvolvimento de pás de turbinas eólicas

A crescente procura por energias renováveis e a necessidade urgente de reduzir as emissões de gases com efeito de estufa têm impulsionado o desenvolvimento de tecnologias alternativas, com a energia eólica a ocupar um lugar de destaque. Apesar dos elevados custos iniciais, a tecnologia eólica oferece diversas vantagens económicas a longo prazo. A energia gerada pelo vento cria valor local, gera um efeito positivo no mercado ao baixar os preços da eletricidade, dado que o "custo do vento" é nulo, e permite que os produtores ofereçam energia a preços mais competitivos em relação às tecnologias baseadas em combustíveis fósseis.

Este cenário tem pressionado os fabricantes de turbinas eólicas a desenvolverem máquinas de maior capacidade, capazes de aumentar significativamente a produção elétrica. Uma das principais tendências da indústria é o aumento contínuo do comprimento das pás conforme apresentado na Figura 1.1, uma estratégia que visa maximizar a eficiência das turbinas ao extrair mais energia de ventos de menor intensidade. O projecto das pás concentra-se em aumentar a potência nominal do sistema, melhorando a integração das turbinas na rede elétrica e a sua ligação à infraestrutura existente.

Para responder a esta necessidade, os fabricantes de turbinas têm de aumentar a capacidade produtiva das suas fábricas em cada fase do processo, assegurando simultaneamente a eficiência, a redução de custos, a segurança dos trabalhadores e a manutenção da qualidade final das pás. Estes desafios fazem do projeto das pás um campo de constante inovação, onde cada melhoria pode ter um impacto significativo na eficiência global das turbinas eólicas.

Automatização e desafios na fabricação de pás de turbinas eólicas

A implementação de tecnologias de automatização avançada na fabricação de turbinas eólicas exige um investimento financeiro inicial substancial. No entanto, essa automatização tem o potencial de simplificar significativamente o processo de fabricação, garantindo maior repetibilidade e fiabilidade. A fiabilidade aumentada e a optimização de custos são

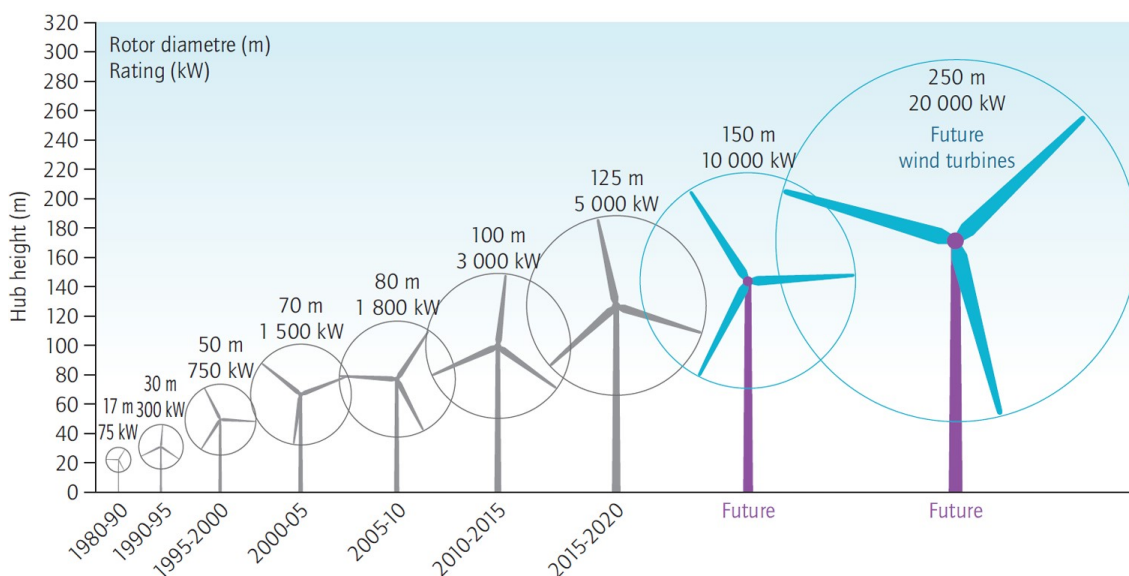


Figura 1.1: Crescimento do tamanho das pás ao longo dos anos [2].

prioridades essenciais para melhorar a competitividade do sector da energia eólica, que enfrenta uma concorrência internacional cada vez mais intensa.

As pás das turbinas eólicas são componentes críticos, responsáveis por captar a energia do vento e transformá-la em potência mecânica (através do binário) e, subsequentemente, em geração de eletricidade. Contudo, de acordo com a Lei de Betz, não é possível capturar mais de 59.3% da energia cinética do vento [3]. As pás são, portanto, uma parte vital para o desempenho global, a fiabilidade e o custo de um sistema de turbina eólica.

A Lei de Betz é fundamental para compreender as limitações teóricas da eficiência na conversão de energia eólica em energia mecânica. Segundo esta lei, derivada por Albert Betz em 1919, a eficiência máxima teórica de qualquer turbina eólica em extrair energia do vento é de aproximadamente 59.3% [3]. Isso significa que, independentemente do projecto ou da tecnologia empregada, uma turbina eólica não pode converter mais do que 59.3% da energia cinética contida no vento em energia mecânica utilizável.

No projeto e fabricação das pás de turbinas eólicas, a Lei de Betz desempenha um papel crucial na definição das expectativas de eficiência e no direcionamento dos esforços de otimização. Esta Lei estabelece um limite claro sobre a quantidade de energia que pode ser extraída do vento. Por mais avançado que seja o projecto das pás, elas estão sujeitas a esta limitação teórica. Isso força os engenheiros a focarem não apenas em maximizar a captura de energia, mas também em otimizar outros aspectos como a durabilidade e os custos de produção.

Compreendendo que não é possível extrair toda a energia do vento, os fabricantes têm se concentrado em aumentar o comprimento das pás para maximizar a área varrida pelo vento. Pás mais longas permitem que as turbinas capturem uma maior quantidade de energia disponível, dentro dos limites estabelecidos pela Lei de Betz.

A Lei de Betz incentiva a otimização aerodinâmica das pás para que, dentro do limite, a maior quantidade possível de energia seja convertida de forma eficiente. Isso envolve o uso de perfis aerodinâmicos avançados que minimizam as perdas de energia e maximizam a geração de momento [4].

A fim de se aproximar do limite teórico da Lei de Betz, sem comprometer a integridade estrutural, a indústria tem investido em materiais compósitos de alto desempenho e tecnologias de fabricação avançadas, como a infusão a vácuo. Esses materiais permitem que as pás sejam leves e resistentes, possibilitando o aumento do comprimento sem adicionar peso excessivo, o que poderia comprometer a eficiência.

Por um lado, a Lei de Betz também é um guia para a relação entre custo e benefício no projeto das pás. Uma vez que há um limite superior para a eficiência, os fabricantes precisam equilibrar o custo da produção de pás maiores e mais sofisticadas com os ganhos marginais de energia. Isso significa que, para além de um certo ponto, os benefícios de aumentar o comprimento das pás ou de utilizar materiais mais caros podem não justificar os custos adicionais, dada a eficiência limitada pela Lei de Betz.

Pás mais longas aumentam o rendimento energético de um sistema de turbina, pois varrem uma área maior. No entanto, isso também implica a necessidade de mais material na construção das pás e a exigência de uma maior resistência estrutural, o que, inevitavelmente, acarreta custos adicionais. Este equilíbrio entre o aumento do comprimento das pás e o controle de custos é um dos desafios centrais no projecto e fabricação de turbinas eólicas modernas.

Avanços tecnológicos na fabricação de pás de turbinas eólicas

A fabricação de pás para turbinas eólicas continua a ser um processo altamente intensivo em mão-de-obra. No entanto, nos últimos anos, foram feitos avanços técnicos significativos para facilitar as tarefas envolvidas e melhorar a qualidade global das peças produzidas. Estes avanços têm permitido não só a melhoria da eficiência no processo de fabricação, mas também a produção de pás mais fiáveis e duráveis. As principais áreas que têm impulsionado o desenvolvimento de sistemas para a fabricação de pás incluem [4]:

Automatização de processos

A automação tem sido crucial para reduzir os tempos de ciclo, melhorar a precisão e garantir a repetibilidade das operações. A implementação de sistemas automatizados permite a padronização das etapas de produção, minimizando o erro humano e aumentando a consistência na qualidade das pás.

Materiais de elevado desempenho

O uso de materiais de elevado desempenho, em colaboração com fornecedores estratégicos, tem sido fundamental para a fabricação de pás mais eficientes e duráveis. Estes materiais,

frequentemente compostos avançados, oferecem uma melhor relação resistência-peso, permitindo a construção de pás mais longas e leves, sem comprometer a resistência estrutural [5].

Ferramentas e sistemas de montagem precisos

A introdução de ferramentas e sistemas de montagem inovadores tem melhorado a precisão e a eficácia durante a fabricação das pás. Estas ferramentas permitem uma montagem mais rápida e precisa, assegurando que as especificações do projecto são rigorosamente cumpridas.

Avanços na tecnologia de infusão a vácuo

Na Figura 1.2, está representado um esquema do processo de infusão a vácuo. A infusão a vácuo tem evoluído significativamente, especialmente com a introdução de resinas termoplásticas de baixa viscosidade. Esta tecnologia permite a criação de estruturas compostas mais leves e resistentes, aumentando assim a eficiência e a vida útil das pás [5].

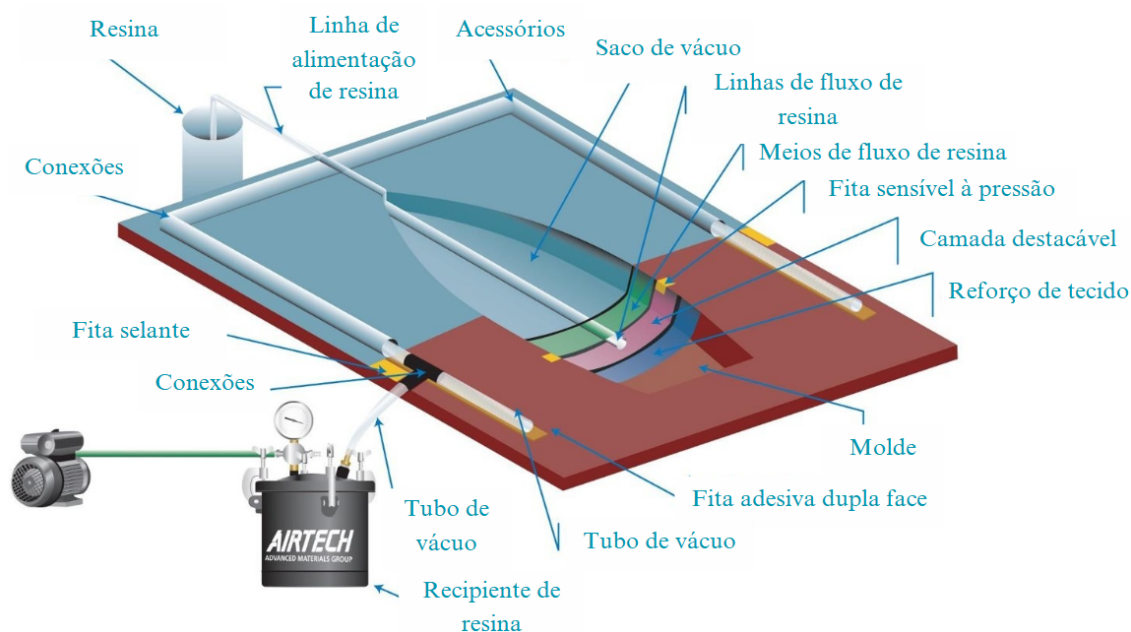


Figura 1.2: Infusão a vácuo, adaptado de [5].

Avanços em metrologia

A metrologia avançada, que inclui ferramentas de inspeção, teste e garantia de qualidade, desempenha um papel crítico na verificação e validação da precisão e qualidade das pás. Tecnologias de ponta, como laser, ultrassom e outras técnicas avançadas, são empregadas para assegurar que cada pá cumpre os mais altos padrões de qualidade e fiabilidade.

1.2 Definição do problema

As pás das turbinas eólicas têm efeitos significativos no desempenho global da turbina e são dispendiosas na fabricação (15 – 20% do custo total) e na manutenção em comparação com outros componentes. Materiais compósitos, como os Polímeros Reforçados com Fibra (FRP), frequentemente utilizados na fabricação de pás de turbinas eólicas, têm sido utilizados para reduzir o custo e peso, além de melhorar a resistência, rigidez, tolerância a falhas e vida útil [6].

Os parques eólicos são principalmente instalados em áreas remotas, como em áreas terrestres, montanhosas, *offshore*, desertas, entre outras, e as pás são frequentemente colocadas a grandes distâncias do solo. As pás das turbinas que operam em ambientes naturais complexos com vento, nevoeiro, chuva, etc, estão mais susceptíveis ao desenvolvimento de dano, devido a influência destes fatores. Portanto, não é fácil detetar dano e fornecer estratégias de manutenção da pá, o que resultará em paralisações de longo prazo, perda de geração de energia, substituição da pá, e elevadas perdas económicas, entre outros. A detecção precoce de dano nas pás das turbinas eólicas pode evitar que o dano se torne catastrófico, evitando acidentes e perdas de material, permitindo que a manutenção da integridade estrutural prolongue a vida útil da estrutura com pequenos reparos [7].

Apesar dos avanços na SHM em turbinas eólicas, a detecção eficaz de dano em pás de turbinas continua sendo um desafio significativo. Estudos anteriores, incluindo os realizados na área de monitorização baseada em vibração, têm mostrado que a utilização de sensores físicos tem limitações práticas, como a dificuldade de instalação em turbinas operacionais e a capacidade restrita de detectar dano em locais não instrumentados.

Adicionalmente, muitos estudos têm se baseado em modelos experimentais e numéricos que não refletem completamente as complexidades reais das pás de turbinas eólicas. A ausência de um modelo físico de pá com a capacidade de simular diferentes tipos e localizações de danos estruturais representa uma lacuna significativa na pesquisa atual.

Portanto, há uma necessidade urgente de desenvolver um protótipo experimental realista que permita simular dano de forma controlada e representativa. Esse protótipo deve ser projetado para ser desmontável e reconfigurável, permitindo a simulação de diversos cenários de dano e contribuindo para uma validação mais robusta das técnicas de monitorização e identificação de dano. A falta desse tipo de modelo experimental limita a capacidade de validar e melhorar os métodos de SHM existentes, comprometendo a eficácia das técnicas de detecção de dano em condições reais de operação.

Entretanto, este trabalho é importante tanto do ponto de vista industrial, devido à segurança, quanto, especialmente nas eólicas *offshore*, onde as pás são cada vez maiores e sujeitas a cargas elevadas e fadigas, tornando a detecção precoce crucial. Do ponto de vista científico, a detecção, localização e quantificação de dano continuam a ser desafios em aberto, pois são casos altamente dependentes do tipo de estrutura, e o investimento maciço na área das energias renováveis, especialmente na eólica, enfatiza ainda mais a importância deste trabalho.

1.3 Estrutura da dissertação

Neste capítulo, é efetuada a contextualização do trabalho. Inicialmente, é apresentado o cenário geral da SHM em turbinas eólicas, destacando a importância da detecção de dano nas pás eólicas e revisando o estado atual da tecnologia e pesquisa nesta área. Em seguida, foi feita uma definição clara do problema específico abordado, identificando as limitações dos estudos anteriores e a necessidade de um modelo experimental mais robusto. Finalmente, é fornecida uma visão geral da estrutura da dissertação, destacando o conteúdo de cada capítulo subsequente.

Capítulo 2

Neste capítulo, é apresentada a metodologia do trabalho, dividida em duas partes: a metodologia para a identificação e localização de dano utilizando métodos de identificação modal e expansão de respostas, e a metodologia para a construção e teste do protótipo físico para simulação de dano.

Capítulo 3

Neste capítulo, é detalhado o desenvolvimento do protótipo físico destinado a simular dano em pás de turbinas eólicas. Começa-se com a definição dos parâmetros do projeto, incluindo os requisitos funcionais, dimensões e a forma aerodinâmica do protótipo. Em seguida, são consideradas as condições externas que podem influenciar o desempenho do protótipo, como vento, cargas e temperatura. O projeto estrutural é descrito, abordando a estrutura interna e externa da pá, além dos reforços e suportes necessários. Por fim, é detalhado o processo de fabricação do protótipo, incluindo a seleção de materiais e os métodos de fabricação empregados.

Capítulo 4

Este capítulo foca nas técnicas utilizadas para identificar e quantificar dano no protótipo. São apresentados os métodos de identificação modal utilizados, começando com o Subspace Stochastic Identification (SSI), detalhando sua teoria, aplicação e vantagens. Em seguida, é abordado o Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD), explicando sua teoria e benefícios na identificação modal. Também é focado nos métodos de expansão de respostas, incluindo a Decomposição e Expansão Modal (MDE) e a Transmissibilidade, discutindo suas teorias e aplicações. Finalmente, é explorada a distância de Mahalanobis e a curva AUC-ROC, explicando como essas técnicas são usadas na identificação e análise de danos e, posteriormente sugerindo técnicas relacionadas relevantes.

Capítulo 5

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados, detalhando a configuração experimental, a metodologia aplicada e os dados obtidos. São analisados os resultados em relação aos objetivos e hipóteses iniciais, discutindo como eles se alinham com as expectativas e com o estado da arte. São utilizados dados obtidos em estudos anteriores (como em [2]), e simulados com técnicas alternativas, focando na aplicação experimental e destacando quaisquer novas descobertas ou melhorias.

Capítulo 6

No último capítulo são resumidos os principais achados e implicações do estudo. É apresentado um resumo das conclusões principais, destacando a contribuição do trabalho para o campo da monitorização de saúde estrutural em turbinas eólicas. São discutidas as limitações do estudo e oferecidas sugestões para futuras pesquisas, com base nas descobertas e desafios encontrados ao longo do trabalho.

METODOLOGIA

Esta dissertação está enquadrada com contribuições anteriores, destacando especialmente as dissertações [1] e [2], os quais forneceram bases importantes para a condução desta dissertação.

A metodologia adotada nesta dissertação é estruturada em dois níveis distintos. Primeiramente, há a metodologia do processo para a construção do protótipo físico apresentada na Figura 2.1 e detalhada no capítulo 3. Esta metodologia inclui várias fases, desde a definição dos requisitos iniciais até a prototipagem propriamente dita, destacando-se a realização de pesquisas, sessões de *brainstorming* e seleção da melhor solução para o desenvolvimento do protótipo.

No segundo nível há a metodologia do processo para a identificação de dano, cujo desenvolvimento foi previamente delineado e implementado nas dissertações acima citadas. Esta metodologia, representada esquematicamente de forma geral na Figura 2.2, estabelece um conjunto de passos para a identificação de danos em estruturas, os quais foram adotados integralmente na presente dissertação, evidenciando uma concordância plena com os procedimentos estabelecidos.

A minha contribuição para este trabalho maior e que deu origem a metodologia apresentada na Figura 2.1, concentra-se no primeiro estágio (retângulo a vermelho) da metodologia do processo para identificação de dano (Figura 2.2), que consiste na construção de um protótipo físico para a simulação de dano, sobre a qual falaremos mais adiante.

Portanto, esta dissertação oferece uma contribuição significativa para o avanço na área de identificação de dano em estruturas, especialmente no contexto das pás de turbinas eólicas. A construção de um protótipo físico modular e adaptável foi um passo essencial para simular de maneira controlada diferentes tipos de falhas estruturais, fornecendo um ambiente experimental robusto e replicável. O uso de técnicas modernas de manufatura aditiva e ferramentas de modelagem 3D permitiu o desenvolvimento de um protótipo com características mecânicas e geométricas alinhadas às condições reais, garantindo assim a validade dos testes e análises subsequentes.

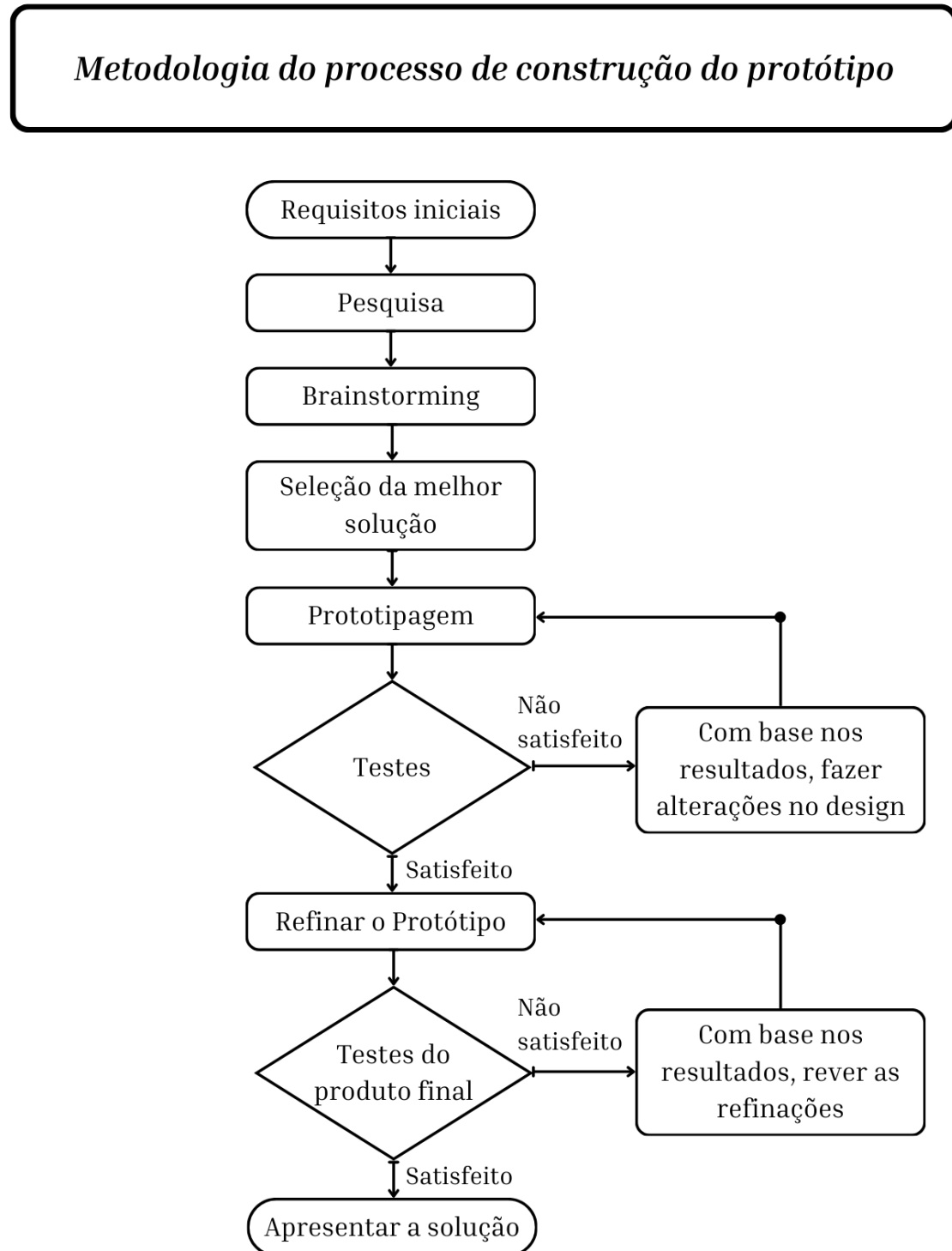


Figura 2.1: Metodologia do processo para construção do protótipo físico.

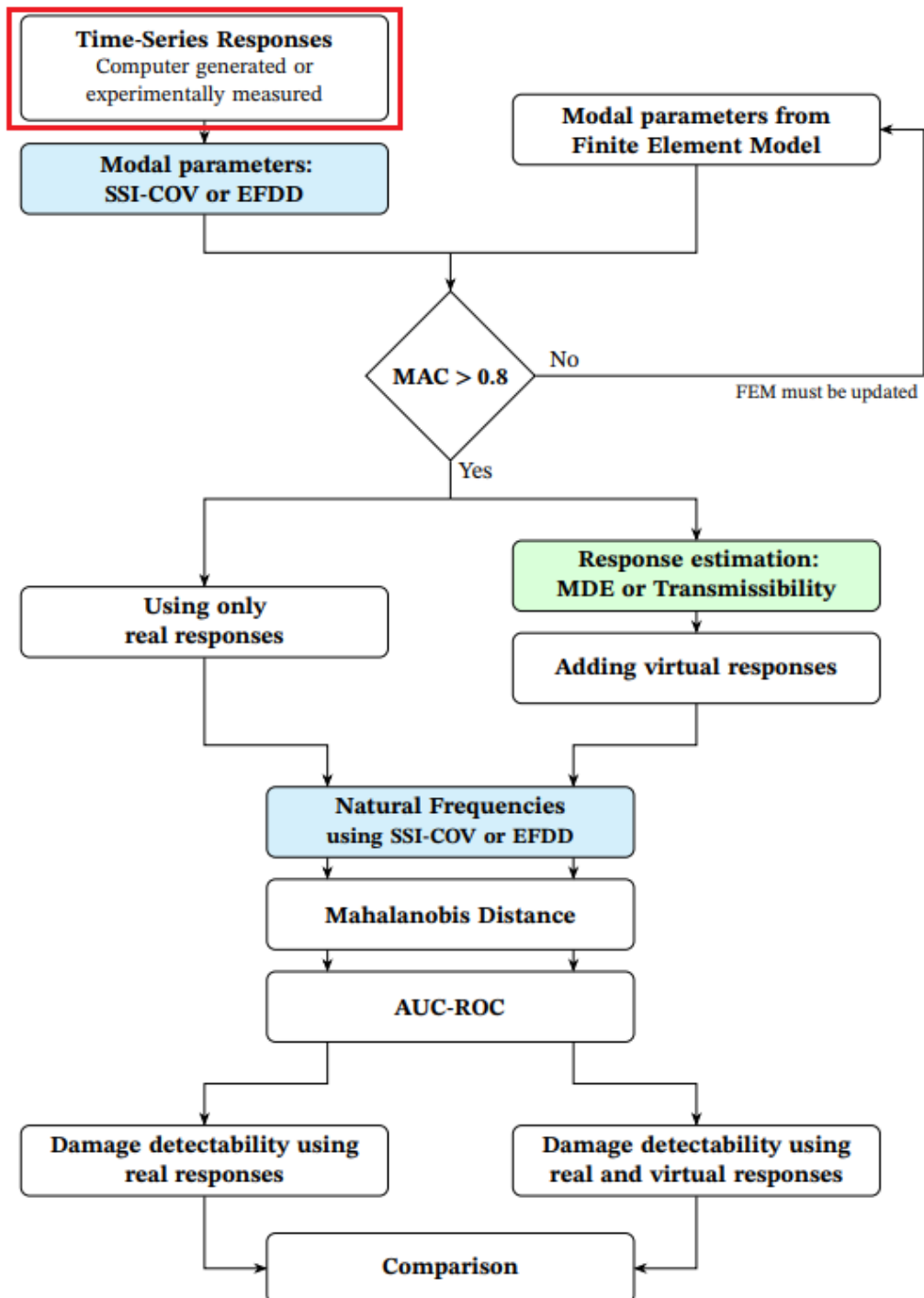


Figura 2.2: Metodologia do processo de identificação de dano [2].

PROJETO E FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO FÍSICO

O desenvolvimento do modelo experimental ou físico para estudar o comportamento das pás de turbina eólica envolve várias etapas cruciais. Inicialmente, foi realizada uma análise extensiva para identificar o melhor perfil aerodinâmico para aplicação em pás de turbinas eólicas. Após revisão de vários elementos na literatura, incluindo [8], concluiu-se que os perfis aerodinâmicos desenvolvidos pelo *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*, tal como os S809, S834 e S835 são os mais adequados, oferecendo benefícios superiores em comparação com outros perfis. Estes perfis demonstraram maiores coeficientes de sustentação para toda a gama de ângulos de ataque, com um coeficiente de sustentação mais baixo apenas na região das condições de estol, que não são aplicáveis na prática.

Dessa forma, o *airfoil* S809, representado na Figura 3.1 retirado do *Airfoil Tools*, será utilizado como base para o desenvolvimento do protótipo.

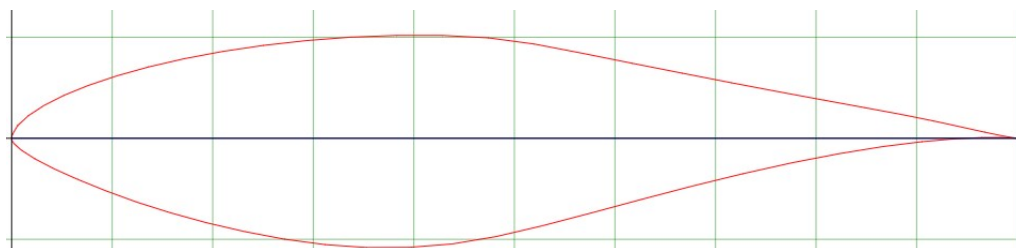


Figura 3.1: *Airfoil* NREL S809 [9].

3.1 Requisitos funcionais

Nesta etapa, identificou-se a visão do projeto, os critérios de sucesso, as limitações, e, o mais importante, as necessidades do projeto, do mercado ou dos utilizadores. Estes requisitos funcionais estabelecem os parâmetros fundamentais que guiarão todo o processo de desenvolvimento, assegurando que o protótipo atenda às expectativas e necessidades reais. Conforme ilustrado esquematicamente na Figura 2.1, os requisitos funcionais para o modelo experimental em desenvolvimento são os descritos abaixo.

1. **Capacidade de simulação de dano:** o modelo deve permitir a simulação de dano, principalmente nos bordos de ataque e de fuga da pá, para avaliar o comportamento estrutural.
2. **Facilidade de montagem e desmontagem:** o modelo deve ser projetado de forma que seja fácil de montar e desmontar, utilizando um número mínimo de parafusos ou outras fixações. Facilitando o transporte, armazenamento e ajustes durante os testes.
3. **Robustez estrutural:** o modelo deve ser robusto o suficiente para suportar as condições de teste e simular com precisão o comportamento de uma pá de turbina eólica em funcionamento.
4. **Perfil aerodinâmico:** deve-se incorporar um perfil aerodinâmico na construção da pá, garantindo que o modelo reproduza as características aerodinâmicas de uma pá real.
5. **Integridade estrutural:** a montagem e desmontagem do modelo não devem comprometer a integridade estrutural, garantindo que o modelo possa ser utilizado repetidamente sem perda de desempenho ou segurança.
6. **Dimensionamento adequado:** o comprimento da pá deve estar na faixa de 1.5-2 metros, com a largura dimensionada de acordo com o comprimento para manter proporções realistas.
7. **Ajustabilidade:** o modelo deve permitir ajustes para diferentes configurações de teste.
8. **Facilidade de acesso para instalação de sensores:** deve haver acesso conveniente para a instalação de sensores ou instrumentação para coleta de dados durante os testes.
9. **Material durável e de custo acessível:** o modelo deve ser construído com materiais duráveis e acessíveis, garantindo uma vida útil longa e custos razoáveis de construção.
10. **Segurança:** deve-se garantir que o modelo seja seguro para operar e que não represente riscos para os operadores durante os testes.

Após a identificação dos requisitos funcionais, realizou-se uma pesquisa extensiva para determinar se produtos similares já existem no mercado e para entender as necessidades dos potenciais utilizadores. Esta pesquisa é crucial para compreender as possibilidades técnicas e identificar as melhores práticas que podem ser incorporadas no projeto. Além disso, a pesquisa ajuda a evitar a duplicação de esforços e a inspirar novas ideias com base em soluções existentes.

3.2 *Brainstorming*

Esta fase envolveu o desenvolvimento de ideias criativas, explorando diferentes abordagens e modelos que possam atender às necessidades identificadas. O *Brainstorming* permitiu na fase de projeto explorar múltiplas soluções sem limitações iniciais, promovendo a inovação e garantindo que todas as possibilidades sejam consideradas antes de se concentrar em uma direção específica.

Durante a fase de *brainstorming*, o foco principal foi encontrar soluções inovadoras para o projecto de uma pá de turbina eólica que fosse desmontável, mas que também mantivesse a integridade estrutural e aerodinâmica necessária para seu funcionamento eficaz.

Uma das primeiras ideias foi criar uma pá composta por duas cascas, onde a casca superior (a parte exterior) seria completamente livre de descontinuidades. O objetivo era garantir uma superfície aerodinamicamente limpa, sem furos ou imperfeições que pudessem afetar o desempenho da pá. A ideia inicial envolvia a ligação entre as cascas utilizando parafusos, com as *shear webs* formando uma estrutura interna em formato de quadrado, garantindo a rigidez necessária.

Este tipo de estrutura interna no perfil da pá na versão 1, é o chamado *Box Beam* é uma estrutura em forma de caixa, onde as *shear webs* internas formam um retângulo ou quadrado fechado, como mencionado acima. Este tipo de configuração é muito comum em estruturas que necessitam de alta resistência e rigidez, como é o caso das pás de turbinas eólicas.

O projecto fechado do *Box Beam* permite uma excelente distribuição de cargas, tanto em flexão quanto em torção. A estrutura em forma de caixa oferece uma grande resistência a forças externas, tornando-o ideal para aplicações de alta carga.

Esta configuração proporciona uma rigidez excepcional em todas as direções, sendo especialmente eficaz em suportar cargas de torção. É ideal para estruturas que enfrentam grandes forças, como pás de turbinas eólicas em operação em condições extremas. A estrutura fechada é menos propensa a deformações, garantindo uma longa vida útil e estabilidade da pá.

Por outro lado, esta configuração pode ser mais pesada do que outras configurações, o que pode ser uma desvantagem em aplicações onde a eficiência de peso é crucial. A construção de um *Box Beam* pode ser complexa e custosa, especialmente em materiais compósitos.

Apesar da promessa de um projecto estruturalmente robusto, esta abordagem apresentou um desafio significativo: a impossibilidade de desmontagem. Como a fixação das cascas e das *shear webs* estava planeada para ser realizada por dentro, sem acessar a parte externa, o processo de desmontagem tornou-se inviável. Este obstáculo levou à necessidade de reconsiderar a solução inicial.

Diante das limitações do projecto inicial, a próxima ideia envolveu a divisão da casca inferior em duas partes. Esta configuração permitiria que a pá fosse montada e desmontada

de maneira mais prática. No entanto, para que as *shear webs* e *shear caps* pudessem ser fixadas adequadamente, seria necessário perfurar a casca superior, criando assim pontos de fixação visíveis na parte externa da pá. Essa solução, embora funcional, resultou em uma superfície com furos que poderiam impactar negativamente a aerodinâmica e a integridade estrutural.

Esta abordagem apresentada - a casca superior limpa com problemas de desmontagem e a casca perfurada, mas desmontável - foram discutidas extensivamente. Ponderou-se sobre os *trade-offs* entre manter a integridade aerodinâmica e a necessidade de um projecto desmontável que atendesse às condições operacionais. A Figura 3.2 ilustra o perfil inicial, que gerou outras versões por forma a equilibrar esses fatores, mesmo que à custa de algumas concessões aerodinâmicas.

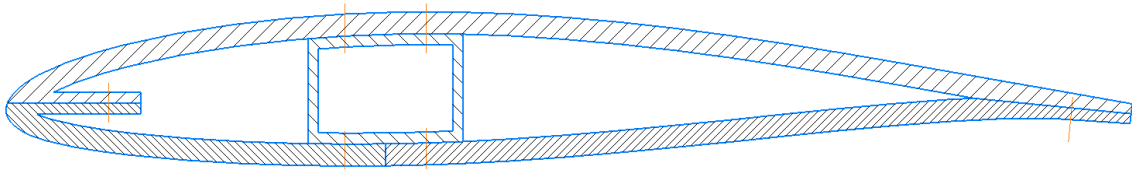


Figura 3.2: Perfil da pá na versão 1.

Após a análise da primeira versão, que utilizava uma estrutura interna do tipo *Box Beam*, a necessidade de encontrar uma solução que mantivesse a superfície superior limpa e permitisse a desmontagem levou à consideração de uma segunda versão.

Nesta versão, o conceito de dividir a casca inferior em duas partes foi mantido, mas a estrutura interna foi alterada para duas *shear webs* em formato de C. Essa configuração propôs que as *shear webs* fossem desenhadas de maneira a formar um C em cada lado da estrutura interna, com as aberturas das C voltadas uma para a outra.

Inicialmente, o objetivo era manter a casca superior livre de perfurações, preservando uma superfície aerodinamicamente limpa e sem descontinuidades, o que é benéfico para o desempenho da pá.

O formato em C poderia oferecer alguma flexibilidade adicional na distribuição de tensões dentro da estrutura, dependendo do material utilizado e da forma como as *shear webs* são fixadas.

Assim como na versão anterior, a montagem e desmontagem das cascas ainda apresentavam dificuldades significativas. O formato em C não eliminava a necessidade de fixação interna, complicando o acesso aos pontos de conexão sem comprometer a integridade da superfície externa.

Para que esta solução se tornasse viável, foi necessário reconsiderar a ideia de manter a superfície superior sem perfurações. Constatou-se que a única forma de garantir uma fixação segura das *shear webs* e atingir o objetivo desejado seria perfurar a casca superior e fixar os parafusos de fora para dentro, ligando a casca superior às *shear webs*. Embora isso resolvesse o problema de montagem e desmontagem, introduzia descontinuidades

na superfície externa, o que poderia impactar negativamente a aerodinâmica da pá.

A fixação das *shear webs* em C poderia ser mais complicada do que na configuração em *Box Beam*, exigindo uma engenharia mais complexa para garantir que a estrutura permanecesse estável e resistente às forças aerodinâmicas e de torção aplicadas durante a operação.

A necessidade de perfurar a superfície superior, apesar de resolver o problema de montagem, comprometeu o projecto inicial que visava uma superfície externa limpa e contínua. Esta solução evidenciou o desafio de equilibrar a funcionalidade mecânica e o desempenho aerodinâmica, sendo necessário explorar outras abordagens para superar essas limitações.

A Figura 3.3 ilustra esta segunda versão com as *shear webs* em C, que, apesar de promissora em teoria, continuou a desafiar o desenvolvimento de uma solução prática e eficaz.

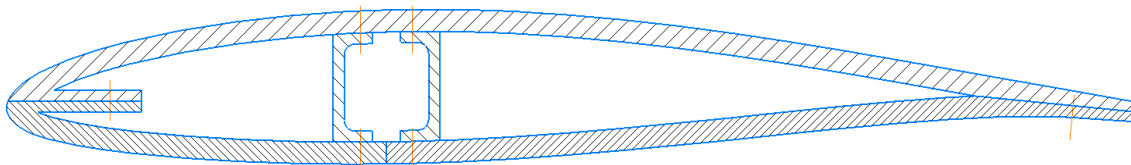


Figura 3.3: Perfil da pá na versão 2.

Com as dificuldades enfrentadas nas duas versões anteriores, surgiu a necessidade de desenvolver uma solução que eliminasse os problemas de montagem e desmontagem sem comprometer a integridade aerodinâmica da pá. Isso levou à consideração de uma terceira versão, utilizando uma estrutura interna com *shear webs* em formato de Z.

Diferente das versões anteriores, esta configuração em Z permitiu que a superfície superior permanecesse completamente intacta e livre de perfurações. A ligação entre a *shear web* e a superfície superior foi projetada para ser interna, com os parafusos sendo apertados de dentro para fora, evitando qualquer descontinuidade na superfície externa da pá.

A estrutura interna em Z solucionou os problemas de montagem e desmontagem que existiam nas versões anteriores. Com esta configuração, a parte inferior da casca, dividida em duas partes, poderia ser fixada e removida de forma mais simples, sem comprometer a integridade da pá ou a sua capacidade de ser desmontada.

Nesta versão, levamos em consideração outra problemática que nas duas anteriores não demos a máxima atenção - o número de peças. A necessidade de dividir a casca inferior em duas partes resultou em um aumento significativo no número de peças a serem montadas. Isso não só complicaria o processo de fabricação, como também poderia aumentar o tempo e o custo de montagem.

A criação de uma estrutura interna em Z pode demandar técnicas de fabricação mais avançadas, especialmente no que diz respeito à precisão necessária para garantir que todas as peças se encaixem perfeitamente sem comprometer a integridade da estrutura.

Embora a estrutura em Z ofereça vantagens na montagem e desmontagem, a distribuição de cargas pode ser menos eficiente em comparação com o *Box Beam*. As forças podem não ser distribuídas de forma tão uniforme, o que poderia resultar em pontos de concentração de tensões dentro da estrutura, exigindo reforços adicionais.

Esta versão, representa uma melhoria significativa em relação às anteriores no que diz respeito à montagem e desmontagem, e preserva a integridade aerodinâmica da superfície superior. No entanto, ela introduz novos desafios, como a complexidade de fabricação e o aumento no número de componentes, o que pode impactar tanto o custo quanto o tempo de produção. Esses fatores foram cuidadosamente considerados na avaliação final da viabilidade dessa solução.

A Figura 3.4 ilustra a terceira versão, destacando a estrutura interna em Z e a preservação da superfície externa, sem as perfurações que comprometiam as soluções anteriores.

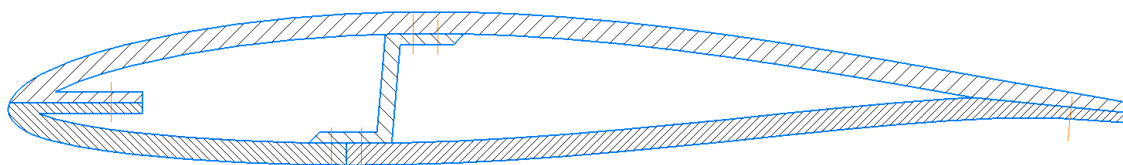


Figura 3.4: Perfil da pá na versão 3.

Após uma análise detalhada das três versões anteriores, a quarta foi escolhida como a solução que melhor se adequa aos objetivos do projeto e à análise de dano em ambiente industrial. Esta versão busca um equilíbrio entre integridade estrutural, eficiência de montagem, e considerações aerodinâmicas.

Aqui, a superfície superior foi mantida sem descontinuidades, ou seja, completamente livre de perfurações. Isso garante que a aerodinâmica da pá não seja comprometida por furos ou imperfeições.

Diferente das versões anteriores onde a superfície inferior foi dividida em duas partes, nesta versão, a superfície inferior é uma peça única. Essa abordagem simplifica o processo de fabricação e montagem, além de aumentar a integridade estrutural da pá.

O projecto interno utiliza uma estrutura *Box Beam* diferenciada. A *Box Beam* será construída em duas partes separadas, cada uma em formato de U. Após a fabricação, essas duas partes serão coladas para formar a *Box Beam* completa.

Em vez de utilizar uma única *Box Beam* ao longo de toda a pá, serão utilizadas três espaçadas ao longo da extensão da pá, permitindo uma distribuição mais eficiente das cargas. Além disso, as laterais destas, serão abertas, o que ajudará a reduzir o peso total da estrutura sem comprometer a rigidez necessária.

A conexão entre a estrutura interna e as superfícies superior e inferior será realizada utilizando cola removível. Isso permite a fácil desmontagem para manutenção ou ajustes, garantindo ao mesmo tempo uma ligação segura e durável durante a operação.

A ausência de perfurações na superfície superior garante que a pá mantenha suas

propriedades aerodinâmicas ideais, reduzindo o arrasto e melhorando o desempenho geral.

A utilização de uma superfície inferior única e de *Box Beams* espaçadas, junto com a cola removível, simplifica o processo de montagem e desmontagem, tornando-o mais eficiente e menos sujeito a erros.

As *Box Beams* abertas e espaçadas contribuem para uma estrutura mais leve, o que é crucial para melhorar a eficiência e o desempenho da pá, especialmente em condições de operação variáveis.

A construção em *U* e a subsequente colagem das partes formam uma estrutura rígida e resistente, capaz de suportar as forças e tensões a que a pá estará sujeita durante o funcionamento.

Embora a solução resolva muitos dos problemas das versões anteriores, a fabricação das *Box Beams* em duas partes e a subsequente colagem podem exigir processos de fabricação mais sofisticados, aumentando potencialmente o custo e o tempo de produção.

A eficácia da cola removível para a conexão das partes internas depende da escolha de materiais compatíveis e do controle rigoroso do processo de aplicação, o que pode ser um desafio em larga escala.

A Figura 3.5 ilustra a estrutura interna modificada e a configuração geral da pá nesta versão final.

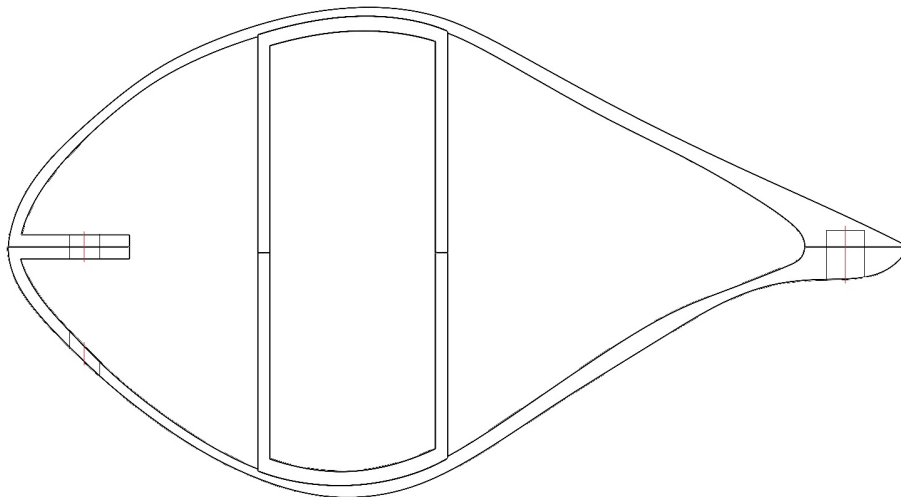


Figura 3.5: Perfil da pá na versão 4.

Esta quarta versão do perfil da pá, ao combinar as melhores práticas das soluções anteriores com inovações como o *Box Beam* modificado e a cola removível, apresenta-se como a escolha mais adequada para o projeto. Ela atende às necessidades da integridade aerodinâmica e estrutural, eficiência na montagem e desmontagem, e redução de peso, tornando-se a solução ideal dentro do contexto industrial.

A Figura 3.6 apresenta uma extração do modelo 3D correspondente à solução final encontrada e descrita na versão 4. Nesta imagem, é possível visualizar a configuração

interna com as *Box Beams* modificadas, a disposição das superfícies superior e inferior, e os pontos de conexão ao longo do bordo de ataque e do bordo de fuga.

O modelo 3D detalha como as partes internas são organizadas e conectadas, destacando a estrutura em *U* das *Box Beams*, as aberturas laterais para redução de peso, garantindo a desmontagem prática. A representação 3D é crucial para entender a interação entre os diferentes componentes e como o projecto final integra as necessidades estruturais com a aerodinâmica e a facilidade de montagem.

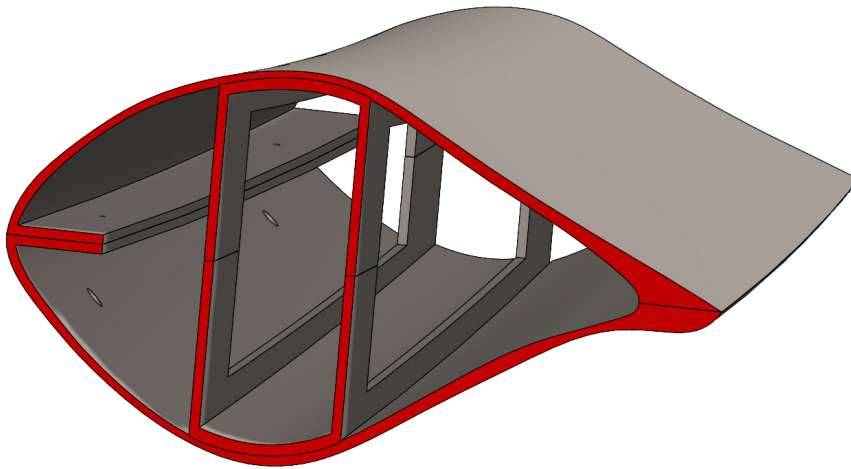


Figura 3.6: Parte do modelo 3D do perfil da pá na versão 4.

Na Figura 3.7 está ilustrado o resultado final da modelação, que no capítulo 5 falaremos com mais detalhes.

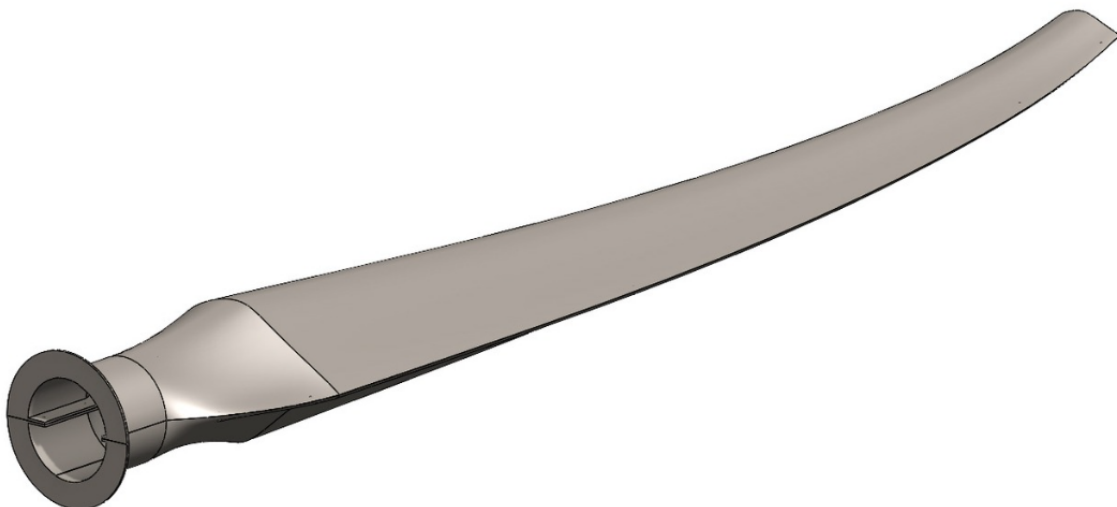


Figura 3.7: Modelo 3D final.

3.3 Atuais processos de fabrico de pás

A evolução do fabrico de pás para turbinas eólicas tem testemunhado avanços significativos ao longo dos anos, passando de métodos trabalhosos para processos mais automatizados, eficientes e de maior qualidade. Nos estágios iniciais, a produção de pás para turbinas eólicas dependia fortemente da técnica de laminação manual a húmido (*hand lay-up*), utilizando moldes abertos. Este processo consistia na colocação manual de fibras de vidro no molde, que eram depois impregnadas com resina através de pincéis ou rolos de pintura. Após a impregnação, as conchas das pás eram coladas utilizando adesivos para fixar as longarinas estruturais [10].

Apesar de ser amplamente utilizado nas fases iniciais do fabrico de pás, o método de laminação manual a húmido apresentava diversas desvantagens notáveis. O processo era extremamente intensivo em termos de mão-de-obra, resultando em custos elevados. Além disso, a qualidade das peças produzidas era relativamente baixa e inconsistente. Adicionalmente, este método apresentava riscos ambientais e de saúde devido à exposição aberta às resinas e solventes durante o processo de fabrico.

A Figura 3.8 ilustra o processo de disposição manual. A espessura da peça composta é aumentada pela aplicação de uma série de camadas de reforço e camadas de resina líquida. O processo de cura ocorre à temperatura ambiente. Compósitos construídos em sanduíche também podem ser fabricados por este processo.

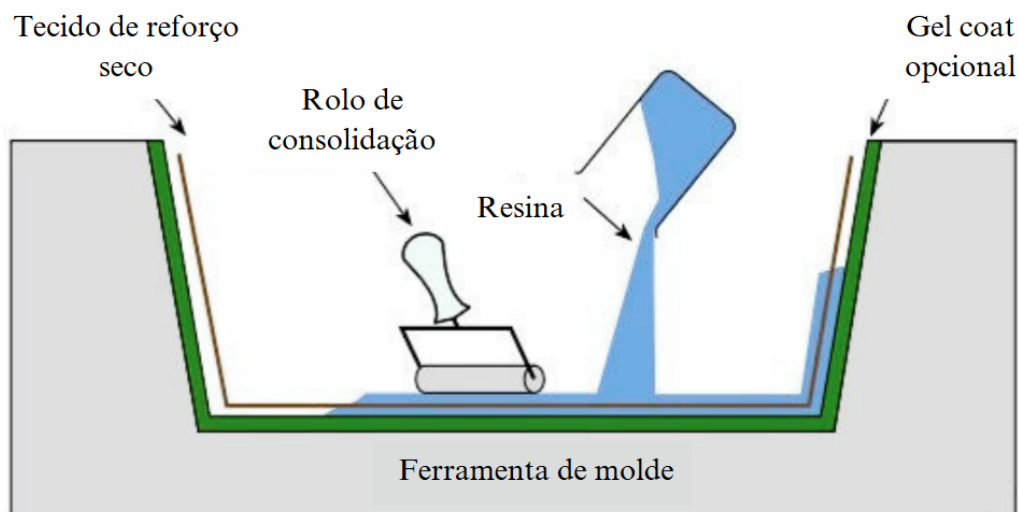


Figura 3.8: Técnica de laminação manual a húmido (*hand lay-up*), adaptado de [10].

Para enfrentar estes desafios, a indústria explorou técnicas alternativas de fabrico, como o enrolamento filamentar (*filament winding*). Este método foi inicialmente investigado na década de 1970 e voltou a ganhar interesse mais recentemente, especialmente na produção de pás segmentadas por empresas como a ENERCON. O enrolamento filamentar envolve a aplicação de tecido de fibra de vidro impregnado com epóxi em torno de um mandril, que depois é curado para formar um segmento interior da pá, de alta resistência.

Uma das principais vantagens do enrolamento filamental é a capacidade de automatizar o processo de produção, resultando em custos de material mais baixos e uma redução no tempo de produção. A fiabilidade e a repetibilidade deste processo automatizado também contribuem para a produção de componentes de maior qualidade, com uma integridade estrutural e consistência aprimoradas. Além disso, o enrolamento filamental oferece melhores condições ergonômicas de trabalho, reduzindo o esforço físico dos trabalhadores em comparação com as técnicas de laminação manual [11].

No caso do fabrico de pás da ENERCON, o enrolamento filamental é utilizado para criar o núcleo resistente à carga, ou "blank", do segmento interior da pá. Este núcleo é depois combinado com uma borda de fuga aerodinâmica pré-fabricada, que inclui o *spoiler* integrado característico da ENERCON, completando assim o segmento interior da pá. Este processo em duas etapas não só melhora o desempenho aerodinâmico da pá, como também assegura uma estrutura robusta e durável, capaz de suportar as condições exigentes a que as turbinas eólicas estão sujeitas em operação.

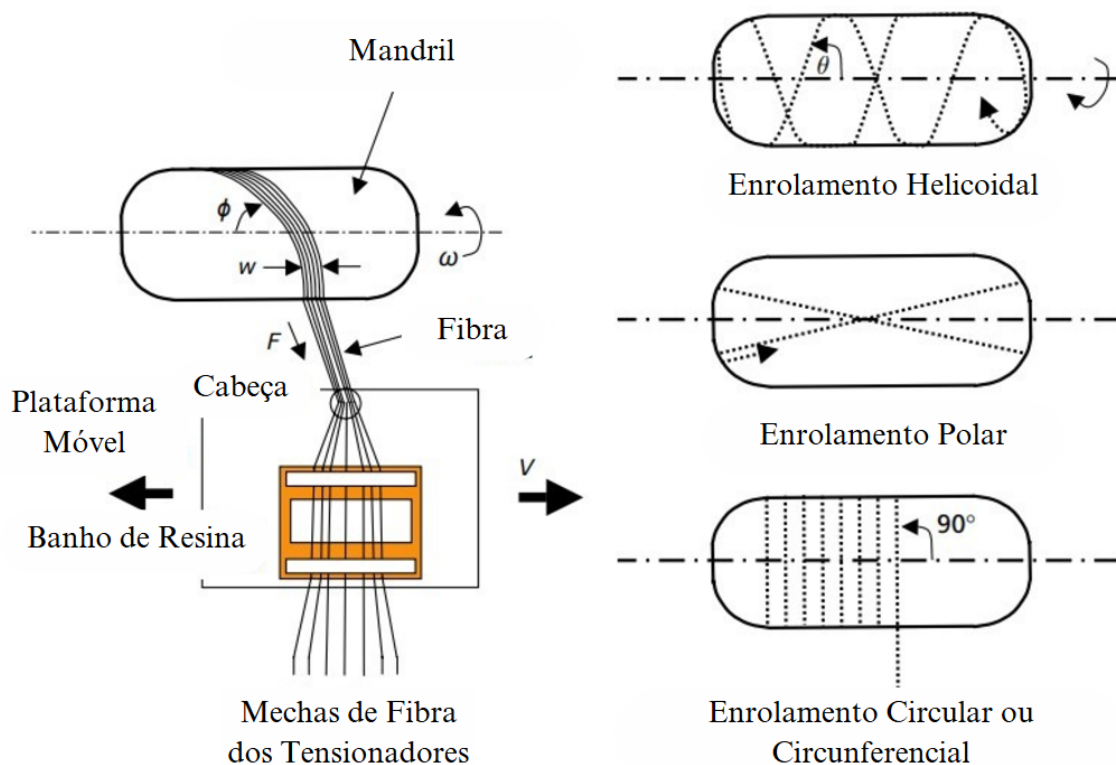


Figura 3.9: Enrolamento filamental (*filament winding*), adaptado de [10].

O processo de *filament winding* (enrolamento de filamentos), é utilizado na fabricação de uma ampla variedade de peças e componentes de materiais compósitos, tem se mostrado tecnicamente eficaz e competitivo em termos de custo ao longo das últimas décadas. Peças compostas com simetria axial, como sistemas de tubulação para esgoto ou abastecimento, vasos de alta pressão, seções de fuselagens de aeronaves, veios de transmissão, assim como peças não simétricas, como é o nosso caso, as pás de turbinas eólicas e chassis de veículos,

estão entre as aplicações identificadas.

Esse processo de fabricação, ilustrado na Figura 3.9, consiste em um procedimento automatizado onde um filamento contínuo impregnado (ou uma fita) é enrolado sobre um mandril em rotação. O movimento sincronizado do mandril e da cabeça de entrega em sua carruagem de movimento controla o trajeto da fibra, resultando no padrão desejado [10].

Na Figura 3.10, está representada uma pá segmentada de duas peças feitas pela ENERCON. As pás mais longas feitas de acordo com essa tecnologia são as do modelo E-115, que representam uma evolução do projecto original do E-101, como se mostra na figura referenciada neste parágrafo, e utilizam um método de união patenteado que compreende parafusos transversais e longitudinais [12].

Em resumo, a transição dos métodos tradicionais de laminação manual a húmido para técnicas mais avançadas, como o enrolamento filamentar, representa um avanço significativo na eficiência, qualidade e segurança do fabrico de pás para turbinas eólicas. À medida que a indústria continua a inovar, espera-se que estas melhorias conduzam a pás ainda mais duráveis e eficientes, contribuindo para o crescimento e sustentabilidade da energia eólica.

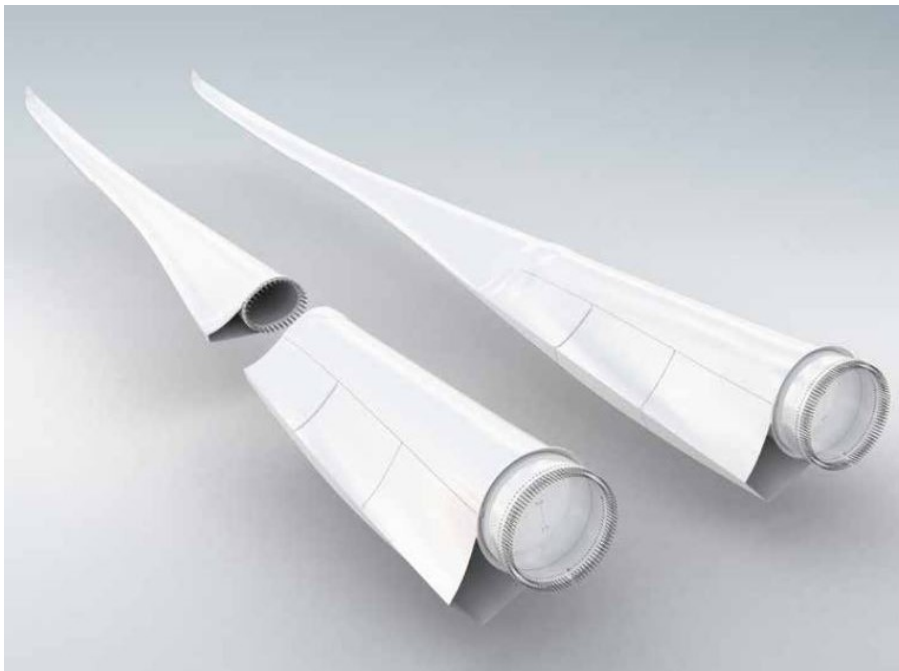


Figura 3.10: Pás segmentadas da ENERCON [12].

A introdução de tecnologias de vácuo revolucionou a fabricação de pás eólicas, trazendo melhorias significativas em termos de eficiência, qualidade e consistência dos produtos finais. Entre as inovações mais notáveis estão os processos de infusão a vácuo e a utilização de prepregs (fibras pré-impregnadas).

Os prepregs consistem em fitas de fibras que já vêm pré-impregnadas com um sistema de resina não curada, fornecido diretamente pelo fabricante. Essas fitas são posteriormente

dispostas em camadas, seguindo uma sequência específica que varia conforme o caso de carga do laminado. Após a disposição das camadas, o material é curado em forno ou em autoclave. A utilização de prepregs é uma prática comum em empresas como a Vestas, que optam por esta técnica para garantir a qualidade e a uniformidade das suas pás [11].

Por outro lado, a maioria dos fabricantes prefere o método de infusão a vácuo com pré-formas secas. Este processo envolve a disposição de camadas secas de fibras no molde, seguidas pela aplicação de vácuo para infundir a resina através das fibras. A infusão a vácuo é amplamente adotada na produção de pás, especialmente para as mais longas, devido à sua capacidade de garantir uma impregnação uniforme e minimizar a presença de bolhas de ar, o que melhora a resistência e a durabilidade da pá.

Entre as tecnologias atualmente utilizadas na fabricação de pás para turbinas eólicas, a infusão a vácuo destaca-se como a mais amplamente empregada, especialmente para a produção de pás de grandes dimensões. Esta técnica oferece várias vantagens, como a redução de peso, a melhoria da qualidade estrutural e a capacidade de produzir componentes de maior tamanho e complexidade com precisão. Além disso, a infusão a vácuo contribui para uma produção mais limpa e segura, uma vez que reduz a exposição dos trabalhadores a compostos voláteis e minimiza o desperdício de material [11].

Com o avanço contínuo dessas tecnologias de vácuo, a fabricação de pás eólicas tornou-se mais sofisticada e eficiente, permitindo o desenvolvimento de turbinas mais potentes e confiáveis. Estes progressos são fundamentais para o crescimento da energia eólica como uma fonte sustentável de energia, ajudando a reduzir o custo da eletricidade gerada a partir do vento e a aumentar a competitividade desta tecnologia no mercado global de energia.

As pás são componentes cruciais das turbinas eólicas, desempenhando um papel fundamental na melhoria da produção de energia. No entanto, a falha catastrófica de uma pá não só compromete a eficiência da turbina, mas também pode levar ao colapso de outras partes da estrutura, o que deve ser evitado a todo custo. As cargas extremas de vento ou operacionais podem causar danos repentinos, enquanto as cargas regulares ao longo da vida útil da pá podem provocar degradação do material e fadiga. Esses fatores não só limitam a eficácia das pás, mas também podem comprometer a segurança da turbina como um todo. Portanto, é essencial garantir que as pás sejam projetadas e fabricadas com materiais e técnicas que minimizem esses riscos, assegurando sua durabilidade e integridade estrutural ao longo do tempo.

A estrutura e os materiais das pás de uma turbina eólica determinam os tipos de processos de fabricação que podem ser utilizados, sendo, portanto, importante compreendê-los. A função principal de uma pá é capturar o vento e transferir a carga para o eixo da turbina, o que gera um momento de flexão na raiz do rolamento e no eixo principal. Essencialmente, uma pá de turbina eólica funciona como uma grande viga em balanço, sujeita a dois tipos principais de carga: as cargas de flexão na direção *flapwise* (fora do plano), resultantes das forças aerodinâmicas, e as cargas de flexão na direção *edgewise* (no plano), que surgem devido ao peso próprio da pá. Estes fatores influenciam diretamente

o projecto estrutural e os materiais escolhidos para a fabricação das pás, com o objetivo de garantir que elas possam suportar essas cargas ao longo de sua vida útil, mantendo a eficiência e a segurança da turbina.

A estrutura das pás é projetada para resistir a essas cargas enquanto mantém uma forma o mais próximo possível do perfil aerodinâmico ideal. As superfícies de sucção e de pressão das pás são painéis aerodinâmicos amplos, projetados para "captar o vento" e transferir as cargas para os "*spar caps*" (reforços estruturais). Estas superfícies são constituídas por um material de núcleo leve, *sandwiched* entre camadas de tecido triaxial, que proporciona a combinação necessária de resistência e leveza. A escolha desse projecto permite que as pás maximizem a eficiência aerodinâmica enquanto suportam as forças que atuam sobre elas durante a operação da turbina.

As superfícies das pás são geralmente moldadas em duas partes, conhecidas como "conchas da pá", utilizando ferramentas específicas. Estas duas conchas são unidas entre si através de adesivos aplicados nas bordas dianteira e traseira, além de serem fixadas aos "*spar caps*" no centro, que são os principais componentes estruturais da pá. As conchas são feitas de uma camada fina e leve de fibra de vidro triaxial, o que lhes confere uma espessura reduzida. Devido a essa característica, elas precisam ser estabilizadas com um núcleo leve, geralmente composto de madeira balsa ou espuma de Policloreto de Vinila (PVC), para evitar a ocorrência de encurvamento. A junção das conchas nas bordas dianteira e traseira é essencial para garantir a integridade estrutural e a resistência da pá durante a operação.

As *spar caps*, são elementos estruturais críticos nas pás e são geralmente fabricados com materiais unidirecionais, como a fibra de carbono, especialmente em pás modernas destinadas a turbinas *offshore*. A fibra de carbono é preferida em relação à fibra de vidro tradicional devido à sua superior capacidade de resistência à flexão, o que é essencial para maximizar a rigidez da pá nas zonas mais espessas da secção.

As *shear webs*, ou almas de cisalhamento, têm um papel fundamental na transferência de forças entre as *spar caps*. Estas almas são tipicamente fabricadas em tecido de vidro biaxial, reforçado por um núcleo de materiais leves, como a madeira balsa ou espuma de PVC. A combinação desses materiais assegura que a estrutura da pá possa suportar as diversas cargas que ocorrem durante a operação, sem comprometer a integridade estrutural ou o desempenho aerodinâmico da pá.

Toda a superfície exterior da pá é revestida com um acabamento especial que protege a estrutura de compósito contra as condições ambientais, como a degradação por raios ultra violetas e a penetração de humidade, além de proporcionar uma superfície aerodinâmica adequada. Este revestimento geral é tipicamente um *gelcoat* aplicado diretamente no molde, embora também possa incluir um preenchimento adicional e uma camada superior de proteção.

Além disso, no bordo de ataque, perto da ponta da pá, é aplicado um material resistente à erosão provocada pela chuva, garantindo uma maior durabilidade nas áreas mais expostas ao desgaste. Na Figura 3.11, está ilustrada a estrutura da pá e a nomenclatura convencional.

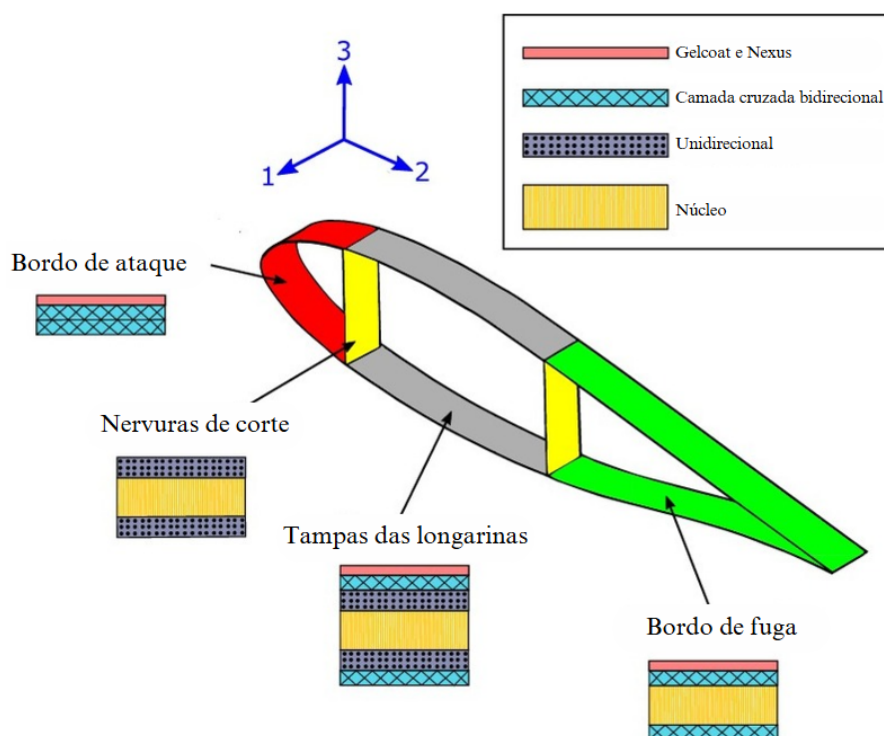


Figura 3.11: Estrutura da pá e a nomenclatura convencional, adaptado de [13].

De forma a ter um melhor esclarecimento, na Figura 3.12, é possível observar a estrutura de uma pá, destacando-se os materiais utilizados na sua construção. Esta representação ilustra como os diferentes componentes, são integrados para formar uma estrutura robusta e eficiente, capaz de resistir às forças aerodinâmicas e ambientais a que está sujeita durante a operação.

3.4 Infusão a Vácuo

A técnica de infusão a vácuo revolucionou o fabrico de pás de turbinas eólicas, sendo atualmente o método mais utilizado na indústria. Neste processo, as fibras secas são organizadas dentro de moldes fechados, nos quais a resina é injetada sob pressão, permitindo que preencha completamente os espaços entre as fibras. Após a infusão da resina, o componente é submetido a um processo de cura, consolidando a estrutura.

Existem duas variantes principais deste método: a Moldagem por Transferência de Resina (RTM) e a Moldagem por Transferência de Resina Assistida a Vácuo (VARTM). Na RTM, a resina líquida preenche o molde fechado que contém as fibras secas, enquanto na VARTM, a resina é puxada para dentro do molde através de um vácuo parcial, o que não só garante a saturação completa da pré-forma, mas também ajuda na compactação do material durante o processo [11].

A preferência pelo método VARTM no fabrico de pás deve-se, em parte, à sua eficiência e à qualidade superior do produto final. Ao substituir a parte superior do molde por um saco

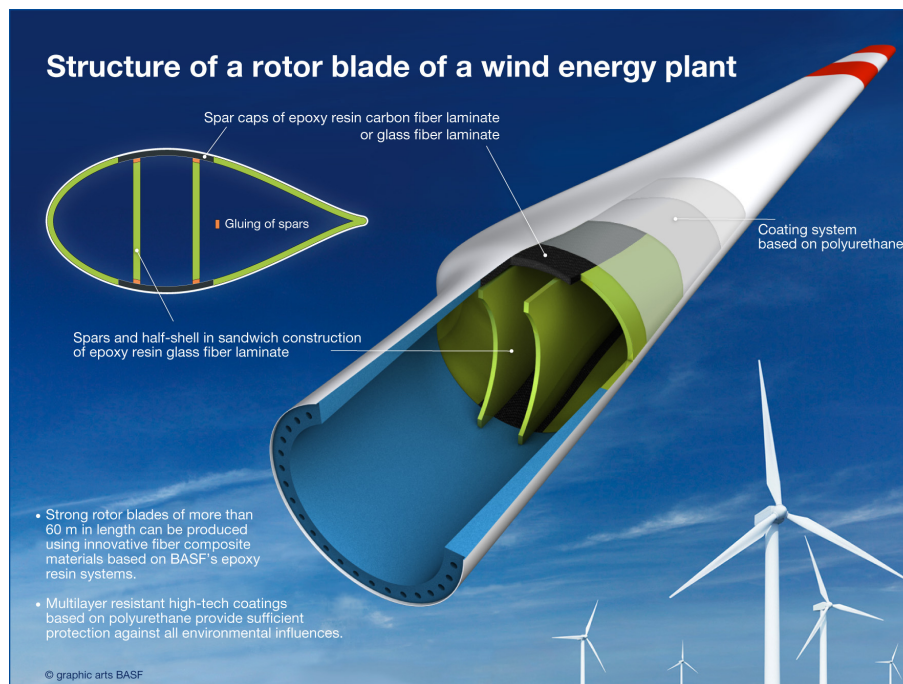


Figura 3.12: Elementos da estrutura interna da pá [14].

de vácuo, o VARTM permite uma simplificação do molde, necessitando apenas de um lado. Durante a produção, as camadas de material pré-formado são cuidadosamente dispostas ao longo do comprimento da pá dentro do molde, juntamente com os componentes de núcleo sanduíche. Esta etapa é crítica, pois a eficiência do tempo de produção e a qualidade do produto final dependem diretamente da precisão e eficácia deste processo de infusão.

Nas fases iniciais do processo de fabrico de pás de turbinas eólicas, a preparação do reforço ou pré-forma é uma etapa crucial. Esta inclui o corte das mantas de fibra de vidro e a preparação do núcleo, que geralmente é composto por madeira de balsa ou espuma, utilizados nas áreas sanduíche da pá. O passo seguinte envolve a colocação das pré-formas no molde de um único lado, onde o reforço é empilhado e posicionado. Este processo é conhecido como drapeamento, onde o material se deforma e adapta à curvatura do molde durante a sua inserção. O drapeamento é uma etapa delicada, pois pode causar rugas na pré-forma, o que pode originar defeitos que comprometem o desempenho mecânico da pá. Além disso, as propriedades do material podem ser alteradas durante o drapeamento.

Durante a disposição das camadas, utiliza-se material pré-cortado, embora, em alguns casos, o material seja retirado diretamente do rolo para minimizar o tempo de colocação e a distorção do material. Uma vez concluída a disposição do núcleo e da pré-forma, inicia-se a preparação para a injeção aplicando uma película destacável (*peel ply*), que facilita a separação dos tubos de injeção e do material de vedação após a infusão e a cura. Após a aplicação da película, posicionam-se as entradas de resina, que são conectadas a contentores de resina. Diversas entradas de resina são distribuídas ao longo do molde. Em teoria, este método de fabricação é bem adaptável para escalabilidade, visto que mais entradas de resina e pontos de vácuo podem ser adicionados. No entanto, pilhas mais

espessas de pré-forma podem aumentar a propensão à formação de defeitos de rugas, além de tornar mais provável o movimento ou deslizamento das camadas entre si. A espessura é maior na secção da raiz, podendo atingir 50-60 cm no estado consolidado [11].

Por fim, a pré-forma é coberta com uma folha de alumínio, seguida pelo saco de vácuo, e depois selada hermeticamente usando fita adesiva em torno do perímetro. O ar é então evacuado do saco, comprimindo a pré-forma e criando o vácuo completo. Após atingir o vácuo total, as entradas de resina são abertas sequencialmente, permitindo a infusão e saturação das pré-formas. Após a saturação completa, a peça é deixada durante várias horas para que o processo de cura se finalize. O último passo do ciclo envolve a desmoldagem da peça após a cura. Na Figura 3.13, está representado o esquema genérico deste processo de fabrico.

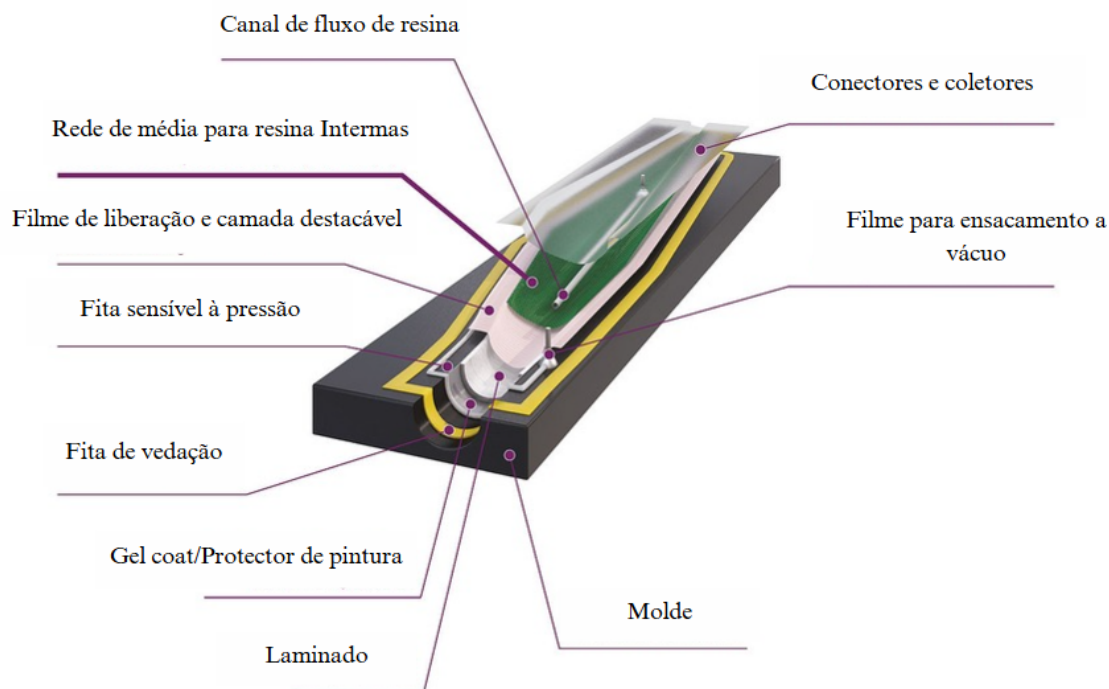


Figura 3.13: Esquema do processo de fabrico por infusão a vácuo, adaptado de [15].

Uma nota a se destacar é que, o processo de infusão tende a ser mais económico do que o processo de prepreg, embora o processo de prepreg ofereça propriedades mecânicas menos variáveis em comparação com a infusão.

3.5 Projeto de moldes

No processo de fabrico de pás eólicas, estas são produzidas em duas metades separadas, em moldes específicos. As superfícies de pressão e sucção da pá são fabricadas individualmente através da aplicação de materiais de reforço secos e de núcleos, seguidos pelo processo de infusão de resina. Após a criação das duas metades, estas são unidas através da aplicação de um adesivo, que é colocado na face interna da metade inferior da pá antes

de a metade superior ser posicionada sobre ela. Na Figura 3.14 está representado um molde de uma das superfícies da pá [16].



Figura 3.14: Molde de uma das superfícies de pá de turbina eólica [16].

Um conjunto completo de moldes para uma pá de 40 metros pode pesar cerca de 17 toneladas, onde aproximadamente um quarto deste peso é proveniente dos materiais compósitos, sendo o restante constituído por estruturas rígidas de aço que fornecem suporte estrutural. Na prática, estes moldes raramente produzem as 300-400 pás para as quais são especificados, pois novos projectos tornam-nos obsoletos antes de atingirem essa marca, exigindo assim a substituição por novas ferramentas [11].

Os moldes metálicos, que ainda são utilizados ocasionalmente por fabricantes de pás menores, são geralmente considerados pesados e difíceis de manusear, especialmente quando aplicados a pás de maiores dimensões. Por outro lado, os moldes de materiais

compósitos são significativamente mais leves e possuem condutividades térmicas mais baixas, o que resulta num coeficiente de expansão térmica semelhante ao dos materiais das conchas das pás. Em contrapartida, os moldes metálicos podem causar dificuldades no fabrico devido às tensões térmicas retidas e outros efeitos indesejados, como a deformação das pás, devido à diferença entre os coeficientes de expansão térmica do molde e dos materiais das pás. Além disso, os moldes compósitos podem ser fabricados na forma desejada com menor desperdício de material. Embora possam ser vistos como menos duráveis comparativamente aos moldes metálicos, as melhorias no projecto das pás e a rápida obsolescência tornam esta durabilidade menos relevante.

Nos estágios iniciais de produção de moldes para pás eólicas, os pares de moldes eram produzidos com estruturas de suporte em aço, sistemas de aquecimento controlados por microprocessadores, sistemas elétricos trifásicos, sistemas de distribuição de resina e soluções de vácuo. Esses elementos definiram o padrão para o futuro, onde se tornou norma a oferta de sistemas completos e integrados de fabricação de pás, acompanhados por todos os serviços associados necessários [16].

O processo típico de fabricação de uma pá envolve a moldagem das duas meias conchas em um par de moldes. Nessas conchas, são instalados os tampões das longarinas, reforços das nervuras e outros detalhes internos, aplicando-se adesivo nas bordas de ligação expostas.

A outra metade da concha é então virada e colocada sobre a primeira, que permanece dentro do molde, onde o adesivo é deixado a curar, selando as duas metades juntamente com todos os detalhes internos. Portanto, esse tipo de pá requer um conjunto principal de ferramentas de moldagem para as conchas, além de outros moldes necessários para produzir os reforços e os tampões das longarinas. As bordas das pás e as extremidades das raízes também podem necessitar de moldes adicionais. Normalmente, os moldes são fornecidos como uma solução completa, juntamente com todos os serviços relevantes associados.

Cada uma das metades do molde é apoiada por uma estrutura em aço suave. Para moldes mais longos e relativamente estreitos, essa estrutura de suporte em aço é essencial para que o molde mantenha as formas, que estão a tornar-se cada vez mais complexas devido à torção e à pré-curvatura. Num molde típico de 40 metros, a estrutura de treliça não deve ceder mais do que 5-10 mm quando apoiada nas extremidades. Nos pontos de articulação e elevação, onde se esperam cargas mais elevadas, é necessária uma força adicional e reforços específicos [11].

As estruturas são geralmente projetadas para estar próximas ao solo, de forma a minimizar a altura e reduzir as exigências de acesso durante a produção das pás.

Os pares de moldes são ligados por dobradiças e abrem-se como uma concha, onde a última parte do movimento da ferramenta superior é feita verticalmente para baixo, em direção aos pontos de contacto, para preservar as linhas de cola até ao ponto de contacto final (Figura 3.15). Cada metade do molde é fabricada com fibras de vidro e/ou carbono infundidas com resina, posicionadas dentro da ferramenta de acordo com as partes da

pá onde esses materiais serão moldados. São utilizados tecidos tanto tecidos como não tecidos (sem dobras), em vez de tecidos costurados. As resinas usadas são geralmente epóxi, embora os ésteres vinílicos também possam ser adequados.



Figura 3.15: Movimento de ligação das partes do molde da pá [17].



Figura 3.16: Partes do molde da pá ligadas [18].

Alguns fabricantes de pás exigem o uso de *gelcoat* como superfície interna do molde, enquanto outros não. O *gelcoat* pode proporcionar um melhor acabamento superficial com menos vazios, embora alguns considerem que ele introduz uma nova interface, que pode ser um ponto adicional de falha.

Em resumo, o projecto e a construção dos moldes desempenham um papel fundamental na eficiência e na qualidade da produção das pás, sendo cuidadosamente planejados para suportar as exigências estruturais e manter a precisão ao longo do processo de fabricação.

3.6 Materiais

As pás das turbinas eólicas são componentes críticos no processo de conversão da energia eólica em eletricidade, e a escolha dos materiais usados para fabricá-las é essencial para garantir eficiência, durabilidade e resistência às condições ambientais. Os materiais precisam ser leves, resistentes e capazes de suportar as cargas e as forças dinâmicas que as pás enfrentam, como a força do vento, a gravidade, a fadiga e a corrosão.

Esta seção visa discutir os materiais utilizados na pá da turbina eólica, com foco nas fibras de reforço, resinas e estruturas tipo sanduíche. As diversas propriedades desses materiais influenciarão o processo de fabricação.

Uma propriedade importante quando se fala de materiais para pás de turbinas eólicas é o comportamento elástico (Figura 3.17). O comportamento elástico é crucial para o desempenho das pás de turbinas eólicas, pois essas estruturas estão constantemente sujeitas a cargas variáveis, incluindo o vento, gravidade e forças centrífugas. O comportamento elástico refere-se à capacidade de um material de deformar-se sob carga e retornar à sua forma original quando a carga é removida, sem sofrer danos estruturais permanentes [19].

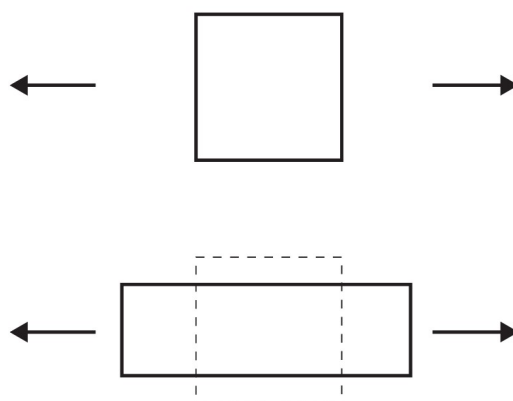


Figura 3.17: Comportamento elástico [19].

E ainda, um material isotrópico possui as mesmas propriedades mecânicas em todas as direções. Isso significa que independentemente da orientação das forças aplicadas, o material responde da mesma maneira. No contexto das pás de turbinas eólicas, o comportamento isotrópico é descrito principalmente pelo Módulo de Elasticidade, também conhecido como Módulo de Young. Ele define a quantidade de tensão (*stress*) que é gerada para um determinado incremento de deformação (*strain*) ao longo de uma direção específica. O Coeficiente de Poisson (ν) descreve a relação entre a deformação longitudinal e a deformação transversal. Quando um material é comprimido ou esticado ao longo de uma direção, ele tende a se expandir ou contrair perpendicularmente à essa direção [19].

Em materiais isotrópicos, esses dois parâmetros, Módulo de Elasticidade (E) e Coeficiente de Poisson (ν), são suficientes para descrever o comportamento elástico.

As pás de turbinas eólicas são projetadas para lidar com forças consideráveis enquanto mantêm sua integridade estrutural. O comportamento elástico permite que as pás se defletem ligeiramente sob vento forte, dissipando parte da energia e reduzindo a carga nas estruturas internas. No entanto, esse comportamento precisa ser controlado para evitar que as pás se deformem excessivamente ou entrem em ressonância, o que poderia causar falhas catastróficas.

Além disso, nas pás modernas, utilizam-se materiais anisotrópicos, como compósitos reforçados com fibras, onde as propriedades elásticas variam de acordo com a direção das fibras. Isso permite otimizar a rigidez e a flexibilidade em regiões específicas da pá, ajustando o comportamento elástico conforme necessário para maximizar a eficiência e a durabilidade.

A resistência estática e a resistência à fadiga são dois fatores críticos no projeto de materiais para pás de turbinas eólicas, dado o ambiente operacional exigente em que essas estruturas estão inseridas. A resistência estática refere-se à capacidade do material de suportar uma carga única ou contínua sem falhar, enquanto a resistência à fadiga trata da capacidade do material de suportar cargas repetidas ou cíclicas ao longo do tempo, o que é crucial em turbinas que estão constantemente sujeitas a variações na força do vento e em outros fatores ambientais.

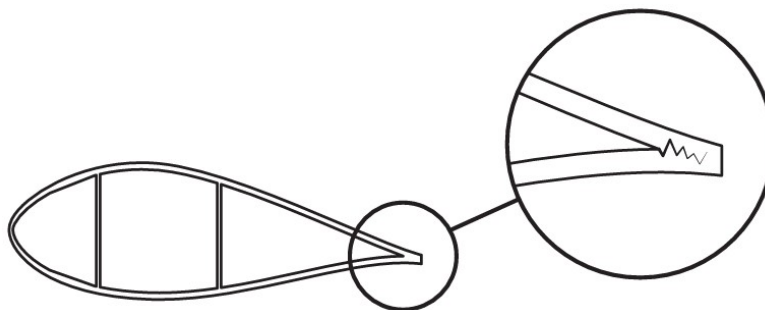


Figura 3.18: Fissuras de fadiga na borda de fuga [19].

As pás de turbinas eólicas experimentam milhões de ciclos de carga ao longo de sua vida útil, o que pode levar à falha por fadiga. A falha por fadiga ocorre quando um material é submetido a cargas repetidas ou cíclicas que, apesar de serem inferiores ao limite de resistência estática do material, acabam provocando fissuras que se propagam ao longo do tempo.

Outro fator crítico é a falha interlaminar que inclusive é um dos modos de falha mais comuns em materiais compósitos, especialmente em pás de turbinas eólicas, que são geralmente feitas de laminados compósitos. Quando a pá é submetida a dobras ou flexões repetidas, pode ocorrer uma separação entre as camadas do material, o que é conhecido como delaminação. Isso reduz significativamente a capacidade da pá de suportar cargas, comprometendo a sua integridade estrutural.

A falha interlaminar é geralmente causada por tensões normais e de corte entre as camadas de compósito, fadiga por flexão, que provoca a degradação progressiva das interfaces entre as camadas, defeitos na fabricação, como a má adesão ou a presença de bolhas de ar nas camadas de compósito, que podem atuar como iniciadores de falhas [19].

3.6.1 Materiais compósitos

Os compósitos (Figura 3.19) são materiais amplamente utilizados na fabricação de pás de turbinas eólicas devido às suas propriedades de alta resistência, baixo peso e durabilidade. Esses materiais são constituídos por várias camadas (laminas) ligadas por uma resina, formando um material anisotrópico, ou seja, com propriedades mecânicas que variam conforme a direção da carga aplicada. Esse comportamento anisotrópico é particularmente útil em turbinas eólicas, onde as pás estão sujeitas a diferentes tipos de tensões e forças.

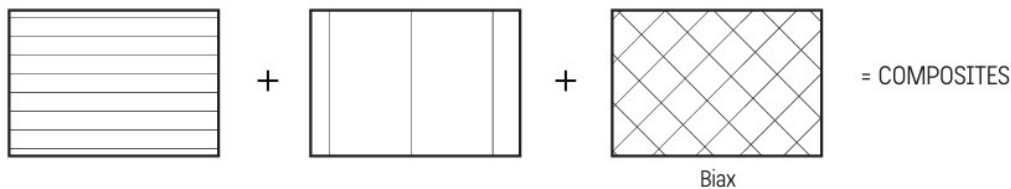


Figura 3.19: Constituição de compósitos [19].

Os compósitos consistem em duas partes principais:

1. Fibras de reforço, proporcionam resistência e rigidez ao material. As mais comuns utilizadas em pás de turbinas eólicas são:
 - Fibra de vidro: oferece uma boa relação resistência/peso e é relativamente acessível, sendo a mais usada.
 - Fibra de carbono: mais leve e resistente do que a fibra de vidro, mas também mais cara. É usada em partes críticas da pá onde o desempenho é mais importante do que o custo.
 - Fibra de aramida (Kevlar): conhecida por sua resistência ao impacto, mas usada de forma limitada em pás de turbinas.
2. Matriz de resina, geralmente *epóxi* ou *poliéster*, une as fibras e distribui a carga entre elas. Além disso, a matriz protege as fibras contra fatores ambientais, como a umidade e raios UV, e ajuda a resistir a danos por impacto.

Os compósitos são considerados anisotrópicos porque suas propriedades mecânicas, como resistência e rigidez, dependem da orientação das fibras. Em um material anisotrópico, as propriedades variam em diferentes direções, o que permite que os engenheiros projetem as pás de turbinas de modo que elas sejam mais rígidas ou flexíveis em determinadas direções. Isto é fundamental para otimizar a eficiência aerodinâmica e estrutural das pás.

Por exemplo, as fibras podem ser orientadas ao longo do comprimento da pá para aumentar a resistência à flexão, ou dispostas em ângulos específicos para suportar cargas de torção e evitar a delaminação.

Nos materiais compósitos, a disposição das fibras pode ser ajustada de diferentes formas, de acordo com as necessidades estruturais. A rigidez e a resistência do material dependem diretamente da orientação das fibras, o que confere ao compósito um comportamento anisotrópico. Esta característica é fundamental no projecto de pás de turbinas eólicas, onde a distribuição das fibras é cuidadosamente planeada para lidar com diferentes tipos de cargas.

Nas pás de turbinas eólicas, as fibras são geralmente dispostas em duas direções principais:

1. **Direção Longitudinal:** a maioria das fibras é orientada ao longo do comprimento da pá (direção longitudinal). Esta configuração é essencial para suportar a flexão causada pelos ventos fortes e as forças centrífugas, que tendem a curvar a pá. A resistência à flexão é crucial para garantir que a pá mantenha sua integridade estrutural durante a operação. Uma concentração maior de fibras na direção longitudinal aumenta significativamente a rigidez e a resistência à tração nesta direção.
2. **Direção Transversal:** há menos fibras orientadas na direção transversal (perpendicular à longitudinal), já que esta direção está sujeita a menos tensões durante a operação. Contudo, embora as forças na direção transversal sejam menores, o baixo número de fibras nesta orientação resulta em uma menor resistência nesta direção, o que pode levar a problemas como a delaminação ou falhas interlaminares. Assim, a análise das tensões transversais é mais complexa e requer atenção, pois a falta de reforço pode tornar o material mais vulnerável a danos.

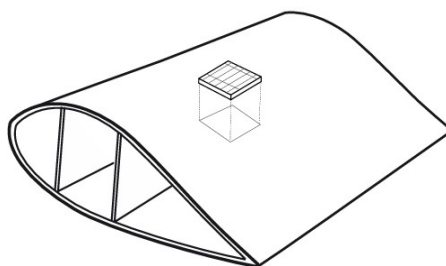


Figura 3.20: Disposição das fibras em pás de turbinas eólicas [19].

Nos materiais compósitos utilizados em pás de turbinas eólicas, a orientação das fibras em duas direções - longitudinal e transversal - é um elemento crucial no projecto estrutural. A concentração de fibras na direção longitudinal garante uma maior resistência à flexão, mas a menor presença de fibras na direção transversal cria desafios que precisam ser abordados para evitar falhas. A análise detalhada das cargas e da interação entre as direções é fundamental para garantir a eficiência e a durabilidade das pás de turbinas eólicas.

3.7 Processo de construção do protótipo físico

A presente secção descreve o processo de construção do protótipo físico da pá de turbina eólica, com o objetivo de realizar testes de identificação de danos estruturais. O objectivo desta construção é obter um modelo físico que atenda aos requisitos funcionais previamente definidos, possibilitando a simulação de diferentes cenários de danos estruturais, especialmente nos bordos de ataque e de fuga da pá. Além disso, foi fundamental garantir que o protótipo tivesse um perfil aerodinâmico adequado, robustez estrutural e que fosse fácil de montar e desmontar para diferentes configurações de teste.

O desenvolvimento do protótipo envolveu a criação de modelos tridimensionais (3D) tanto da pá quanto dos moldes no *software Solidworks*. Para tal, considerou-se a geometria final (versão 4) definida no *Brainstorming* com o perfil aerodinâmico NREL S809 (Figura 3.1), de forma a garantir que o modelo da pá reproduzisse o comportamento aerodinâmico de uma pá real em funcionamento. Este perfil foi escolhido com base em estudos prévios, incluindo [8], de eficiência aerodinâmica e de comportamento estrutural sob condições de carga típicas de operação.

O processo de construção do protótipo físico do modelo da pá de turbina eólica foi delineado com base num conjunto de fases, cada uma cuidadosamente planeada para garantir a maior precisão possível. A Figura 3.21 apresenta o fluxograma que detalha todas as etapas envolvidas, desde a preparação dos dados até à apresentação da solução final.

O primeiro passo consistiu na recolha e organização de todos os dados fundamentais para a modelagem. Estes dados foram obtidos através da análise dos requisitos funcionais da pá, tais como dimensões, materiais e parâmetros de desempenho. Adicionalmente, foi realizada uma pesquisa sobre as possíveis técnicas de fabrico, considerando as limitações e o tempo disponível para a execução do projeto.

Como dito acima, utilizando o *software Solidworks*, foi desenvolvido o modelo tridimensional da pá, baseando-se nas dimensões e formas aerodinâmicas previamente definidas. Esta etapa foi crucial para garantir que o modelo representasse com precisão as características estruturais da pá, permitindo um futuro fabrico sem complicações. O modelo 3D foi projetado de forma modular, prevendo possíveis ajustes para diferentes métodos de fabrico.

Após a criação do modelo da pá, procedeu-se à elaboração do modelo tridimensional do molde, apresentado na Figura 3.22. Este molde foi gerado com o objetivo de servir tanto a impressão 3D quanto a maquinação CNC, assegurando que ambos os métodos pudessem ser explorados conforme as condições de fabrico. A geração do molde envolveu a simulação das condições reais de fabrico, considerando a contração do material e a integridade da peça final.

Após as fases descritas acima, foi necessária a escolha entre dois métodos principais de fabrico: impressão 3D ou maquinação CNC. Cada método apresentou vantagens e desafios únicos, dos quais falaremos nas secções seguintes.

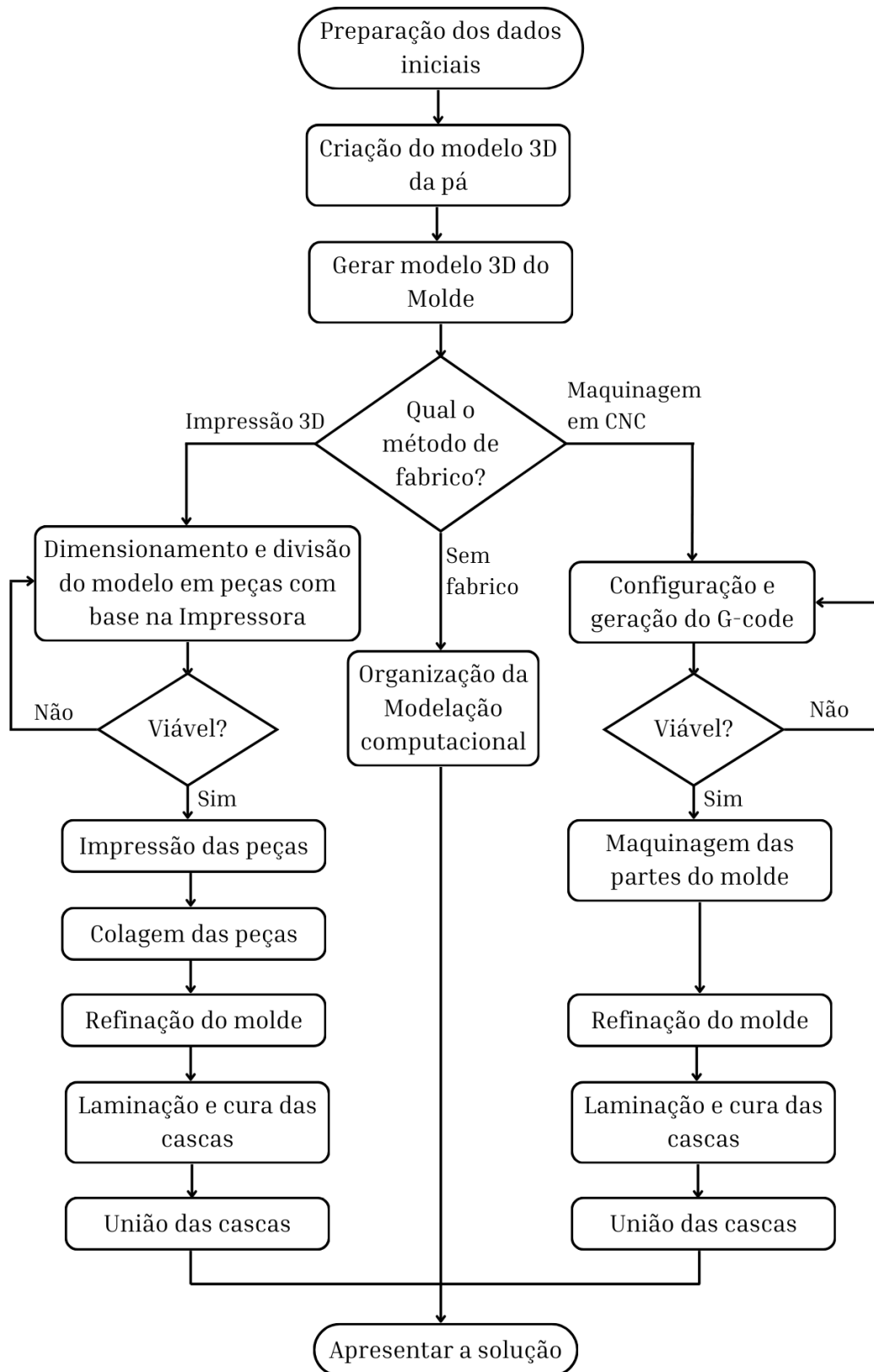


Figura 3.21: Fluxograma do processo de construção do protótipo físico

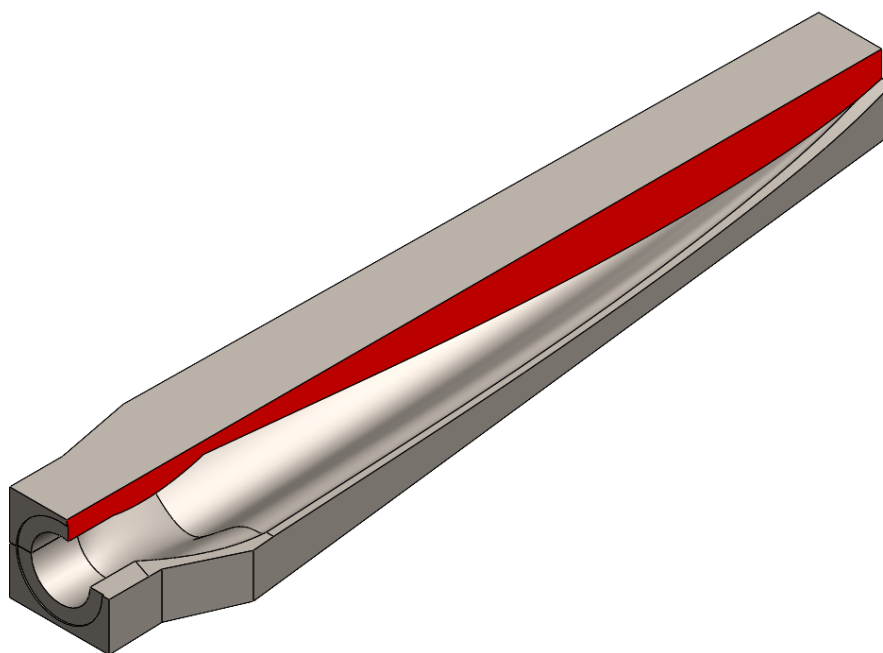


Figura 3.22: Modelação do molde da pá

3.7.1 Construção do molde: Impressão 3D

Com o projeto final da pá completo, deu-se início ao processo de criação do molde necessário para a fabricação das duas cascas (superior e inferior) em fibra de vidro. O molde foi concebido para garantir a precisão dimensional da pá, replicando fielmente o perfil aerodinâmico e as suas dimensões.

Após gerar o modelo 3D, este foi analisado para determinar a viabilidade da impressão em peças. Esta análise levou em consideração as limitações do volume da câmara de impressão, tempo e o material disponível.

Iniciou-se o processo de criação do molde utilizando o Solidworks. O molde foi projetado para ser dividido em duas partes: uma para a superfície inferior e outra para a superfície superior, com o objetivo de permitir a fabricação do protótipo físico de forma precisa.

Devido às limitações de recursos disponíveis, a primeira tentativa de desenvolvimento do molde foi realizada através de impressão 3D em PLA. As dimensões máximas do molde eram de 1800x315x110 [mm] para a superfície inferior e 1800x315x130 [mm] para a superfície superior. No entanto, devido às dimensões limitadas da impressora disponível (*Ultimaker 3 Extended* com um volume de impressão de 215x215x300 [mm]), foi necessário dividir os moldes em múltiplas peças para que pudessem ser impressas e posteriormente coladas.

A divisão do molde em peças exigiu a impressão de aproximadamente 16 peças, para cada parte do molde (superior e inferior), como podemos ver na Figura 3.23.

Estas peças foram importadas no software Cura, onde o tempo estimado de impressão para cada peça variava entre 5 a 9 horas, conforme os cálculos gerados pelo software,

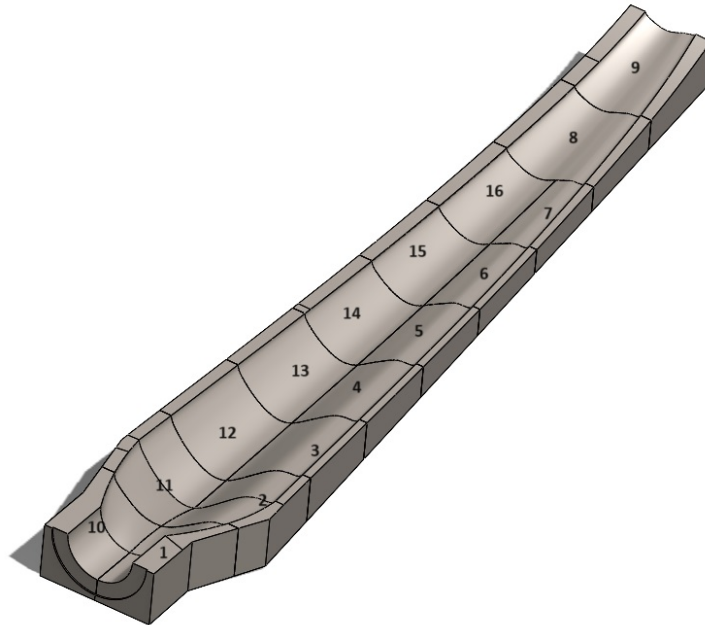


Figura 3.23: Divisão do molde da superfície inferior em múltiplas peças

a Figura 3.24, ilustra uma simulação do tempo de impressão da peça 1 do molde da superfície inferior. Embora a impressão 3D ofereça uma solução viável em termos de precisão e facilidade de prototipagem, o tempo necessário para imprimir todas as peças tornou-se um fator crítico, que mais tarde falaremos e demonstraremos a pormenor.

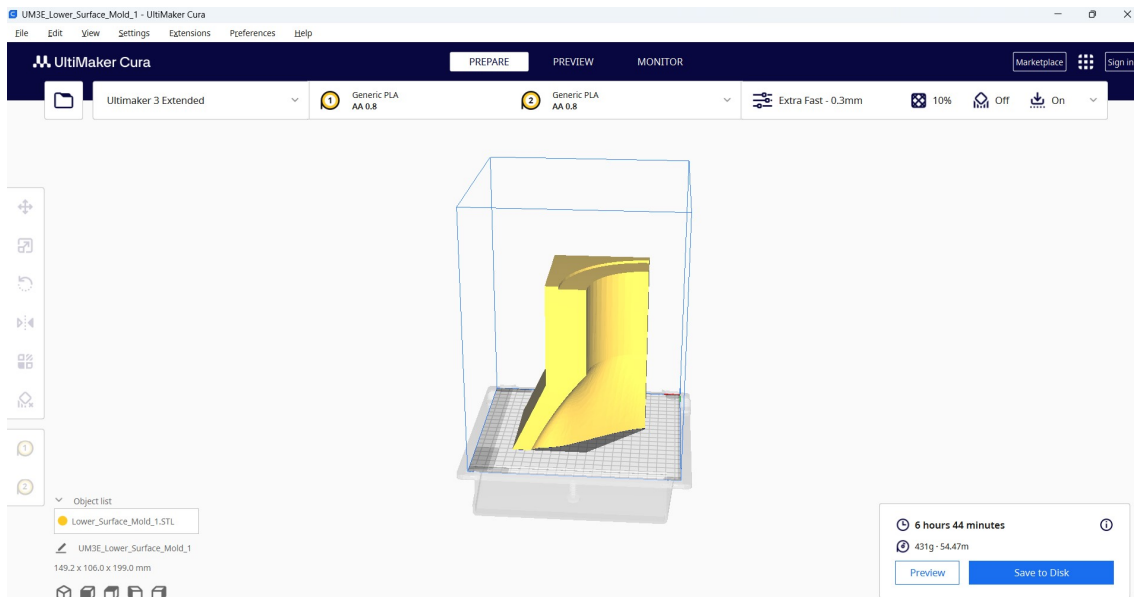


Figura 3.24: Simulação do tempo de impressão de uma peça

Tendo a viabilidade da impressão, as peças são impressas individualmente. Segue-se desta fase, o processo de colagem das partes impressas, utilizando adesivos adequados para garantir a coesão do molde. A etapa seguinte é a refinação do molde, onde devem

ser corrigidas pequenas imperfeições provenientes da impressão. Por fim, procede-se à laminação e cura das cascas, uma técnica essencial para reforçar a estrutura da pá, culminando na união das cascas, completando a construção do protótipo.

3.7.2 Construção do molde: Maquinagem CNC em madeira

Para a maquinagem CNC em madeira CNC, o modelo do molde foi configurado no software solidworks, onde se gerou o código G necessário para a execução da maquinagem. A configuração e geração do *G-code* incluiu a definição das trajetórias das ferramentas, velocidades de corte e profundidades de fresagem. Após a criação do *G-code*, foi avaliada a viabilidade da fresagem com base nas especificações das máquinas disponíveis. Caso a maquinação seja viável, as partes do molde são maquinadas de acordo com o plano estabelecido. Seguem-se, como ilustrado na Figura 3.21, os processos de refinação do molde, laminação e cura das cascas, e, finalmente, a união das cascas, similarmente ao método de impressão 3D.

Tanto no processo de impressão 3D quanto no de maquinação CNC, a refinação do molde é uma etapa chave para garantir a qualidade superficial e a precisão dimensional das peças. Este processo envolve o lixamento e ajuste fino das superfícies, de forma a corrigir pequenas imperfeições e preparar o molde para os estágios subsequentes de laminação.

A laminação consiste na aplicação de camadas de material compósito nas superfícies do molde para reforçar a estrutura da pá. O material a ser utilizado é selecionado de acordo com as propriedades mecânicas requeridas, garantindo que o protótipo possua resistência e durabilidade adequadas. Após a laminação, as cascas são submetidas a um processo de cura para assegurar a solidificação e adesão apropriada dos materiais.

Após a cura das cascas laminadas, as diferentes partes são unidas para formar o corpo completo da pá. A união é realizada utilizando parafusos e técnicas adesivas, conforme o método de fabrico escolhido, garantindo a integridade estrutural do protótipo.

Com a conclusão das etapas de fabrico, a solução é finalmente apresentada, no capítulo 5. Esta fase incluiu a documentação detalhada de todo o processo, bem como a análise dos desafios enfrentados e as soluções adotadas. Foram também discutidas as limitações do protótipo e as possíveis melhorias para futuros trabalhos, sugerindo a continuidade no desenvolvimento do protótipo físico da pá para validações experimentais mais aprofundadas.

IDENTIFICAÇÃO DE DANO

A identificação de dano em pás de turbinas eólicas é uma área de estudo crucial para garantir a segurança e a eficiência operativa das turbinas, elementos essenciais na geração de energia renovável. As pás, sujeitas a elevadas cargas cíclicas e variações ambientais, são componentes críticos que podem apresentar falhas ao longo do tempo devido à fadiga, desgaste, corrosão ou impactos, como os provocados por detritos transportados pelo vento ou até aves.

A identificação de dano nesta aplicação, com sua metodologia detalhada representada na Figura 4.1, a complementar a metodologia apresentada na Figura 2.2, baseia-se na capacidade de detetar alterações nas propriedades físicas da pá, tais como a rigidez, massa e amortecimento, as quais se manifestam nas suas respostas dinâmicas. Uma técnica amplamente utilizada é a OMA, que permite monitorizar a estrutura em funcionamento normal, capturando as suas características vibratórias para identificar variações associadas a potenciais danos. Outras abordagens incluem métodos de monitorização de vibrações, termografia e inspeção ultrassónica.

A crescente importância das energias renováveis e a necessidade de reduzir os custos operacionais tornam a identificação precoce de danos fundamental para otimizar a manutenção e prevenir falhas catastróficas. Uma pá danificada pode não só reduzir a eficiência da turbina, como também comprometer a sua integridade estrutural, resultando em avarias dispendiosas e paragens não planeadas. Assim, o desenvolvimento de métodos eficazes de identificação de dano é vital para assegurar o desempenho a longo prazo das turbinas eólicas, permitindo um planeamento mais eficiente da manutenção e uma maior fiabilidade na produção de energia.

4.1 Análise Modal Operacional

A OMA é uma área da engenharia que se concentra no estudo das propriedades modais de sistemas sob vibrações ambientais ou em condições normais de operação. A principal diferença entre a OMA e a Análise Modal Experimental (EMA) reside no facto de que a EMA requer o conhecimento e medição da excitação aplicada à estrutura, sendo um

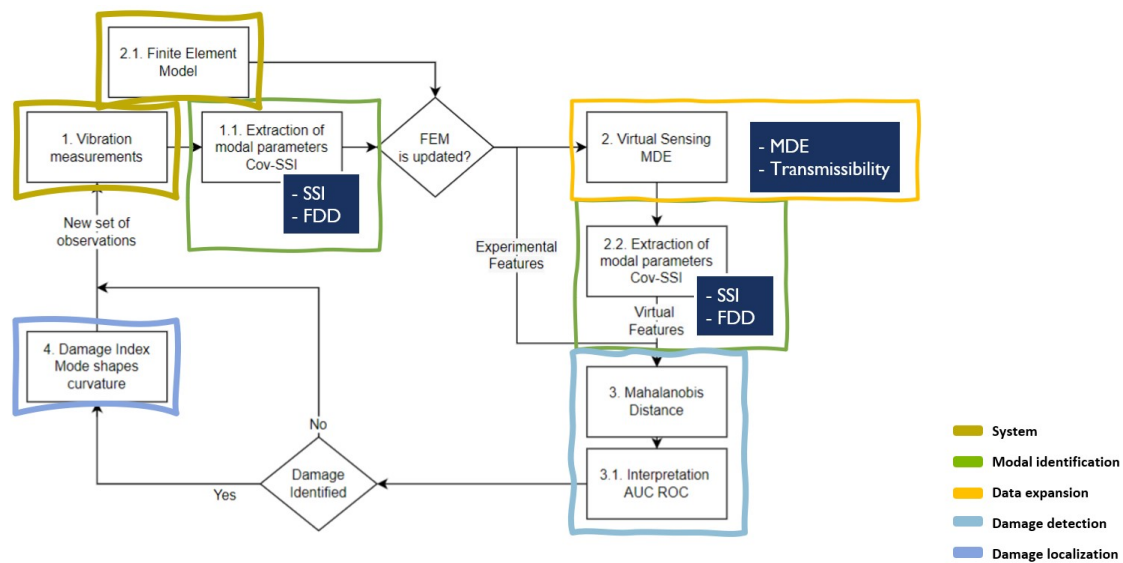


Figura 4.1: Metodologia detalhada do processo de identificação de dano

método de *input/output*. Por outro lado, a OMA utiliza apenas as respostas naturais da estrutura, sem a necessidade de medir ou conhecer a excitação, caracterizando-se como um método *output-only* para a identificação das suas propriedades dinâmicas.

A identificação das propriedades modais de um sistema estrutural envolve correlacionar as características dinâmicas de um modelo matemático com as propriedades físicas do sistema, derivadas de medições experimentais. Este processo é essencial para compreender como uma estrutura reage a diferentes condições operacionais e para prever o seu comportamento dinâmico ao longo do tempo.

No entanto, o processamento de dados em OMA apresenta desafios significativos. A complexidade dos dados pode levar a resultados enganosos se não forem devidamente interpretados. Por isso, é crucial que os engenheiros tenham uma compreensão sólida dos princípios fundamentais envolvidos, como a mecânica estrutural clássica, a análise matricial, os conceitos de vibração aleatória e as suposições simplificadoras específicas da aplicação [20].

Adicionalmente, é importante dominar os aspectos práticos relacionados com a medição de vibrações, a aquisição de dados e o processamento de sinais. A precisão na interpretação dos dados é vital para evitar resultados erróneos, que, embora possam parecer razoáveis, podem desviar-se significativamente da realidade.

Nos últimos anos, as técnicas de OMA ganharam popularidade devido à sua eficiência em termos de custo e tempo, especialmente com os avanços tecnológicos nos equipamentos de gravação e métodos computacionais. Estas técnicas são particularmente valiosas para a análise de estruturas que estão em uso contínuo, como pontes, edifícios e turbinas eólicas, onde parar a operação para testes tradicionais não é uma opção viável.

O princípio fundamental da OMA é que a estrutura a ser analisada está sujeita a excitações que, idealmente, apresentam características semelhantes às do ruído branco

- uma forma de excitação com energia distribuída por uma ampla faixa de frequências, cobrindo assim o espectro modal da estrutura. Na prática, as cargas aplicadas às estruturas raramente têm exatamente essas características ideais. No entanto, o mais importante é que todas as frequências modais relevantes sejam adequadamente excitadas, permitindo que as respostas da estrutura possam ser medidas e analisadas de forma precisa.

Um dos desafios em OMA é lidar com excitações reais que podem não apresentar um espectro de frequência ideal, como o ruído branco. Essas excitações, muitas vezes chamadas de "ruído colorido", não têm um espectro plano, mas podem ser consideradas como o resultado de um filtro aplicado a um ruído branco. Apesar disso, desde que todas as frequências modais sejam excitadas de forma suficiente, o método pode fornecer resultados válidos e úteis.

Na Figura 4.2 está representado um sistema típico a ser identificado por Análise Modal Operacional (OMA).

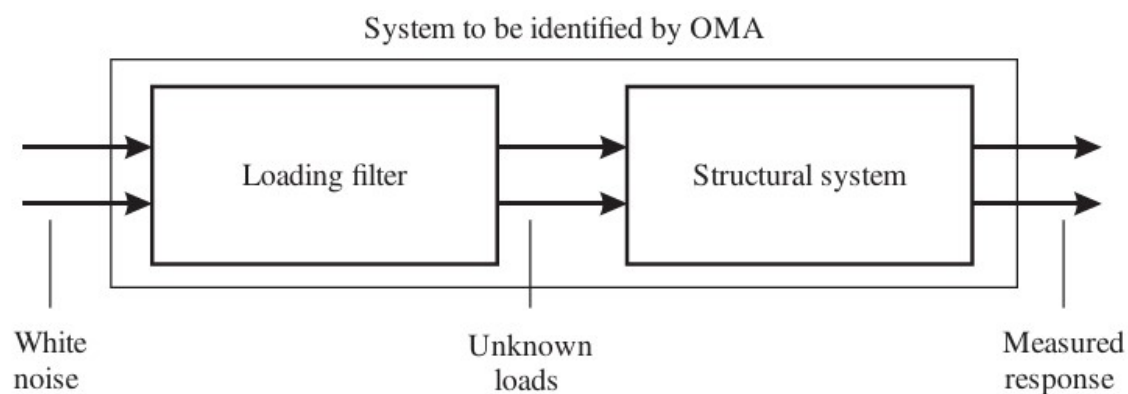


Figura 4.2: Ilustração do conceito de OMA [20].

O diagrama começa com uma entrada de ruído branco, que é um sinal que possui energia distribuída uniformemente por uma ampla faixa de frequências. Em OMA, assume-se que a excitação do sistema estrutural seja semelhante ao ruído branco, pois isso permite que todas as frequências naturais da estrutura sejam excitadas de forma relativamente uniforme.

O ruído branco passa através de um "Loading Filter" ou filtro de carga. Este filtro representa o processo pelo qual o ruído branco é transformado em forças reais que agem sobre a estrutura. Na prática, as cargas que excitam a estrutura raramente são ruído branco puro, elas são "coloridas" por este filtro, significando que algumas frequências podem ser amplificadas ou atenuadas. Este filtro pode representar influências como o vento, vibrações de máquinas, ou outras excitações ambientais que não têm um espectro plano.

As cargas que resultam do filtro de carga são representadas como "Unknown Loads" ou cargas desconhecidas. Estas são as forças reais aplicadas ao sistema estrutural, mas cujo espectro exato de frequência e amplitude não é conhecido. O desafio na OMA é que

essas cargas não são diretamente mensuráveis ou conhecidas.

As cargas desconhecidas agem sobre o "*Structural System*" ou sistema estrutural, que é a estrutura física cujo comportamento dinâmico se deseja estudar. O sistema estrutural responde a essas cargas, e essa resposta depende das propriedades modais do sistema, como frequências naturais, modos de vibração e amortecimento.

Finalmente, a resposta do sistema estrutural às cargas aplicadas é medida. Estes são os dados experimentais que são capturados durante a análise. Na OMA, essa resposta medida é utilizada para identificar as propriedades modais do sistema, sem necessidade de conhecer exatamente as cargas aplicadas.

A Análise Modal Operacional (OMA) pode ser realizada utilizando diferentes abordagens para identificar as propriedades modais de uma estrutura, sendo as duas mais comuns a Identificação no Domínio do Tempo ("*Time Domain Identification*") e a Identificação no Domínio da Frequência ("*Frequency Domain Identification*"). Estas técnicas têm características próprias, e a escolha entre elas depende do tipo de dados disponíveis, das características da estrutura a ser analisada e dos objetivos específicos da análise.

Identificação no Domínio do Tempo

A Identificação no Domínio do Tempo baseia-se na análise direta das respostas temporais medidas de uma estrutura. Em vez de transformar os dados para o domínio da frequência, como na Identificação no Domínio da Frequência, esta abordagem trabalha diretamente com os sinais medidos ao longo do tempo.

No domínio do tempo, estamos a lidar com o comportamento de decaimento livre das vibrações, que são as respostas naturais da estrutura após a remoção da excitação. Em OMA, essas respostas são frequentemente estimadas através de funções de correlação ou funções similares, como as funções de decaimento aleatório.

Durante o decaimento livre, todos os modos de vibração que estão presentes no sinal estão ativos a qualquer momento ao longo do decaimento. Isso significa que as diferentes frequências naturais da estrutura (os "modos") contribuem simultaneamente para a resposta medida.

No domínio do tempo, o problema de identificação é dito ter "*full rank*", ou seja, todos os modos de vibração contribuem para a complexidade do problema de identificação a qualquer momento. Isto torna o problema matematicamente mais complexo, pois todas as componentes modais estão misturadas e devem ser separadas durante a análise [20].

A presença simultânea de todos os modos de vibração no sinal pode ser vista como uma desvantagem, porque torna o problema de identificação mais difícil. É mais desafiador separar e identificar individualmente os modos de vibração quando todos eles estão sobrepostos no tempo.

No entanto, uma vantagem importante da identificação no domínio do tempo é que os dados tendem a ser menos enviesados (menos distorcidos) em comparação com os dados no domínio da frequência. Isto significa que as funções de decaimento livre utilizadas

na identificação modal podem proporcionar estimativas mais precisas das características modais, com menor probabilidade de introduzir erros sistemáticos.

Todavia, apesar de ser matematicamente mais desafiadora devido à superposição de todos os modos de vibração, ela pode oferecer estimativas mais precisas dos parâmetros modais porque os dados são menos suscetíveis a erros de viés. Esta precisão é importante em aplicações como a monitorização de estruturas (como turbinas eólicas), onde é crucial identificar pequenas mudanças nas propriedades dinâmicas que podem indicar danos ou deterioração.

No domínio do tempo, existem diversas técnicas disponíveis para identificação modal, cada uma com suas particularidades e detalhes. Contudo, nesta tese, o foco será na técnica conhecida como SSI.

4.1.1 *Stochastic Subspace Identification*

O método SSI é um método de identificação modal baseado no domínio do tempo que utiliza técnicas de análise de covariância para extrair os parâmetros modais a partir das respostas temporais da estrutura.

O SSI é uma técnica de OMA que tem sido empregada há várias décadas na engenharia estrutural e de sistemas. Introduzida por Van Overschee e De Moor em [21], o SSI oferece uma abordagem eficaz para identificar as características modais de uma estrutura a partir de medições de resposta dinâmica. A principal inovação da SSI é sua capacidade de identificar um modelo estocástico de espaço de estados exclusivamente com base nessas medições, sem a necessidade de excitação controlada. Isso é particularmente relevante, pois permite a análise de sistemas em condições operacionais reais, onde a excitação natural, como o ruído branco, é predominante.

O conceito de ruído branco, mencionado acima, é crucial para entender a aplicação prática dessa técnica. O ruído branco é um tipo de excitação aleatória que contém uma ampla gama de frequências com intensidade uniforme em todo o espectro. Na prática, o ruído branco é encontrado em ambientes naturais, como vibrações causadas pelo vento ou movimentos oceânicos. Ao usar o ruído branco como excitação, o SSI pode capturar a resposta dinâmica de uma estrutura em condições operacionais reais, sem a necessidade de excitação artificial.

Modelos de espaço de estados

Os modelos de espaço de estados são uma abordagem fundamental para descrever o comportamento dinâmico de sistemas mecânicos. Nas equações de movimento de um sistema mecânico, essas propriedades podem ser expressas em uma forma matricial diferencial, como mostrado na equação 4.1 [1].

$$M\ddot{y}(t) + D\dot{y}(t) + Ky(t) = f(t) \quad (4.1)$$

Onde M , D e K representam as matrizes de massa, amortecimento e rigidez, respectivamente. A força de excitação $f(t)$ e o vetor de deslocamento $y(t)$ são os componentes que caracterizam a resposta dinâmica contínua do sistema ao longo do tempo.

No entanto, na prática, as medições de resposta são dadas em instantes de tempo discretos, e nem todos os Graus de Liberdade (DOFs) do sistema podem ser diretamente medidos. Além disso, há outras fontes de excitação desconhecidas e ruídos relacionados às próprias medições. Portanto, para modelar o sistema de forma mais adequada, é necessário simplificar a equação de segunda ordem 4.1 em um conjunto de equações de primeira ordem, conforme mostrado na equação 4.2.

$$\begin{cases} \dot{u}(t) = Au(t) + Bf(t) \\ y(t) = Cu(t) \end{cases} \quad (4.2)$$

Nessa nova formulação, o vetor de estado $u(t)$ é definido como uma função do vetor de deslocamento $y(t)$, permitindo a representação do sistema em um espaço de estados. As matrizes A , B e C no sistema 4.2 descrevem as propriedades do sistema e como ele responde às forças de entrada e saída. A matriz A , em particular, contém os valores próprios do sistema, que correspondem às suas frequências naturais. Essa representação de espaço de estados é fundamental para a análise e modelação de sistemas dinâmicos [1].

$$A = \begin{bmatrix} 0_{N \times N} & I_{N \times N} \\ -M^{-1}K_{N \times N} & -M^{-1}D_{N \times N} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

A matriz A descreve as características dinâmicas intrínsecas do sistema, como sua rigidez, amortecimento e massa. Ela influencia diretamente as frequências naturais e os modos de vibração do sistema, fornecendo informações sobre sua resposta dinâmica sob diferentes condições de operação. Por outro lado, a matriz B representa como as forças externas são aplicadas ao sistema e como elas afetam sua dinâmica.

$$B = \begin{bmatrix} 0_{N \times N} \\ -M^{-1} \end{bmatrix}_{2N \times N} \quad (4.4)$$

Covariance-driven Stochastic Subspace Identification

O *Covariance-driven Stochastic Subspace Identification (SSI-COV)*, em português, método de Identificação Estocástica por Subespaço com base na Covariância é uma técnica que permite a identificação de um modelo estocástico de espaço de estados a partir de medições de resposta. Ele assume um modelo de espaço de estados estocástico e discreto e utiliza as respostas amostradas no tempo discreto para calcular a matriz de covariância de saída, também conhecida como matriz de correlação cruzada.

O SSI-COV é baseado em uma formulação estocástica e discreta do modelo de espaço de estados, onde a matriz de covariância de saída, também conhecida como matriz de

correlação cruzada, desempenha um papel central. Essa matriz é derivada das respostas dadas em diferentes defasagens de tempo e pode ser representada de forma matricial com dimensões (N,l) onde N é o número de sensores e l é o comprimento do vetor de respostas [2]:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_1 \\ \mathbf{Y}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{Y}_N \end{bmatrix}_{N \times l} \quad (4.5)$$

A partir das covariâncias das respostas amostradas, a matriz de Toeplitz em bloco T_i é construída, permitindo a decomposição do modelo em observabilidade e controlabilidade.

Essa decomposição, realizada através da Decomposição em Valores Singulares (SVD), possibilita a recuperação dos parâmetros modais do sistema, incluindo as frequências naturais, amortecimentos e formas modais.

No SSI-COV, a matriz de covariância discreta, R_i pode ser estimada como:

$$\mathbf{R}_i = \mathbb{E} \left[y_{k+1} \cdot y_k^T \right] \quad (4.6)$$

Uma seleção adequada de parâmetros é essencial no método SSI-COV. Se o número de linhas de bloco for muito baixo, a resolução de frequência não será suficientemente baixa, enquanto se for muito alto, o número de modos espúrios aumentará.

Com isto, percebe-se que, o SSI-COV é dependente dos parâmetros escolhidos, sendo os mais importantes a ordem do modelo e o número de linhas de bloco, juntamente com o nível de estabilização. A ordem do modelo afeta os resultados obtidos, mas sua determinação é desafiadora devido à influência do ruído nos valores singulares. O nível de estabilização está relacionado ao número de linhas de bloco e afeta a clareza do diagrama de estabilização. Portanto, é fundamental realizar uma seleção cuidadosa de parâmetros para garantir resultados confiáveis.

Identificação no Domínio da Frequência

A Identificação no Domínio da Frequência, por outro lado, trabalha com a transformação dos dados de resposta temporal para o domínio da frequência, utilizando técnicas como a Transformada de Fourier.

No domínio do tempo, todas as respostas modais estão presentes simultaneamente ao longo de todo o período de observação. Isso pode complicar a identificação modal porque todas as frequências naturais da estrutura contribuem de maneira sobreposta, tornando difícil isolar cada modo individualmente.

Por outro lado, no domínio da frequência, cada modo da estrutura tende a dominar em uma faixa específica de frequências. Isso significa que, ao analisar a resposta no domínio da frequência, é possível identificar modos individuais mais facilmente, pois cada modo é mais proeminente dentro da sua própria banda de frequência. Essa decomposição modal

natural facilita a identificação e análise dos modos, uma vez que se pode observar e separar os efeitos de cada modo em sua respectiva faixa de frequência [20].

Esta abordagem é particularmente eficaz para identificar modos dominantes e é menos sensível ao ruído branco. As técnicas de identificação no domínio da frequência são geralmente mais intuitivas e diretas quando se lida com sistemas lineares e dados estacionários.

Esta abordagem, pode ter dificuldades em lidar com sistemas não estacionários ou com modos fortemente amortecidos. Além disso, requer uma boa resolução em frequência, o que pode implicar a necessidade de grandes volumes de dados.

Relativamente à esta abordagem o foco deste trabalho será no método EFDD é uma técnica de análise modal que opera diretamente no domínio da frequência. É uma extensão do método clássico Frequency Domain Decomposition (FDD), introduzindo melhorias para capturar com maior precisão as propriedades modais de estruturas sujeitas a excitações aleatórias.

A escolha entre o domínio do tempo e o domínio da frequência depende das características da aplicação específica. No geral, a Identificação no Domínio do Tempo é preferida para sistemas complexos e não estacionários, enquanto a Identificação no Domínio da Frequência é mais adequada para análises clássicas de sistemas lineares com excitação estacionária. Em alguns casos, técnicas híbridas que combinam ambos os domínios podem ser empregadas para tirar proveito das vantagens de cada abordagem.

4.1.2 *Enhanced Frequency Domain Decomposition*

O método EFDD é uma técnica de identificação modal que opera no domínio da frequência, decompondo as respostas modais da estrutura em suas componentes de frequência. Esta técnica é particularmente apreciada pela sua eficiência e facilidade de implementação.

No processo EFDD, os dados de resposta da estrutura são inicialmente adquiridos, geralmente na forma de séries temporais de medições de aceleração, velocidade ou deslocamento em diferentes pontos da estrutura. Estes dados são então transformados para o domínio da frequência através da Transformada de Fourier, que permite analisar as componentes de frequência presentes nas respostas medidas.

Com base na análise no domínio da frequência, as frequências naturais da estrutura são identificadas como picos nas densidades espectrais das respostas medidas. A partir das frequências identificadas, os modos de vibração da estrutura são extraídos, determinando se as formas modais associadas a cada frequência natural, representando os padrões de vibração predominantes da estrutura em cada frequência.

Um dos desafios do EFDD reside na estimativa dos coeficientes de amortecimento associados a cada modo de vibração identificado. Este é um processo complexo e suscetível a erros, muitas vezes resultando em estimativas enviesadas. A presença de erros em cada etapa do processo, particularmente na fase de processamento de sinal, contribui para esta dificuldade e pode levar a estimativas distorcidas.

O EFDD parte da análise da resposta estrutural a excitações aleatórias. Em um sistema de N graus de liberdade, a resposta estrutural é modelada como uma combinação linear das respostas modais, cada uma associada a uma frequência natural e um fator de amortecimento. O método busca decompor o sinal de resposta medida em frequências específicas, isolando as contribuições de cada modo de vibração. Isso é feito através da aplicação de transformadas de Fourier em segmentos do sinal de resposta e da análise dessas componentes espectrais para identificar as frequências modais e suas contribuições.

Essa técnica é particularmente útil para a identificação de frequências naturais e formas modais em sistemas complexos, onde as respostas modais podem se sobrepor e ser difíceis de identificar diretamente [2].

A equação 4.7 expressa a relação entre as entradas desconhecidas e as saídas medidas, como funções da frequência ω . Isso significa que ela descreve como as entradas desconhecidas afetam as saídas medidas em diferentes frequências. Essa relação é fundamental para entender como o sistema responde a diferentes estímulos em diferentes frequências.

$$G_{yy}(\omega) = \overline{H}(\omega) \cdot G_{xx}(\omega) \cdot H(\omega)^T \quad (4.7)$$

Onde G_{xx} e G_{yy} são as matrizes PSD (Power Spectral Density) de entrada e saída, respectivamente, enquanto H é a matriz da Função de Resposta em Frequência (FRE, do inglês Frequency Response Function), medidas, como funções da frequência ω .

No domínio do tempo, as densidades espectrais tornam-se funções de correlação que podem ser interpretadas como decaimentos livres. O decaimento livre se refere à redução da amplitude de uma vibração livre ao longo do tempo. Portanto, para cada decaimento livre, o decremento logarítmico pode ser determinado com a fórmula 4.10:

$$\delta = \frac{2}{m} \ln \left(\frac{r_0}{r_m} \right) \quad (4.8)$$

Em que r_0 é o valor inicial da função de correlação, m extremos são considerados e r_m é o valor da função nesse extremo.

Este decremento logarítmico é uma medida da taxa com que a amplitude de uma vibração livre diminui ao longo do tempo.

O coeficiente de amortecimento (ζ) é uma medida da capacidade de um sistema de dissipar energia durante a vibração. E é dado por:

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{\delta^2 + 4\pi^2}} \quad (4.9)$$

E usando tanto as regressões lineares dos tempos de cruzamento quanto as frequências naturais amortecidas f_d , as frequências naturais não-amortecidas f_n são definidas como:

$$\zeta = \frac{f_d}{1 - \zeta^2} \quad (4.10)$$

As frequências naturais não-amortecidas f_n são as frequências características do sistema, considerando que não há amortecimento.

4.2 Métodos de Expansão de Respostas

Os Métodos de Expansão de Respostas são técnicas utilizadas na engenharia estrutural para prever as respostas dinâmicas de uma estrutura em locais onde não são realizadas medições diretas. Essas técnicas são fundamentais para entender o comportamento dinâmico de uma estrutura e identificar potenciais problemas, sem a necessidade de instalar sensores em todos os pontos de interesse.

Existem várias abordagens para a expansão de respostas, sendo duas das principais que foram usadas na metodologia do processo de identificação de danos a MDE e a Transmissibilidade. Na Decomposição e Expansão Modal, as formas modais da estrutura são utilizadas para expandir as respostas medidas em pontos específicos para toda a estrutura. Isso é feito considerando as características vibracionais fundamentais da estrutura, permitindo estimar as respostas em locais não medidos com base nas respostas conhecidas.

Por outro lado, na análise de transmissibilidade, são analisadas as relações entre as respostas em diferentes pontos da estrutura. Com base nas medições realizadas em pontos conhecidos, essa técnica permite estimar as respostas em locais não medidos, considerando as propriedades dinâmicas da estrutura.

Os Métodos de Expansão de Respostas são técnicas utilizadas na engenharia estrutural para prever as respostas dinâmicas de uma estrutura em locais onde não são realizadas medições diretas. Essas técnicas são fundamentais para entender o comportamento dinâmico de uma estrutura e identificar potenciais problemas, sem a necessidade de instalar sensores em todos os pontos de interesse.

Existem várias abordagens para a expansão de respostas, sendo duas das principais que foram usadas na metodologia do processo de identificação de danos a MDE e a Transmissibilidade. Na Decomposição e Expansão Modal, as formas modais da estrutura são utilizadas para expandir as respostas medidas em pontos específicos para toda a estrutura. Isso é feito considerando as características vibracionais fundamentais da estrutura, permitindo estimar as respostas em locais não medidos com base nas respostas conhecidas.

Por outro lado, na análise de transmissibilidade, são analisadas as relações entre as respostas em diferentes pontos da estrutura. Com base nas medições realizadas em pontos conhecidos, essa técnica permite estimar as respostas em locais não medidos, considerando as propriedades dinâmicas da estrutura.

4.2.1 *Modal Decomposition and Expansion*

O monitoramento da integridade estrutural de turbinas eólicas é crucial para garantir o funcionamento seguro e eficiente desses equipamentos, especialmente considerando o crescimento das turbinas em tamanho e a expansão das instalações *offshore*. No entanto, quando lidamos com turbinas eólicas *offshore*, a maioria dos pontos sensíveis à fadiga são

inacessíveis para medições diretas. Para superar essa limitação, técnicas de expansão de resposta podem ser empregadas para prever a resposta em locais não medidos a partir de um conjunto limitado de medições de resposta e um *Finite Element Model (FEM)* [22].

O MDE é uma técnica essencial na área da monitorização estrutural, especialmente em ambientes desafiadores, como dito antes, em turbinas eólicas offshore. Esta abordagem permite estimar a resposta em locais não medidos com base em um conjunto limitado de medições de resposta e um FEM.

O MDE aproveita a capacidade das formas modais de descrever o comportamento vibratório de uma estrutura e utiliza essa informação para prever as respostas em locais onde não há sensores físicos instalados. Ao decompor as saídas medidas em suas formas modais constituintes e depois expandir essas formas modais para obter as respostas estimadas em outros pontos da estrutura.

O primeiro passo do MDE envolve a decomposição modal das saídas medidas. Esta etapa visa expressar o vetor de deslocamento como uma combinação linear dos vetores de formas modais. Matematicamente, isso é representado pela equação 4.11:

$$y(t) = \Phi \cdot q(t) \quad (4.11)$$

Onde:

$y(t)$ é o vetor de deslocamento no tempo t ;

Φ é matriz de formas modais (contendo os vetores de formas modais);

$q(t)$ é o vetor de coordenadas modais para cada instante de tempo t .

Após a decomposição modal, a etapa seguinte é a expansão modal para obter as estimativas de saída em locais não medidos. Esta etapa utiliza as informações das formas modais obtidas experimentalmente e do modelo de elementos finitos. A relação entre a coordenada modal e a aceleração em um ponto arbitrário é estabelecida usando as formas modais obtidas numericamente.

4.2.2 Transmissibilidade

Transmissibilidade é um conceito fundamental na análise dinâmica de sistemas mecânicos, particularmente em situações em que as respostas em determinadas coordenadas não podem ser medidas diretamente. Inicialmente aplicado a sistemas de um grau de liberdade, a transmissibilidade é definida como a razão entre o módulo da amplitude de resposta e o módulo da amplitude do movimento imposto à base [23].

Para sistemas com múltiplos graus de liberdade, a transmissibilidade pode ser estendida para relacionar um conjunto de respostas desconhecidas a outro conjunto de respostas conhecidas, dadas certas forças aplicadas. Este conceito foi explorado em estudos por Ewins e Liu, bem como Varoto e Mc. Connell. No entanto, essas extensões apresentam algumas limitações, como dependência do caminho entre as coordenadas consideradas e restrições sobre os conjuntos de coordenadas onde os deslocamentos são conhecidos e as forças aplicadas.

A abordagem em [23] para a transmissibilidade em sistemas estruturais submetidos a forças harmônicas oferece uma formulação fundamental para estimar as respostas em coordenadas não medidas a partir de respostas conhecidas e forças aplicadas.

Considerando um vetor de forças aplicadas F_A nas coordenadas A , um vetor de amplitudes de resposta desconhecidas X_U e um vetor de amplitudes de resposta conhecidas X_K nas coordenadas K a formulação é dada por:

$$X_U = H_{UA} \cdot F_A \quad (4.12)$$

$$X_K = H_{UK} \cdot F \quad (4.13)$$

Onde H_{UA} e H_{UK} são as matrizes de resposta de frequência receptância que relacionam as coordenadas U e A , K e A , respectivamente. Eliminando F_A entre as equações 4.12 e 4.13, obtemos:

$$X_U = K_A \cdot (K_A^H \cdot A)^+ \cdot X_{FK}^H \quad (4.14)$$

Onde K_A^+ é a pseudoinversa de K_A . Assim, a matriz de transmissibilidade T é definida como:

$$X_U = U_K \cdot (K_A^H \cdot A)^+ \cdot H^H \quad (4.15)$$

Esta formulação permite expandir as respostas em coordenadas não medidas com base nas respostas conhecidas e nas forças aplicadas, possibilitando a análise da dinâmica estrutural em locais onde as medições não são possíveis. A transmissibilidade, embora tenha uma aparência semelhante às funções de resposta de frequência, possui propriedades distintas. Por exemplo, os picos nas funções de transmissibilidade não correspondem necessariamente às ressonâncias do sistema. A independência da magnitude das forças aplicadas nas transmissibilidades as torna uma ferramenta valiosa para a análise estrutural em uma variedade de situações, incluindo excitações não harmônicas.

4.2.3 Sensoriamento virtual

O sensoriamento virtual (*Virtual Sensing*) é uma técnica inovadora que utiliza modelos matemáticos e algoritmos avançados para estimar e prever o comportamento de componentes críticos de sistemas físicos, sem a necessidade de instalar sensores físicos em todas as partes desses sistemas. No contexto das turbinas eólicas, o sensoriamento virtual é utilizado para monitorar a integridade estrutural das pás, uma parte fundamental da turbina, que enfrenta esforços contínuos e condições ambientais adversas.

O sensoriamento virtual, também conhecido como *soft sensing* ou *model-based sensing*, funciona como um “sensor” virtual que utiliza dados de fontes reais e simulações para calcular variáveis que não são diretamente medíveis. Em vez de instalar sensores físicos em todas as áreas de um sistema, são utilizados dados de sensores físicos já existentes

(como aqueles instalados no eixo da turbina ou nas bases das pás) e algoritmos que modelam o comportamento de outras áreas não sensorizadas. Com base nesses modelos, é possível prever tensões mecânicas, deformações, fadiga, vibrações e até potenciais falhas nas pás.

Sensores físicos instalados em locais estratégicos da pá recolhem dados em tempo real. Estes sensores podem estar localizados nas bases das pás. Eles monitoram variáveis como velocidade do vento, vibrações, momento e cargas mecânicas.

Com os dados dos sensores, são construídos modelos matemáticos que simulam o comportamento das partes da pá que não têm sensores. Estes modelos baseiam-se em princípios de física, como as equações que governam a dinâmica estrutural das pás, e são alimentados com os dados reais recolhidos pelos sensores.

O modelo matemático consegue estimar como as pás estão a responder às condições operacionais com base nos dados disponíveis. Isto significa que, mesmo sem sensores instalados ao longo de toda a extensão das pás, é possível prever como estas estão a vibrar, a deformar-se ou a sofrer desgaste em pontos específicos. Por exemplo, o sensoriamento virtual pode prever o ponto exato de uma pá onde ocorrerá o maior esforço mecânico durante uma tempestade, sem que seja necessário um sensor físico nesse local.

O sensoriamento virtual não só oferece estimativas fiáveis, como o faz em tempo real. Ao combinar dados continuamente recolhidos com modelos atualizados, os operadores de turbinas eólicas conseguem monitorizar o estado das pás em tempo real, o que é especialmente útil para parques eólicos *offshore*, onde as inspeções físicas são difíceis e dispendiosas.

Através das previsões geradas pelo sensoriamento virtual, as equipas de manutenção podem antecipar falhas ou deterioração das pás e planejar intervenções antes que ocorram problemas graves. Em vez de seguir um calendário fixo de manutenção, o sensoriamento virtual permite que esta seja feita apenas quando necessário, o que maximiza a eficiência e reduz custos.

Um exemplo concreto da aplicação de sensoriamento virtual em pás de turbinas eólicas é a previsão de fadiga estrutural. Com base em dados de vento, carga mecânica e vibrações, os modelos de sensoriamento virtual conseguem prever o tempo restante antes que uma pá comece a mostrar sinais de desgaste ou dano. Isto é particularmente útil em turbinas *offshore*, onde a deterioração das pás pode ser acelerada por fatores como a salinidade do ar e as condições de vento mais extremas.

Outro exemplo é a identificação de microfissuras em pás de turbinas. Embora estas fissuras sejam difíceis de detectar em inspeções físicas, os algoritmos de sensoriamento virtual podem estimar a sua formação com base nas vibrações e tensões medidas em outros pontos da turbina.

É com isto que surge o *Virtual Structural Health Monitoring (VSHM)*, um método avançado que tem como objetivo monitorizar a saúde estrutural de sistemas complexos, como as turbinas eólicas, através de uma combinação de sensores físicos e virtuais. Este método visa superar os desafios práticos impostos pelo crescimento contínuo das turbinas

eólicas, cujas pás estão a tornar-se cada vez maiores e mais sujeitas a condições ambientais rigorosas.

Para recolher as respostas dinâmicas de uma estrutura, vários tipos de sensores podem ser utilizados, dependendo das propriedades físicas que se pretendem medir. Entre os sensores mais comuns usados para monitorização de estruturas estão os acelerómetros, que medem aceleração e vibrações; os extensómetros, que medem deformações; e os cabos de fibra ótica, que podem medir múltiplos parâmetros ao longo de grandes distâncias.

O primeiro passo no monitoramento da integridade estrutural é a amostragem das respostas dinâmicas da estrutura através de uma matriz de sensores. A detecção de danos depende fortemente desses sensores instalados ao longo da estrutura, pois são eles que captam os sinais necessários para avaliar a condição da estrutura [2].

Como dito antes, existem várias técnicas para estimar as respostas de uma estrutura com base em sensores físicos. Todas elas têm o mesmo objetivo: usar os dados reais recolhidos pelos sensores para prever informações sobre áreas difíceis de monitorar. Essas técnicas podem ser classificadas como redução ou expansão, dependendo do foco na simplificação ou ampliação dos dados de resposta medidos.

Na prática, estas técnicas utilizam os dados recolhidos para prever o comportamento de todos os DOFs de um FEM da estrutura. A suposição mínima é que as medições dos sensores possam ser linearmente relacionadas aos DOFs do modelo de elementos finitos, o que permite uma correlação entre o modelo virtual e as medições reais.

Um estudo recente, conduzido por Roberts e colaboradores, demonstrou a eficácia do sensoriamento virtual. Neste estudo, as respostas dinâmicas foram medidas em vários locais de uma estrutura utilizando um método de expansão. As respostas em locais virtuais foram estimadas e, em seguida, um sensor físico foi colocado no local estimado para validar os resultados. Os resultados mostraram que é possível prever com precisão as respostas de qualquer ponto de uma estrutura, mesmo sem a presença de um sensor físico nesse ponto [2].

4.3 Model Updating

O *Model Updating* (Atualização de Modelos) é uma técnica fundamental no campo da engenharia estrutural e, em particular, SHM. No contexto da identificação de dano, esta técnica pode ser utilizada para ajustar modelos simplificados, melhorando a sua precisão ao corresponder mais fielmente ao comportamento real da estrutura. Além disso, as técnicas de *model updating* também são eficazes na fase de quantificação de danos, ao identificar elementos do modelo com maiores desvios nas suas propriedades. Utilizando métodos de otimização, é possível localizar zonas mal modeladas ou com potencial dano, e, ao minimizar esses desvios, quantificar o erro ou o dano associado às propriedades dos diversos elementos finitos.

O *Model Updating* refere-se ao processo de ajuste de um modelo numérico com base em dados experimentais ou observações reais da estrutura. O objetivo é reduzir a discrepância

entre o comportamento simulado pelo modelo e o comportamento observado na prática, de forma a criar um modelo que seja mais representativo da realidade.

Na prática, o modelo numérico inicial é construído com base em conhecimentos teóricos sobre a estrutura, materiais, e condições de operação. No entanto, devido a incertezas como variações nos materiais, imperfeições de construção ou degradação da estrutura ao longo do tempo, o modelo teórico pode não refletir com precisão as respostas reais da estrutura.

O processo de model updating tenta ajustar os parâmetros do modelo numérico – como rigidez, massa, amortecimento ou condições de fronteira – para que as previsões feitas pelo modelo se alinhem melhor com os dados experimentais medidos em campo.

O *model updating* é um processo iterativo no qual, um modelo de elementos finitos da estrutura é construído com base nos dados iniciais, como geometria, propriedades dos materiais e condições de fronteira. A estrutura real é monitorizada através de sensores, como acelerômetros, extensômetros ou medidores de vibrações, que recolhem dados sobre as suas respostas dinâmicas ou estáticas. Estes dados podem incluir frequências naturais, modos de vibração, deslocamentos, tensões, entre outros.

As respostas obtidas pelo modelo teórico são comparadas com as respostas medidas. Normalmente, existem discrepâncias devido a imprecisões no modelo inicial. Parâmetros como rigidez, massa ou propriedades dos materiais são ajustados no modelo para reduzir a diferença entre as respostas teóricas e as observadas. Este ajuste pode ser feito manualmente ou com o auxílio de algoritmos de otimização, que minimizam as discrepâncias entre o modelo e os dados reais. O processo de ajuste é iterado várias vezes até que o modelo atualizado se aproxime o máximo possível dos dados reais. Uma vez atualizado, o modelo pode ser validado utilizando um conjunto diferente de dados experimentais.

Para medir a correlação entre os resultados numéricos e os dados experimentais, são formuladas funções que quantificam essa relação.

Uma dessas funções é o *Modal Assurance Criterion (MAC)*, que compara as formas modais do modelo (também conhecidas como modos próprios) com base no produto interno dos autovetores de cada análise.

O MAC é uma métrica usada para validar se as formas modais identificadas no modelo numérico estão de acordo com as formas modais observadas experimentalmente. A métrica MAC varia entre 0 e 1, onde: 1 indica uma alta correlação (as formas modais estão alinhadas), 0 indica uma baixa ou nenhuma correlação (as formas modais estão desalinhadas) [2].

Os valores de MAC são organizados em uma matriz, onde os valores na diagonal devem ser os mais próximos de 1 (indicando boa correlação entre os modos correspondentes), e os valores fora da diagonal devem ser próximos de 0 (indicando baixa correlação entre modos diferentes).

Essa métrica é amplamente utilizada na validação de modelos de dinâmica estrutural, pois fornece uma maneira clara de quantificar a correspondência entre as respostas modais do modelo e da estrutura real.

4.4 Detecção de dano

A detecção de dano em estruturas, especialmente em sistemas como as pás de turbinas eólicas, é crucial para garantir a sua integridade e prolongar a sua vida útil. Neste contexto, métodos avançados de monitorização e análise são utilizados para identificar e quantificar danos em componentes estruturais.

Antes de aplicar qualquer dano, é importante estabelecer uma linha de base saudável. Para isso, são realizados testes e medições numa condição inicial, sem danos, para obter referências "saudáveis". Esses dados servirão como comparação para detetar variações futuras que possam indicar danos.

No modelo numérico (FEM), um dano é simulado através da redução percentual localizada do segundo momento de área de um elemento específico. Este parâmetro representa a rigidez do componente, e a sua redução simula a perda de integridade estrutural. O dano é progressivamente aumentado, criando diferentes conjuntos de respostas associadas a diferentes níveis de dano.

Para cada conjunto de respostas (saudável e danificado), são extraídos os parâmetros modais, como as frequências naturais e as formas modais. As frequências naturais de uma estrutura são sensíveis a alterações de rigidez, logo, são indicadores úteis da presença e extensão de danos.

4.4.1 Distância de Mahalanobis

Uma vez extraídas as frequências naturais, pode ser usada a Distância de Mahalanobis (MD) para quantificar a diferença entre os dados "saudáveis" e os dados "danificados". A MD é uma métrica que avalia a distância entre um ponto (neste caso, as medições danificadas) e uma distribuição (neste caso, as medições saudáveis). À medida que o dano aumenta, espera-se que a MD também aumente, indicando uma maior discrepância entre o estado saudável e o danificado da estrutura.

Contudo, a MD por si só pode não ser suficiente para classificar com precisão o estado da estrutura. Por isso, é definido um valor limiar, baseado na média das MDs obtidas para a estrutura saudável, acrescida do seu desvio padrão. Assim, quando os valores de MD excedem esse limiar, considera-se que a estrutura está danificada [2].

Para quantificar a eficácia da detecção de dano, são utilizadas as Curvas de Operação do Recetor (ROC). Essas curvas plotam a sensibilidade do teste (taxa de verdadeiros positivos) em função de especificidade (taxa de falsos positivos). Ao comparar medições saudáveis com a referência saudável, as ROCs devem formar uma linha diagonal, indicando que as medições estão corretamente classificadas como saudáveis.

No entanto, quando se comparam medições danificadas com a referência saudável, as ROCs devem aproximar-se do canto superior esquerdo, indicando uma maior capacidade de detetar danos.

A eficácia da ROC é quantificada através da Área Sob a Curva (AUC). Um valor de AUC

próximo de 0.5 indica que o teste não é capaz de diferenciar entre saudável e danificado (o que acontece para a condição saudável). Um valor de AUC próximo de 1 indica que o teste é muito eficaz em identificar o dano. Quanto maior o valor da AUC, maior a capacidade de detecção do dano [2].

4.4.2 Método de detecção baseado em *cloud of spheres*

Este método apresenta um modelo de classificação binária destinado a identificar uma classe específica, como incomum às demais identificadas. O modelo é fundamentado numa nuvem de esferas que circunscreve os pontos da classe a ser identificada, enfatizando a construção de uma nuvem conectada, ao invés de conjuntos disjuntos. A conectividade é estabelecida através de um grafo induzido pelas esferas.

Para resolver o problema, foi desenvolvido um modelo quadrático com variáveis contínuas e binárias, focando na minimização do número de esferas. Embora a conectividade geralmente imponha um número exponencial de restrições, neste caso, ela é garantida com restrições lineares que escalam quadraticamente com um parâmetro K , servindo como limite superior do número de esferas.

Este modelo é eficaz em estruturas de classe altamente não lineares e não convexas, adaptando-se também a separações lineares. Ao contrário das redes neurais, este modelo de classificação é transparente, com uma estrutura claramente identificável. Não são utilizadas funções de kernel, nem são necessários meta-parâmetros, a menos que se pretenda maximizar a margem de separação, como em *Support Vector Machine (SVM)*. A busca por ótimos globais em instâncias grandes é desafiadora, e para isso, é proposta uma heurística que demonstra um desempenho satisfatório [24].

Este método consiste em atribuir a um objeto, representado por um vetor de características de dimensão n , um vetor de pertença a classes de dimensão K , $\mu(k)$, para $k \in K$. Cada classe é definida por uma propriedade específica, e os objetos que apresentam essa propriedade são elementos da classe. A classificação pode ser *crisp*, onde $\mu(k) \in \{0, 1\}$ e $\sum_{k \in K} \mu(k) = 1$, indicando que o objeto pertence estritamente a uma classe. Alternativamente, a classificação pode ser *fuzzy*, onde $0 \leq \mu(k) \leq 1$ e $\sum_{k \in K} \mu(k) = 1$, permitindo que um objeto pertença a várias classes com diferentes valores de pertença [24].

Por exemplo, na classificação *crisp*, uma imagem de um animal é classificada como gato ou cão, enquanto, na classificação *fuzzy*, uma transação bancária pode ser considerada fraudulenta ou legal em graus variados. A classificação é realizada por um *oracle* treinado com um conjunto de objetos conhecido como conjunto de treino, que inclui tanto o vetor de características quanto a classe correspondente. Este método é designado de **supervisionado**. Em contraste, os métodos **não supervisionados** operam sem conhecimento prévio das classes.

Os algoritmos supervisionados podem ter arquiteturas diversas, mas geralmente baseiam-se num modelo que depende de parâmetros a serem estimados durante uma fase de treino. Esta fase visa maximizar uma função de ajuste (ou minimizar uma função

de erro) que quantifica a concordância entre os rótulos observados e as classificações preditivas do modelo. O objetivo é evitar o *overfitting*, que prejudica a generalização para novos dados.

O modelo tem a capacidade de reproduzir estruturas de separação altamente não lineares e não convexas, ao contrário de métodos "*black-box*", que são opacos. Além disso, não requer meta-parâmetros. Apresenta-se uma formulação quadrática de inteiros mistos para este problema e é reportado resultados para problemas de tamanho pequeno a médio. Como encontrar os ótimos globais é difícil em instâncias grandes, sugere-se uma abordagem heurística [24].

Este método diferente do comum, é baseado em modelo, onde a relação entre o modelo e a solução é claramente identificada, utilizando apenas um número razoável de parâmetros a serem estimados, mas capaz de captar estruturas complexas de separação entre os dados.

Ao considerar um problema de classificação com duas classes, a determinação de uma superfície de separação pode ser difícil em um espaço de alta dimensão, como \mathbb{R}^n para grandes n , dependendo da geometria dos objetos ou pontos. Se os pontos das duas classes são linearmente separáveis, a maioria dos métodos clássicos propostos na literatura funcionará bem, como o SVM. No entanto, se os pontos não forem linearmente separáveis, encontrar uma superfície de separação torna-se complicado. Geralmente, assume-se algum comportamento regular na distribuição espacial dos pontos em \mathbb{R}^n (esférica, poliedral) para justificar a aplicação de um método adaptado a alguma suposição sobre a geometria dos dados. No entanto, especular sobre a geometria dos dados em espaços de alta dimensão pode ser enganoso.

Nos métodos de classificação, construímos linhas de separação, curvas bem definidas matematicamente, que, geralmente, generalizam os conceitos intuitivos que temos em relação a extensão de objetos, para um espaço bidimensional ou tridimensional para dimensões superiores. No entanto, podemos admitir que melhores fronteiras de separação podem ter uma estrutura e propriedades que não têm paralelos com essas generalizações.

Nesse sentido, acreditamos que quanto mais flexível for a superfície de separação, melhor, permitindo a definição de formas diferentes e complexas. Por exemplo, considerando o exemplo bidimensional na Figura 4.3, a curva de separação definida na Figura 4.4 encapsula uma estrutura não linear que é complexa e não convexa.

Este método, propõe um novo problema, o problema da nuvem de esferas conectadas, para definir um conjunto de esferas conectadas que contenham apenas os pontos de uma classe, conforme mostrado na Figura 4.5, com o propósito de que os pontos na fronteira da reunião das esferas, como ilustrado na Figura 4.6, se aproximem de um domínio geométrico (o da Figura 4.4) que define uma separação entre as duas classes de pontos.

A fronteira que separa as duas regiões é completamente e simplesmente definida pelo conjunto de centros e raios. A regra para a classificação de um novo ponto é uma consulta que requer um número de comparações igual ao tamanho da nuvem (número de esferas). Não é necessário um ajuste massivo de meta-parâmetros. Manter o processo

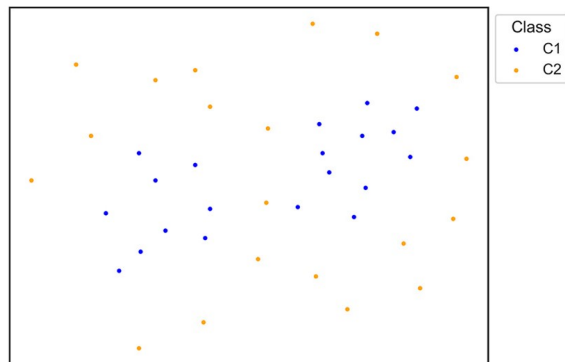


Figura 4.3: Duas classes de pontos, azul e laranja [24].

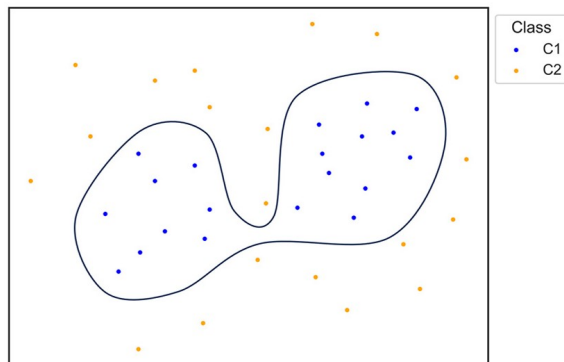


Figura 4.4: Curva de Separação [24].

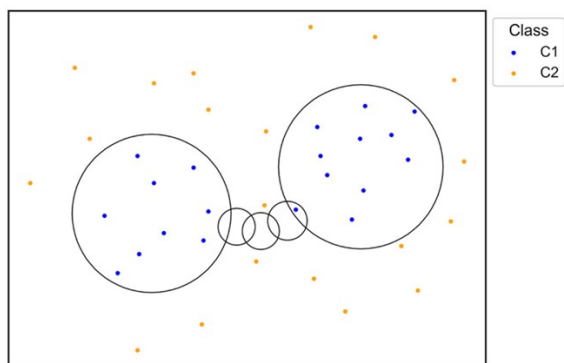


Figura 4.5: Esferas conectadas [24]

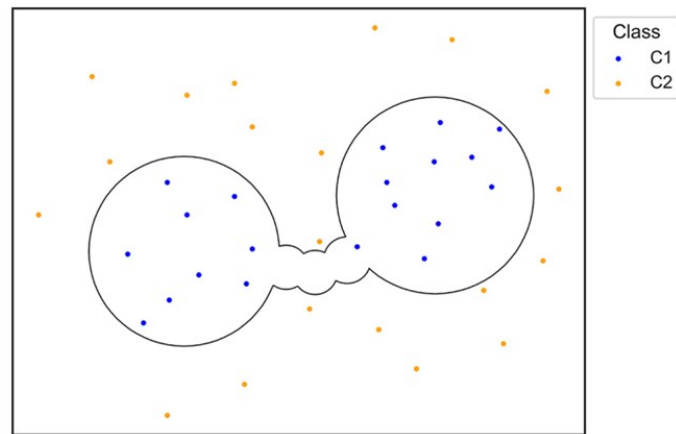


Figura 4.6: Fronteira da núvem de esferas conectadas [24]

de classificação dentro do espaço de características original, em vez de depender de transformações de kernel, aumenta consideravelmente a transparência dos resultados. Esta clareza, simplicidade e transparência são algumas das vantagens deste método [24].

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Protótipo físico da pá de turbina eólica

Embora a construção física do protótipo não tenha sido concretizada devido a limitações de tempo e recursos, o processo de desenvolvimento do projeto foi meticulosamente elaborado, com atenção aos detalhes estruturais e às metodologias de fabricação. Este processo envolveu a criação de um modelo computacional que integrou práticas de projecto aerodinâmico e estrutural, focando na aplicabilidade futura de métodos de identificação de danos.

O perfil escolhido para a pá foi o *Airfoil* NREL S809, amplamente utilizado em aplicações eólicas devido ao seu desempenho em termos de eficiência energética e estabilidade em diferentes condições de vento. O comprimento total da pá foi determinado em 1800 mm, com uma largura máxima de 275 mm, projetada para otimizar o fluxo de ar e a transferência de energia mecânica.

A construção computacional permitiu uma análise aprofundada dos parâmetros do projeto, como o perfil aerodinâmico e a estrutura interna da pá. A utilização de PLA para a impressão 3D da estrutura e a escolha da fibra de vidro para as cascas externas foram opções pensadas para proporcionar uma combinação de leveza e rigidez, características essenciais para resistir às cargas aerodinâmicas. Além disso, o método de fabricação das cascas através de moldes em PLA ou madeira mostrou-se uma solução viável.

Sugere-se que esta abordagem possa ser repetida futuramente, com ajustes necessários no processo de fabricação para contornar as limitações enfrentadas nesta dissertação. Um estudo futuro poderia focar-se na produção dos componentes com outras técnicas de fabricação mais acessíveis ou otimizar o tempo de produção com novos materiais.

A Tabela 5.1 apresenta, de forma detalhada, a solução final para a construção do protótipo físico.

Tabela 5.1: Detalhes do projeto para o protótipo físico

Detalhes da pá	
Detalhe	Descrição
<i>Airfoil</i>	NREL S809
Comprimento máximo	1800 <i>mm</i>
Largura máxima	275 <i>mm</i>
Material	Fibra de vidro e resina epoxi
Método de Fabricação	Laminação
Perfil Final/Perfil Inicial	0.36
Ângulo de inclinação	3°
Espessura	3 <i>mm</i>
Tipo de ligação das cascas	Aparafusada M2
Detalhes da estrutura interna da pá	
Detalhe	Descrição
Tipo	<i>Box beam</i> com descontinuidade
Material	PLA
Método de Fabricação	Impressão 3D
Método de ligação com as cascas	Por cola removível
Quantidade	3 unidades
Dimensões máximas 1	153x55x400; $R_1 = 56$ e $R_2 = 50$; $b=3$ [<i>mm</i>]
Dimensões máximas 2	107x47x400; $R_1 = 48$ e $R_2 = 40$; $b=3$ [<i>mm</i>]
Dimensões máximas 3	63x36x400; $R_1 = 38$ e $R_2 = 22$; $b=3$ [<i>mm</i>]
Detalhes do molde da pá	
Detalhe	Descrição
Dimensões do molde superior	1800x315x110 <i>mm</i>
Dimensões do molde inferior	1800x315x130 <i>mm</i>
Material	PLA/Madeira
Método de Fabricação	Impressão 3D/Maquinagem CNC

A pá apresentada na Figura 5.1 foi projetada com o objetivo de oferecer uma base sólida para a construção de um modelo físico, permitindo a reprodução das dimensões e proporções com precisão. O comprimento total da pá é de 1800 mm (ver Figura 5.5), com variações calculadas nas suas seções para equilibrar requisitos estruturais e aerodinâmicos.

A pá está dividida em quatro seções principais:

1. **S-1:** A base da pá possui um perfil circunferencial R65, concebido para garantir robustez e estabilidade no ponto de fixação;
2. **S-2 e S-3:** Ambas utilizam o perfil aerodinâmico S809, conhecido pela sua eficiência em turbinas eólicas;
3. **S-4:** Representa a extremidade da pá, mantendo o perfil S809 com uma redução proporcional ($S-4/S-3 = 0,36$), conferindo um formato afilado e otimizado.

Entre as seções superiores, há uma inclinação vertical de 3°, que reflete condições reais de operação e proporciona maior fidelidade aerodinâmica. O espaçamento entre as seções

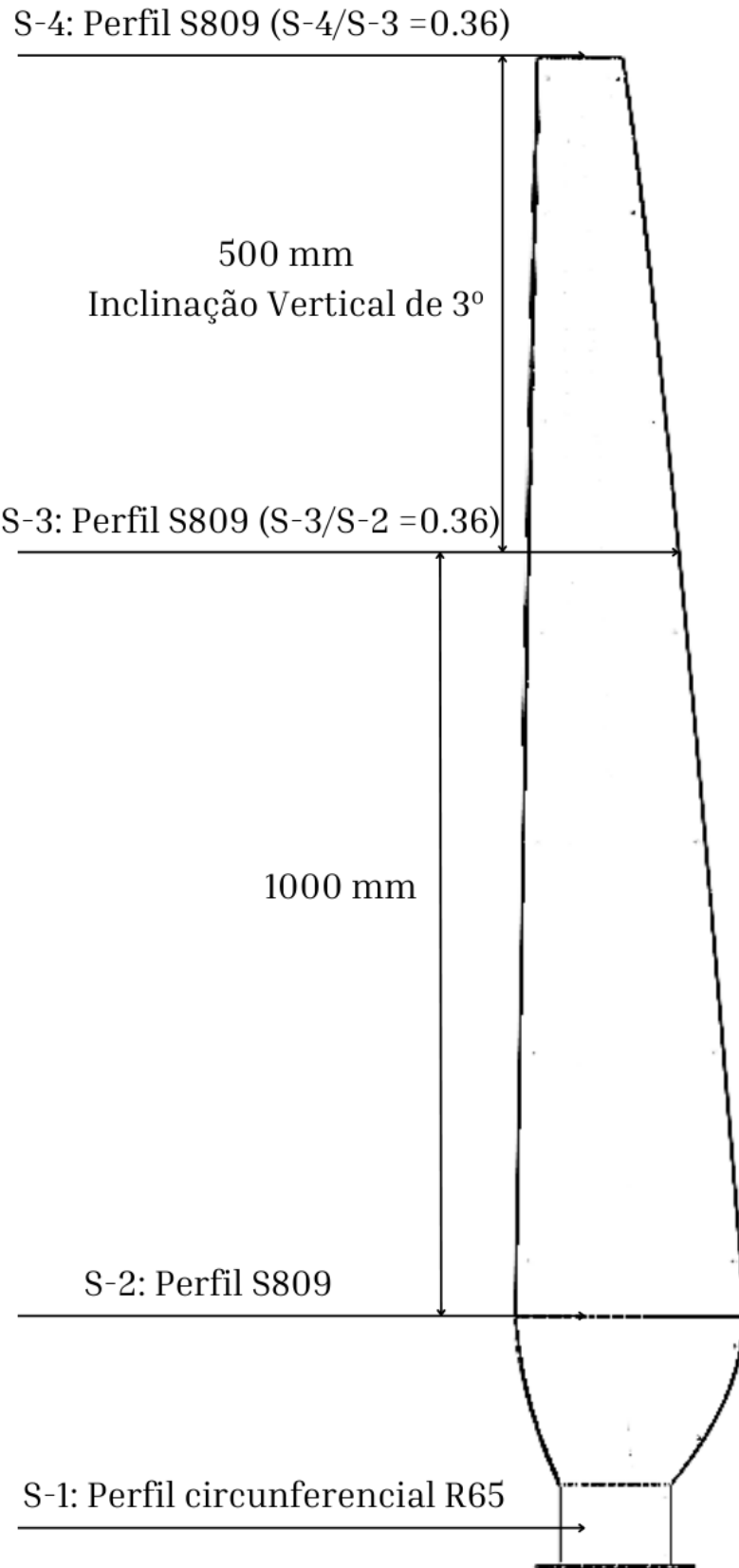


Figura 5.1: Características da pá.

e as proporções entre os perfis foram cuidadosamente ajustados, de modo a facilitar a construção e possibilitar análises estruturais detalhadas.

Este projeto serve como referência direta para futuros trabalhos na continuidade deste. Com as dimensões aqui descritas, será possível replicar o protótipo de forma precisa e eficiente, contribuindo para a continuidade do estudo sobre detecção de danos em pás de turbinas eólicas.

Na Figura 5.2 está representado o conjunto dos acessórios para fixação da pá ao solo, composto pelo prato de superfície de diâmetro 660 mm e espessura de 15 mm , e o prato de fixação constituído por duas partes iguais de raio 126 mm , altura de 77 mm e espessura de 6 mm na zona de contacto com o prato de superfície e 3 mm na zona de contacto com a pá, o material escolhido para estes acessórios é o aço.

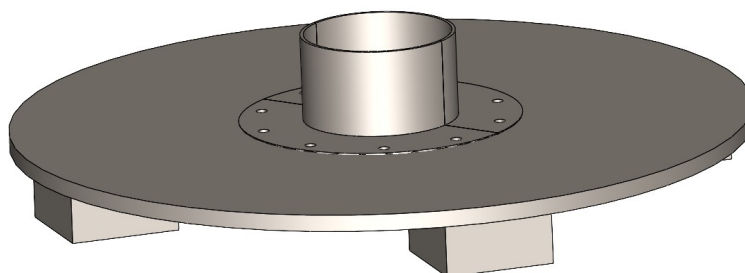


Figura 5.2: Acessórios para fixação da pá ao solo.

A Figura 5.3, ilustra a nomenclatura dos componentes de fixação para melhor compreensão.

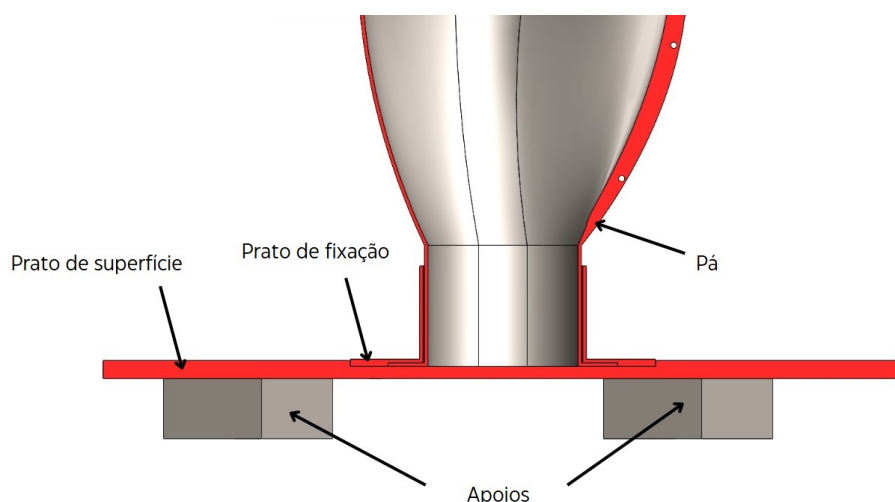


Figura 5.3: Secção transversal e nomenclatura dos acessórios para fixação.

E por fim na Figura 5.4 está representado o modelo 3D do protótipo físico, pronto para a produção.

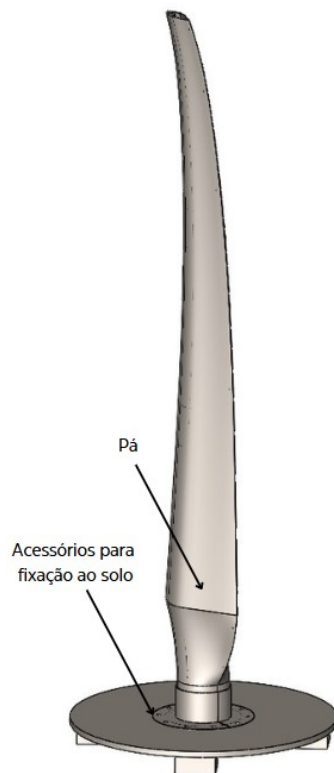


Figura 5.4: Modelo 3D do protótipo físico.

O modelo CAD da pá, ilustrado na Figura 5.5, foi desenvolvido com base nas dimensões previamente estabelecidas, que definiram o comprimento total da pá de 1.8 metros (ver Tabela 5.1). A largura da pá foi dimensionada proporcionalmente, mantendo a fidelidade ao projeto de pás reais de turbinas eólicas. Durante o desenvolvimento do modelo, foi dada especial atenção à robustez estrutural, assegurando que o protótipo pudesse suportar os testes subsequentes sem comprometer a integridade dos materiais.

A pá foi desenhada como uma estrutura composta por duas cascas, correspondendo à superfície superior e à superfície inferior, representadas nas Figuras 5.6 e 5.7 ambas previstas a serem construídas em fibra de vidro. A ligação entre as cascas foi planeada para ser realizada com parafusos M2 e insertos roscados, inseridos estrategicamente tanto no bordo de ataque como no bordo de fuga.

Após a construção dos moldes para as duas superfícies, é suposto iniciar o processo de laminação das camadas de fibra de vidro nos moldes. As camadas de fibra de vidro devem ser aplicadas nas superfícies devidamente tratadas com desmoldante e impregnadas com resina epóxi. Esse processo garante a conformação exata com o molde e a criação de uma estrutura robusta, com as propriedades aerodinâmicas e mecânicas adequadas.

Os insertos roscados serão utilizados para permitir a fixação dos parafusos M2 nas bordas da pá, mas com abordagens distintas entre o bordo de ataque e o bordo de fuga:

1. **Bordo de fuga:** para o bordo de fuga, os insertos roscados serão colocados diretamente na estrutura da casca. Após a aplicação das camadas de fibra de vidro, devem

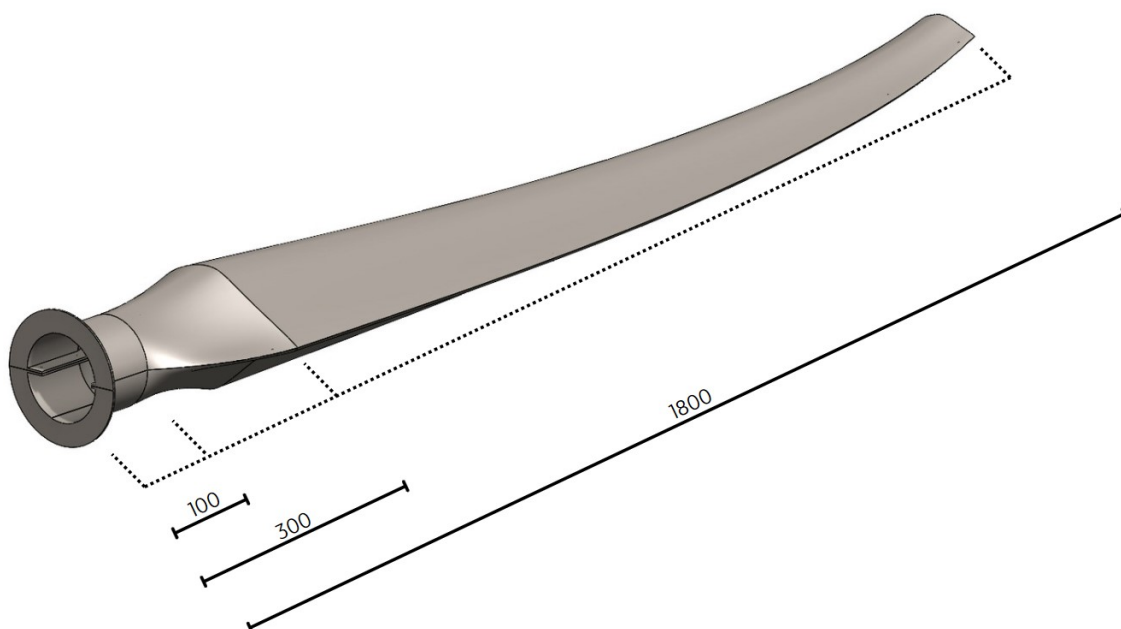


Figura 5.5: Modelo 3D da pá

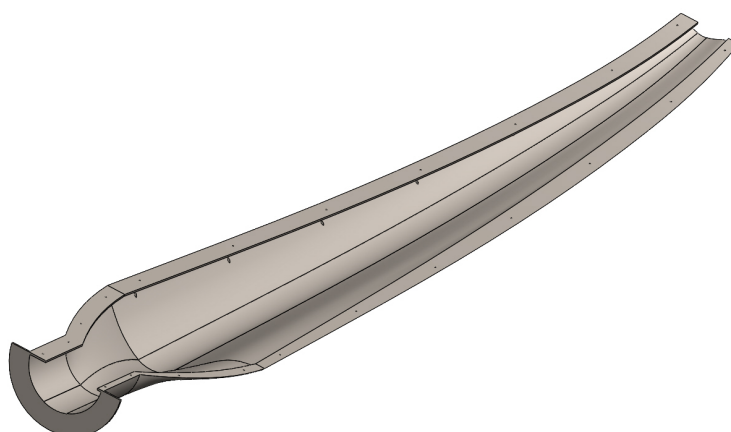


Figura 5.6: Superfície inferior da pá

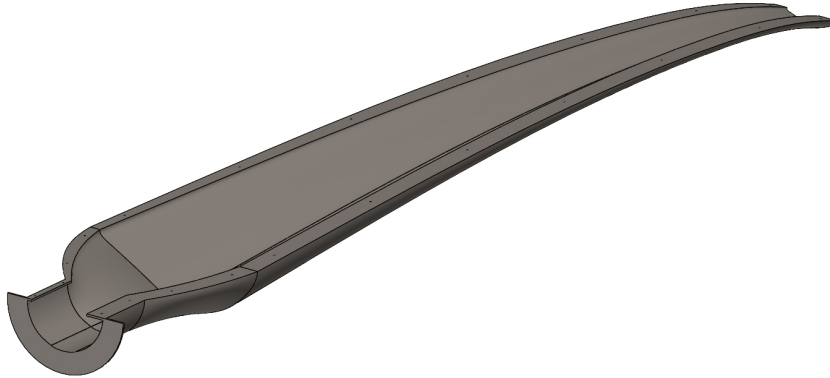


Figura 5.7: Superfície superior da pá

ser feitos furos específicos ao longo da borda de fuga, nos quais os insertos roscados serão inseridos antes da cura da resina. A resina, ao endurecer, fixa permanentemente os insertos no material compósito, criando uma base sólida para a montagem com os parafusos M2.

2. **Bordo de ataque:** o bordo de ataque apresenta uma solução diferente para a fixação. Neste caso, os insertos roscados não são colocados diretamente na na casca. Em vez disso, será necessário fabricar uma chapa do mesmo material que segue o perfil aerodinâmico das cascas no bordo de ataque. Esta chapa foi projetada de modo a acomodar os insertos roscados. Os furos para os insertos devem ser feitos na chapa e, após a inserção dos mesmos, a chapa foi colada ao bordo de ataque de cada casca. A colagem da chapa ao bordo de ataque deve ser feita utilizando adesivo estrutural compatível com fibra de vidro, garantindo que a chapa ficasse firmemente aderida à casca sem comprometer a integridade aerodinâmica da pá. Esta solução foi escolhida para proporcionar uma fixação mais estável no bordo de ataque, onde as tensões são mais concentradas durante o funcionamento da turbina. A Figura 5.8 ilustra a configuração descrita acima.

Após a colocação das camadas de fibra de vidro e a inserção dos insertos no bordo de fuga, as duas cascas devem ser deixadas para a cura completa da resina. Durante este processo, a resina endurecerá, garantindo a adesão das fibras e a fixação dos insertos. Ao mesmo tempo, a chapa no bordo de ataque deve ser fixada com adesivo estrutural e deixada para secar, assegurando uma junção firme e estável.

Concluída a cura, as cascas devem ser removidas cuidadosamente dos moldes. O desmoldante utilizado facilitará a extração sem danos, e as cascas serão inspecionadas para verificar a qualidade da laminação, a integridade dos insertos e a fixação adequada da chapa no bordo de ataque.

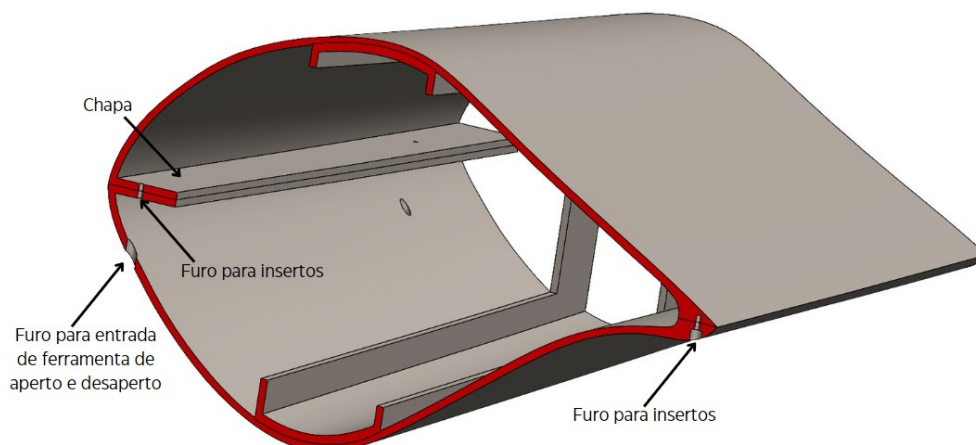


Figura 5.8: Elementos de ligação

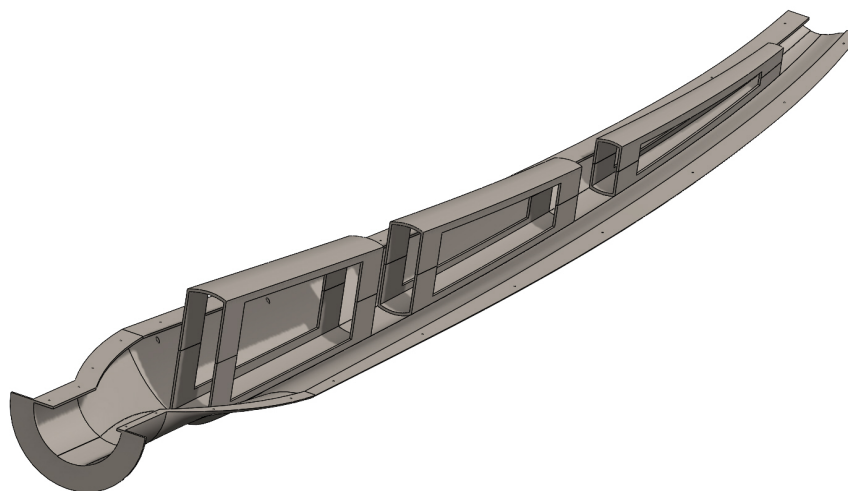
As *shear webs* desempenham um papel fundamental na estrutura interna da pá, proporcionando suporte adicional entre as superfícies superior e inferior, ajudando a distribuir as cargas estruturais e a aumentar a rigidez da pá. Para este projeto, as *shear webs* foram projetadas para serem removíveis, facilitando a substituição e modificação durante os testes de diferentes tipos de danos.

As *shear webs* deverão ser impressas em 3D utilizando PLA (ácido polilático), um material adequado para prototipagem devido à sua facilidade de impressão, custo acessível e propriedades mecânicas razoáveis para este tipo de aplicação. A escolha pela impressão 3D permitirá um processo rápido e preciso de fabricação, garantindo que as *shear webs* tivessem as dimensões exatas para se ajustarem às duas cascas da pá.

Para permitir que as *shear webs* possam ser facilmente instaladas e removidas conforme necessário para diferentes cenários de testes, a sua fixação às cascas da pá deverá ser feita com uma cola removível. Esta abordagem foi escolhida para garantir a flexibilidade de desmontar e reinstalar as *shear webs* sem comprometer a integridade estrutural ou a facilidade de manutenção.

A utilização de cola removível facilita a adaptação da pá a diferentes tipos de danos, permitindo que as *shear webs* sejam retiradas e substituídas para simular diferentes situações de falha estrutural e comportamentos da pá sob stress.

Com a instalação das *shear webs* entre as cascas superior e inferior, o conjunto final da pá será completado. A fixação das *shear webs* com cola removível, juntamente com os parafusos M2 e os insertos roscados, garantirá uma estrutura modular que pode ser ajustada e modificada conforme necessário ao longo dos testes. Este projecto flexível, apresentado na Figura 5.9 permite uma análise detalhada do comportamento da pá em diferentes cenários, incluindo a simulação e a identificação de danos.

Figura 5.9: *Shear webs*

5.1.1 Limitações

Durante o desenvolvimento do protótipo físico, foram testados dois métodos principais para o fabrico do molde: impressão 3D em PLA e maquinação CNC em madeira. Contudo, ambos os métodos apresentaram desafios significativos, que levaram à inviabilidade da sua implementação, principalmente devido às limitações de tempo e a problemas técnicos com as máquinas.

No caso da impressão 3D, embora o modelo tridimensional do molde estivesse pronto, o tempo total necessário para a impressão de todas as peças revelou-se excessivo. Cada parte do molde exigia um período prolongado de impressão, e a divisão do modelo em múltiplas peças foi uma solução necessária para contornar as limitações de volume da impressora disponível. No entanto, a montagem subsequente das peças, através de colagem, aumentava significativamente o tempo de produção e introduzia potenciais riscos para a integridade dimensional e estrutural do molde. Como já dito na subsecção 3.7.1, o tempo estimado de impressão para cada peça variava entre 5 a 9 horas, conforme ilustram as Figuras 5.10 e 5.11.

Após a inviabilidade de imprimir o molde completo devido às suas grandes dimensões, foi decidido reduzir o tamanho da pá numa escala de 0.6 do tamanho inicial, gerando uma pá de 1 metro de comprimento, o que resultou numa redução proporcional no tamanho do molde. Com essa nova configuração, o número de peças a serem impressas foi reduzido para 5, para o molde da superfície inferior e 6 peças para o molde da superfície superior. Este ajuste prometia não só facilitar o processo de fabricação, como também reduzir significativamente o tempo de impressão e montagem.

Com as novas dimensões mais compactas, começámos a imprimir as peças, conforme pode ser observado na Figura 5.12. No entanto, logo de início, surgiram problemas com a impressora *Ultimaker 3 Extended*. O problema estava relacionado com a alimentação do filamento de impressão: a máquina iniciava a impressão corretamente, mas após algum

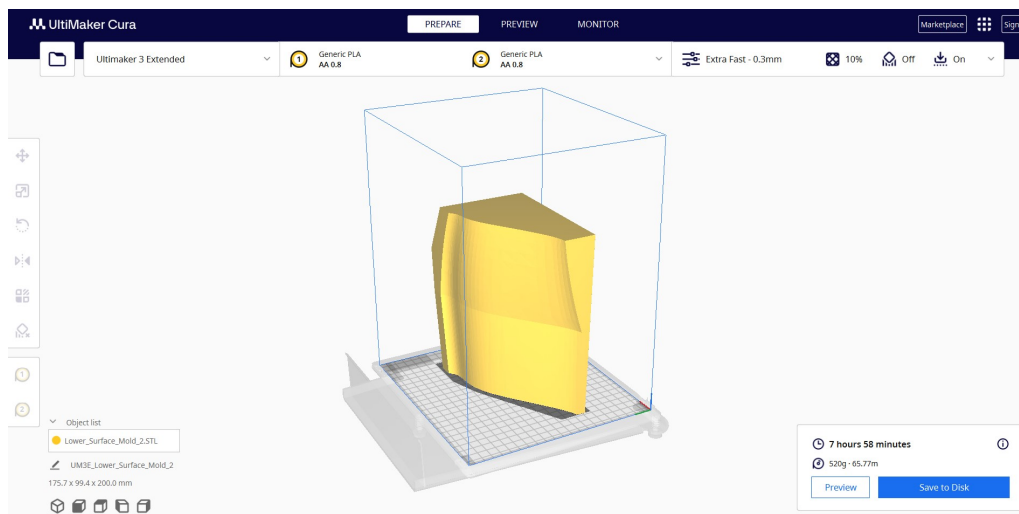


Figura 5.10: Simulação do tempo de impressão da peça 2 do molde

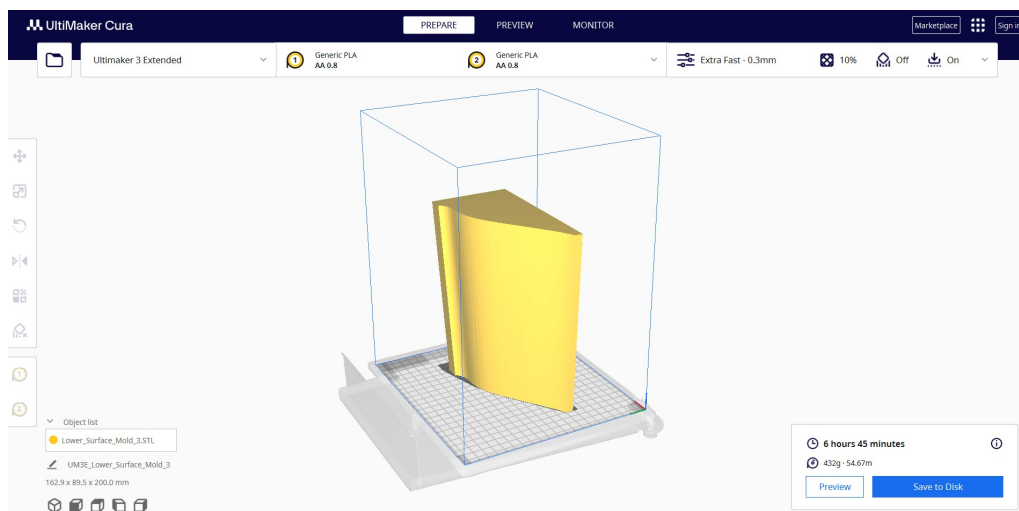
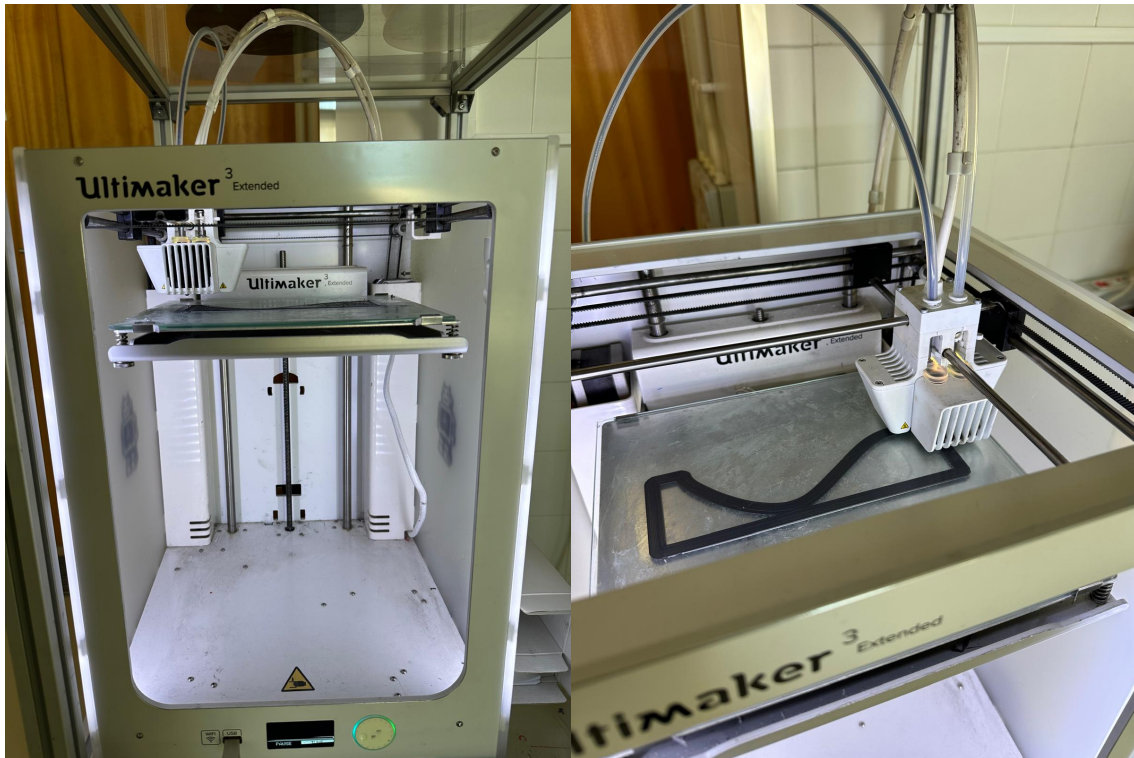


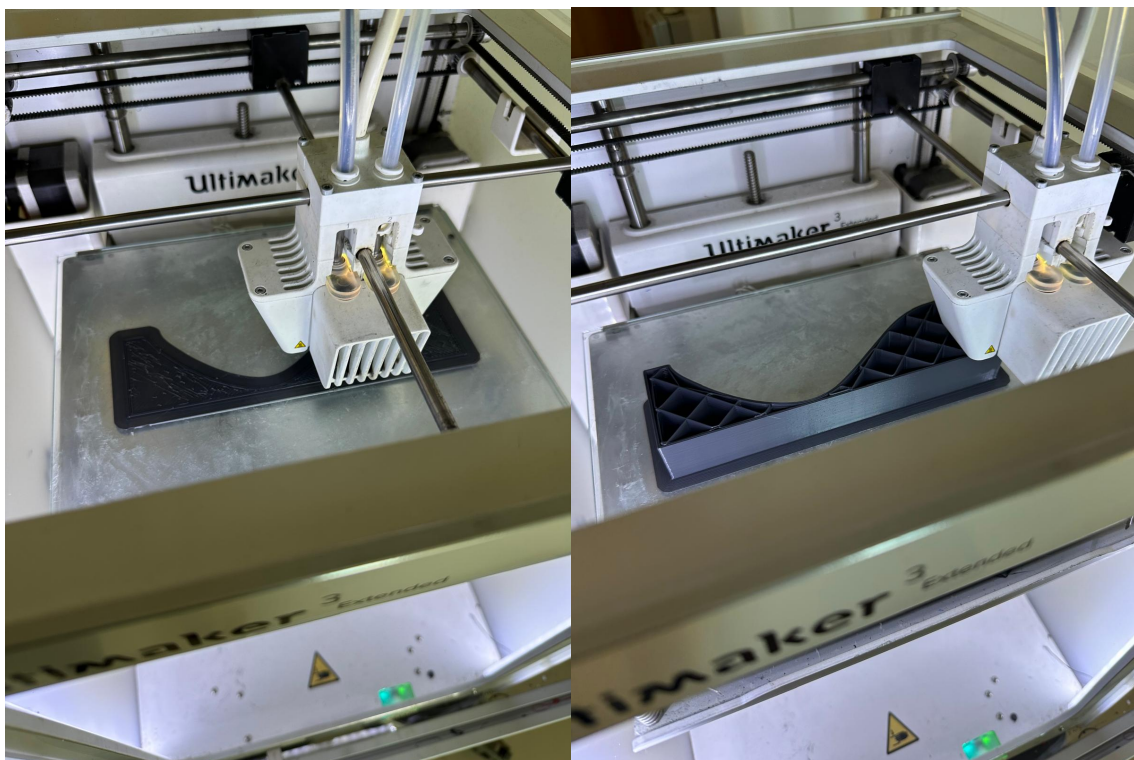
Figura 5.11: Simulação do tempo de impressão da peça 3 do molde

tempo o filamento prendia-se na entrada de alimentação. O mecanismo de extrusão parava de funcionar, mas como a mesa de impressão não detetava o problema, continuava a mover-se normalmente, como se o processo estivesse a decorrer sem falhas. Isto resultava na paragem da extrusão de material, com a mesa a continuar a baixar sem que nada fosse impresso.



(a) Início da impressão

(b) Definição do perfil



(c) Preenchimento do fundo

(d) Definição do preenchimento interno

Figura 5.12: Processo de impressão

Tentámos diversas soluções para resolver este problema, desde o ajuste do tensionamento do filamento até à limpeza e manutenção do extrusor e do bico de impressão. No entanto, apesar das várias tentativas, não conseguimos resolver a situação de forma satisfatória. Como consequência, o processo de impressão continuou a ser interrompido, o que inviabilizou o avanço na fabricação do molde, conforme podemos ver na Figura 5.13, os resultados das diversas tentativas.

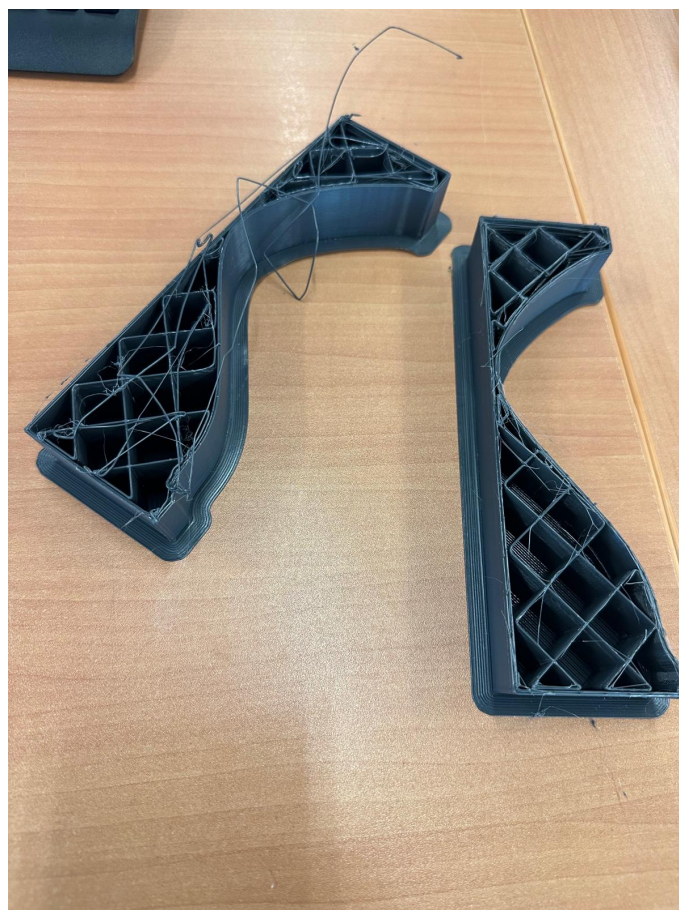


Figura 5.13: Resultado das tentativas de impressão

Para agravar a situação, surgiram outros problemas com a impressora. A máquina deixou de reconhecer as pendrives, o que impedia o carregamento de novos ficheiros de impressão. Este novo contratempo tornou-se um obstáculo adicional, limitando ainda mais as opções de continuar o trabalho através da impressora 3D.

Face a estes problemas técnicos, foi necessário suspender a utilização da impressora 3D para a produção do molde e reconsiderar outras abordagens para dar continuidade ao projeto. A combinação de fatores como o tempo excessivo de impressão, a falha mecânica no extrusor e a disfunção no reconhecimento dos dispositivos de armazenamento forçaram uma mudança na estratégia inicial.

Após os desafios enfrentados com a impressão 3D do molde, optou-se por explorar outra alternativa: Maquinagem CNC em madeira. A ideia era criar o molde através de um processo de fresagem controlada por computador, utilizando madeira como material

principal. Esse método prometia maior precisão e velocidade em comparação com a impressão 3D, além de permitir a criação de moldes em peças maiores.

No entanto, durante a fase de preparação e simulação da maquinação, surgiram novos desafios. O perfil aerodinâmico complexo da pá, aliado às suas grandes dimensões, exigiu uma máquina CNC de alta capacidade e ferramentas especializadas, o que tornou o processo igualmente inviável no contexto dos recursos disponíveis. Além disso, o tempo necessário para ajustar os parâmetros de maquinação, preparar o material e executar o processo completo seria demasiado longo, considerando o prazo disponível para a entrega da dissertação, no mínimo 15 dias para ter as duas partes do molde feitas. Na Figura 5.14 podemos ver a configuração e codificação para a maquinação do molde da superfície inferior da pá.

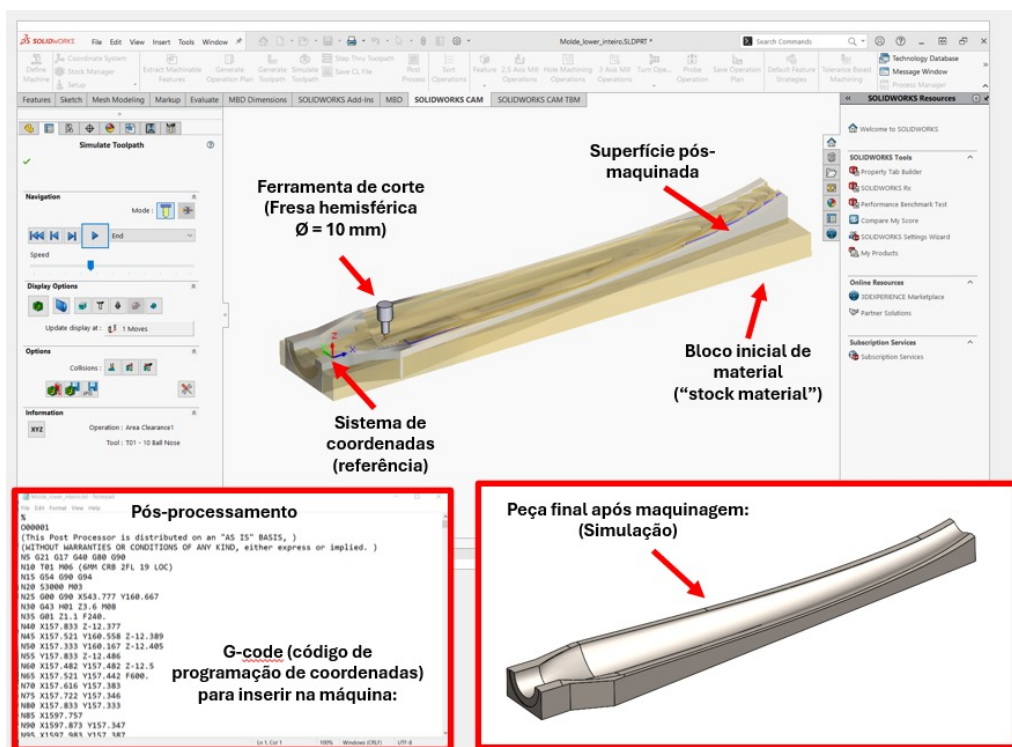


Figura 5.14: Configuração para a maquinação do molde da superfície inferior da pá

Devido a todas essas limitações, e com o prazo de entrega da dissertação a aproximar-se, tomou-se a decisão de não avançar com a construção física da pá. Apesar de não ter sido possível concluir o protótipo físico, o projeto computacional foi concluído com sucesso. O modelo CAD da pá, assim como o projecto dos moldes, foram desenvolvidos e documentados em detalhe.

Essa decisão permitiu que o foco fosse direcionado para a análise computacional das técnicas de deteção e o desenvolvimento teórico, garantindo que os objetivos centrais da disseertação fossem atingidos, ainda que a construção física da pá tenha sido adiada devido às limitações de tempo e recursos.

5.2 Alternativa para a identificação de dano

Quanto à identificação de dano, é importante destacar que, devido à não realização da produção do modelo físico da pá, a aquisição de dados experimentais não foi possível nesta fase do projeto. No entanto, esta limitação não compromete o valor da presente pesquisa, que se insere como uma contribuição para um projeto maior voltado para a monitorização da integridade estrutural. Este projeto já conta com duas contribuições significativas [1] e [2], que servem como base para a investigação em curso, sendo que a técnica *Cloud of Spheres* será aplicada futuramente a dados experimentais.

No âmbito da identificação de dano, a presente dissertação propõe a introdução de uma nova técnica de deteção, em alternativa à Distância de Mahalanobis, uma métrica amplamente utilizada para detectar anomalias em conjuntos de dados com a análise da Curva ROC e a AUC, para melhorar a precisão na identificação de danos, permitindo uma avaliação mais robusta do desempenho do modelo.

A nova técnica a introduzir é baseada no conceito de *Cloud of Spheres*, que, na verdade, consiste em hiper-esferas, dado que operam em espaços multidimensionais. Esta técnica destaca-se pela sua capacidade de oferecer uma representação visual das anomalias no espaço de dados, facilitando a deteção de danos. Ao proporcionar uma análise mais intuitiva e compreensível, esta abordagem poderá complementar as metodologias existentes e oferecer uma nova perspetiva na identificação de danos em pás de turbinas eólicas [24].

Em suma, embora não se tenha conseguido a realização prática do protótipo físico, as contribuições teóricas e metodológicas desta tese visam não apenas preencher lacunas na pesquisa existente, mas também estabelecer um caminho para futuras investigações que poderão levar à efetiva construção e teste de protótipos físicos.

Com os equipamentos utilizados em [2], foi realizada uma simulação para identificação de dano. Para tal, uma viga cantilever foi colocada ao ar livre, e com a excitação do vento, as respostas foram medidas nos mesmos locais de colocação dos sensores, conforme mostrado na Figura 5.15.

A viga utilizada na aplicação experimental possui as características descritas na Tabela 5.2, sendo que 0,18 m do seu comprimento foram inseridos numa prensa hidráulica que exerceu uma pressão média de 200 bar para simular encastramento.

Tabela 5.2: Características da viga utilizada no experimento.

Propriedade	Valor
Comprimento	0,82 m
Espessura	0.006 m
Largura	0.035 m
Módulo de Elasticidade	200 GPa
Densidade	7870 kg/m ⁻³
Ponto de fusão	1370° C

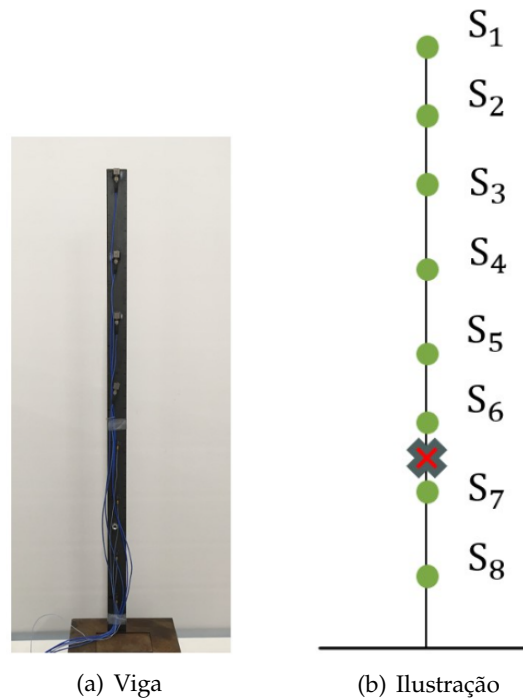


Figura 5.15: Sensores na viga

A viga foi posicionada ao ar livre, permitindo que fosse excitada exclusivamente pelo vento, o que proporcionou uma monitorização contínua da estrutura. As respostas foram medidas por oito sensores, os mesmos utilizados em [2]. O sistema de aquisição de dados utilizado foi o modelo portátil Prosig P8012, no qual todos os oito sensores estavam conectados. Juntamente com o *software* DATS, as acelerações foram observadas em tempo real e salvas em formatos de arquivo específicos. Para este estudo, as acelerações de cada sensor foram salvas em arquivos CSV e posteriormente convertidas em arquivos NPY no código Python escrito para análise.

O dano foi introduzido na estrutura através da adição de porcas, como apresentado na Figura 5.16. Cada porca pesa 2 g, o que representa 0,146 % do peso da viga, e foram usadas até 5 porcas para cada conjunto de observações de danos, ou seja, 5 níveis de dano (1 porca em cada nível). O modelo que simula a estrutura, a partir do qual é feita a verificação de atualização do modelo, é um modelo de elementos finitos (FEM) não amortecido, com 40 elementos.

A partir do modelo FEM não amortecido, as quatro primeiras frequências naturais (f_n) foram determinadas em Python e são as seguintes:

$$f_n = \left\{ \begin{array}{l} 7.267 \text{ Hz} \\ 45.54 \text{ Hz} \\ 127.51 \text{ Hz} \\ 249.87 \text{ Hz} \end{array} \right\}$$

As formas modais estruturais descrevem a maneira como uma estrutura vibra (ou se



Figura 5.16: Introdução de dano

deforma) quando excitada pela frequência natural correspondente. Cada forma modal tem um número associado de nós (pontos com deslocamentos nulos). A análise das inclinações das quatro primeiras formas modais é importante para identificar quais locais devem ser evitados ao colocar sensores na estrutura para medir as respostas temporais, uma vez que os sensores medem os deslocamentos de cada nó de elemento finito. Na Figura 5.17, as inclinações das quatro primeiras formas modais estão representadas em deslocamentos normalizados e por nó de elemento finito.

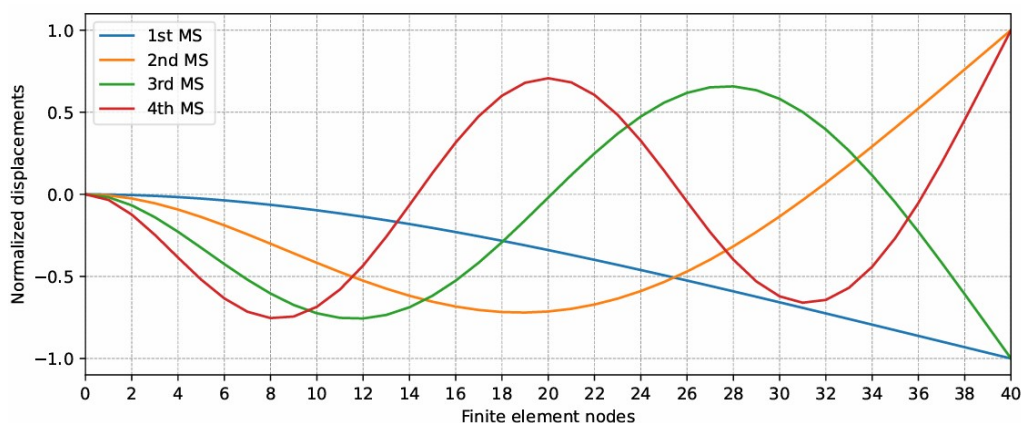


Figura 5.17: As quatro primeiras formas modais

Usando os métodos de identificação modal descritos anteriormente nas secções 4.1.1 (SSI-COV) e 4.1.2 (EFDD), a Figura 5.18 mostra o gráfico da quarta frequência natural em função do número de observações.

A metodologia para a identificação do dano é a descrita no Capítulo 2, sendo que o objetivo foi alterar a técnica de detecção, aplicando o método baseado em *Cloud of Spheres*, como ilustrado na Figura 5.19.

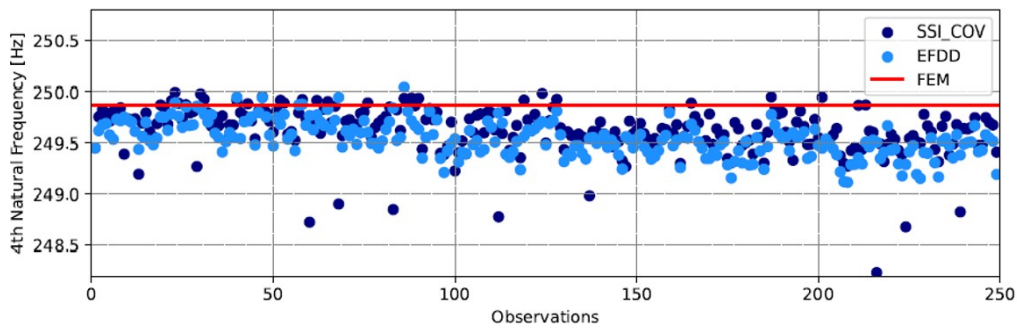


Figura 5.18: 4ª frequência natural

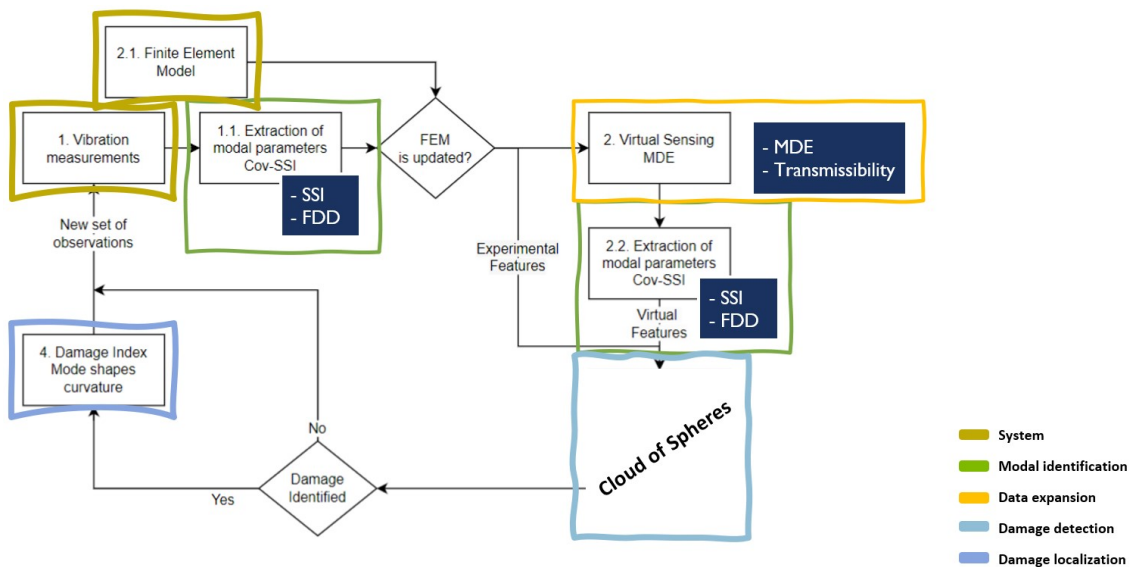


Figura 5.19: Metodologia alternativa para a identificação de dano

Para a presente experiência, foram consideradas séries temporais de aceleração capturadas por sensores em diferentes estados da estrutura. Inicialmente, foram recolhidas 85 séries temporais correspondentes a uma condição de referência, ou seja, sem qualquer dano estrutural. Para a simulação de danos, foram estabelecidos 5 níveis distintos, cada um correspondente à adição incremental de uma porca, alterando a estrutura e simulando diferentes níveis de dano. Para cada nível de dano, foram recolhidas 19 séries temporais adicionais, permitindo comparar os dados das condições saudáveis com os dos estados danificados.

Esta abordagem baseia-se na análise de acelerações ao longo do tempo, com o intuito de identificar alterações no comportamento vibratório da estrutura à medida que os danos são introduzidos. As mudanças nos padrões de aceleração entre as séries temporais de referência e as de cada nível de dano são cruciais para a deteção e análise dos danos estruturais, sendo a base para a implementação das técnicas de identificação de dano propostas nesta tese.

Na Figura 5.20, podemos ver as quatro primeiras frequências naturais com os diferentes

níveis de dano introduzidos. Para a detecção dos danos, como anteriormente referido, foi utilizada a técnica sugerida (*Cloud of Spheres*), e os resultados podem ser observados na Figura 5.21. Como podemos observar, os pontos relativos aos danos não se encontram dentro das esferas de referência, sendo que o nível 5 de dano, por ser o mais elevado, está mais afastado das esferas de referência.

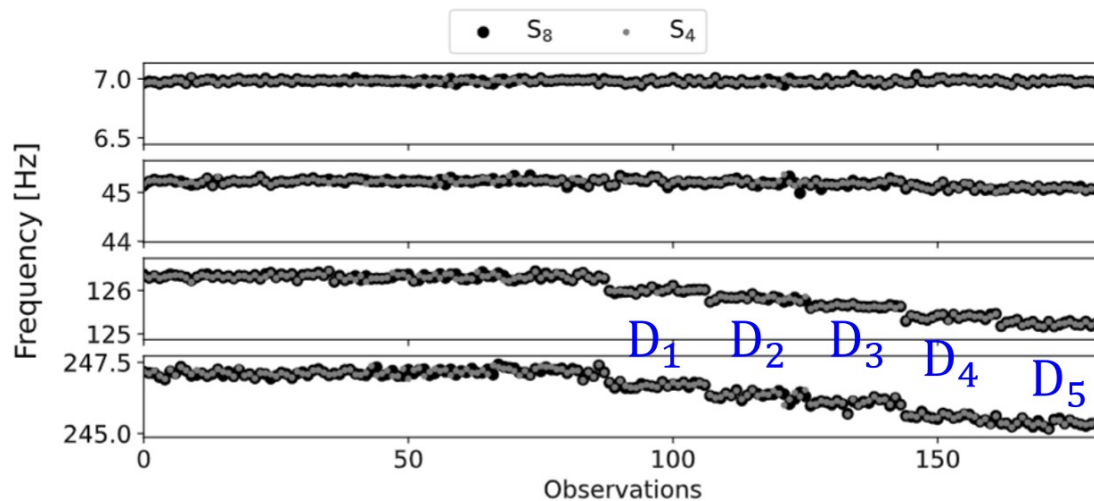


Figura 5.20: Frequências naturais com os diferentes níveis de dano introduzidos

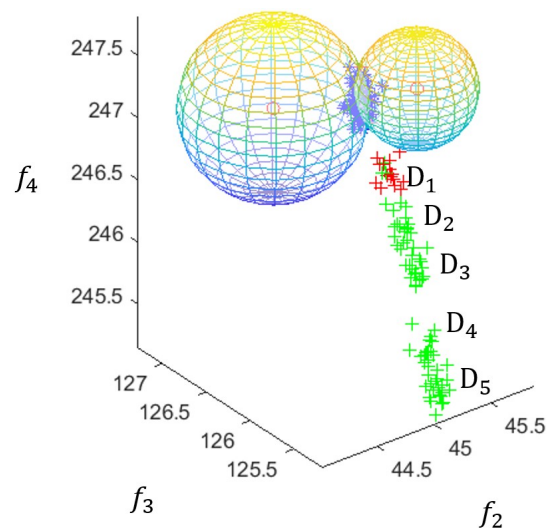


Figura 5.21: Identificação de danos pela técnica baseada em *Cloud of Spheres*

CONCLUSÃO

A presente dissertação, intitulada "Desenvolvimento e Utilização de um Modelo de Testes para Identificação de Dano em Pás de Turbinas Eólicas", aborda um tema de crescente relevância na área das energias renováveis. O foco principal foi o desenvolvimento de um modelo de testes para a identificação de danos em pás de turbinas eólicas, sendo que, apesar de não ter sido possível a construção física do protótipo, o trabalho realizado permitiu obter resultados significativos e contribuir para o conhecimento nesta área.

O desenvolvimento do protótipo, embora apenas computacional, foi meticulosamente elaborado, tendo em vista a sua versatilidade para a simulação de danos estruturais e para a instrumentação de diversa ordem. A escolha do perfil aerodinâmico NREL S809, conhecido pela sua eficiência e estabilidade em diferentes condições de vento, demonstrou um compromisso com o desempenho da turbina. O comprimento total da pá, estabelecido em 1800 mm e a largura máxima de 275 mm, na primeira abordagem, e na segunda, com as dimensões reduzidas numa escala de 0.6 em relação à primeira abordagem, foram projetados para otimizar o fluxo de ar e a transferência de energia mecânica, elementos cruciais para a operação eficiente das turbinas eólicas.

A utilização de materiais como fibra de vidro para as *skins* e PLA para a impressão 3D da estrutura interna foi uma escolha estratégica, visando a combinação ideal de leveza e rigidez. O processo de construção das cascas em material compósito laminado através de moldes, utilizando PLA ou madeira, revelou-se uma abordagem viável, que poderá ser replicada em futuros projetos, tendo em vista a otimização do tempo de produção e a utilização de novos materiais.

A pesquisa realizada contribui significativamente para o campo da identificação de dano em turbinas eólicas, estabelecendo uma base sólida para futuras investigações. No entanto, por dificuldades diversas, não foi possível construir o protótipo físico da pá em tempo útil.

Os métodos propostos, incluindo a introdução da Distância de Mahalanobis combinada com a análise da Curva ROC e AUC, visam melhorar a precisão na detecção de anomalias. A inovação mais significativa reside na introdução da técnica baseada em *Cloud of Spheres*, que oferece a capacidade de separação de dados referentes a diferentes estágios de condição

estrutural, visando a detecção de anomalias no espaço multidimensional, facilitando a detecção de danos e complementando as metodologias existentes.

No que diz respeito à identificação de dano, a dissertação propõe uma abordagem alternativa que, embora tenha sido limitada pela não execução do protótipo físico, não compromete a validade da investigação. A pesquisa insere-se num projeto mais amplo, e que estabelece um caminho para futuras investigações na monitorização da integridade estrutural com foco nas pás de eólicas.

Para demonstrar a aplicação da nova técnica de detecção de dano, foram utilizados resultados experimentais de estudos anteriores. A realização de uma simulação com uma viga encastada livre posicionada ao ar livre permitiu uma monitorização contínua da estrutura, excitada exclusivamente pelo vento. A recolha de dados em tempo real através de sensores possibilitou a realização de análises comparativas entre condições de referência e estados danificados.

A introdução de danos na viga, através da adição de pesos, permitiu simular diferentes níveis de dano e observar as mudanças no comportamento vibratório da estrutura. Os resultados obtidos demonstraram a eficácia da técnica baseada em *Cloud of Spheres*, que foi capaz de identificar claramente os danos introduzidos, evidenciando uma abordagem inovadora na detecção de danos estruturais.

A análise das frequências naturais, realizada através de um modelo de elementos finitos, foi fundamental para compreender as características vibratórias da estrutura. Este conhecimento é essencial para a localização e caracterização de danos, otimizando a colocação de sensores e a análise dos dados recolhidos. A determinação das quatro primeiras frequências naturais da viga permitiu não apenas identificar os pontos críticos para a colocação de sensores, mas também compreender as deformações que a estrutura pode sofrer sob excitação.

Em suma, a dissertação contribui de forma significativa para o avanço do conhecimento na identificação de dano em pás de turbinas eólicas, apesar das limitações encontradas. As metodologias propostas e os resultados obtidos estabelecem um caminho promissor para futuras investigações, que deverão culminar na construção e teste de protótipos físicos, contribuindo para a capacitação do Laboratório de Mecânica Experimental da Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa. A introdução da técnica baseada em *Cloud of Spheres* não só representa um avanço na detecção de dano, mas também abre novas perspectivas e abordagens que podem enriquecer as práticas de monitorização da integridade estrutural em sistemas de engenharia complexos. O trabalho desenvolvido nesta dissertação não apenas sublinha a importância de uma abordagem sistemática e inovadora para a pesquisa em engenharia, mas também realça a necessidade de continuar a explorar novos caminhos que assegurem a eficiência e a sustentabilidade das energias renováveis.

6.1 Recomendações futuras

Com base no trabalho desenvolvido nesta dissertação, é recomendável que futuros estudos se concentrem na fabricação do protótipo físico da pá da turbina eólica. A criação de um modelo tangível permitirá a realização de simulações que se aproximem da realidade operacional das turbinas, proporcionando dados mais precisos e relevantes para a identificação de danos. Entre os tipos de danos a serem explorados, destaca-se a falha da junta adesiva das duas cascas no bordo de ataque e no bordo de fuga, que poderá ser simulada através do desapertar de alguns parafusos de ligação. Além disso, a redução da rigidez estrutural poderá ser investigada pela remoção de *box beams*, aumentando a suscetibilidade a danos por corte e instabilidade dinâmica. Outros fenômenos a considerar incluem vibrações excessivas e aumento das tensões na raiz da pá, que poderão ser introduzidos ao desapertar parafusos na fixação da pá aos acessórios de fixação ao solo. Essas simulações fornecerão uma compreensão mais abrangente do comportamento das pás sob diferentes condições operacionais e contribuirão para o desenvolvimento de estratégias eficazes de monitorização e manutenção.

Além disso, recomenda-se que as futuras investigações explorem a combinação da Distância de Mahalanobis com a métrica AUC, ao lado da técnica baseada em *Cloud of Spheres*. Essa abordagem comparativa permitirá identificar qual técnica é mais eficaz em diferentes cenários de danos simulados, contribuindo assim para a otimização dos métodos de detecção de danos.

Outra direção promissora seria a análise do novo método denominado "*Automated hypersphere-based healthy subspace method for robust and unsupervised damage detection via random vibration response signals*" [25]. Este método propõe a construção aproximada, dentro de um espaço de características adequado, de um subespaço saudável que representa a dinâmica estrutural saudável sob incertezas. A metodologia é baseada na união de hipersferas seleccionadas adequadamente e é realizada através de um algoritmo totalmente automatizado, eliminando intervenções do utilizador e, portanto, selecções subjectivas.

Os resultados deste método mostram um desempenho excelente em detecção de dano, possível de ser comparado favoravelmente com métodos robustos de detecção de danos já estabelecidos. Integrar esta abordagem às técnicas existentes pode não só ampliar a capacidade de detecção, mas também oferecer um sistema mais flexível e adaptável a diferentes condições operacionais e tipos de danos.

Deste modo, as recomendações futuras não só visam reforçar as metodologias de detecção de dano, mas também inovar na construção de protótipos que contribuam significativamente para a eficiência e segurança das turbinas eólicas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Pereira. «Understanding and exploring virtual sensing and its capabilities for structural health monitoring». Tese de mestrado. Universidade NOVA de Lisboa, 2021. URL: <http://hdl.handle.net/10362/141378> (ver pp. 3, 10, 45, 46, 74).
- [2] A. Mendes. «On the use of virtual sensing for damage identification on wind turbine blades». Tese de mestrado. Universidade NOVA de Lisboa, 2022. URL: <http://hdl.handle.net/10362/159587> (ver pp. 4, 9, 10, 12, 47, 49, 54–57, 74, 75).
- [3] M. Ragheb e A. M. Ragheb. «Wind Turbines Theory - The Betz Equation and Optimal Rotor Tip Speed Ratio». Em: *IntechOpen Journals* (2014). DOI: [10.5772/21398](https://doi.org/10.5772/21398) (ver p. 4).
- [4] E. Hau. «Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application and Economics». Em: *Springer* Vol. 2 (2013). DOI: <https://doi.org/10.1007/3-540-29284-5> (ver p. 5).
- [5] Airtech. «Vacuum bagging materials for resin infusion». Em: *Airtech Advanced Materials* (2020). URL: <https://airtech.com/resin-infusion> (ver p. 6).
- [6] N. Beganovic. «Structural health management: utilization for lifetime prognosis and advanced control strategy deployment of Wind Turbines: An overview and outlook concerning actual methods, tools, and obtained results». Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Vol. 64 (2016). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.083> (ver p. 7).
- [7] B. Yang. «Testing, inspecting and monitoring technologies for wind turbine blades: A survey». Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Vol. 22 (2013). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.056> (ver p. 7).
- [8] A. Yadav. «Airfoil for application in wind turbine blade: A Review». Em: *International Journal of Engineering Sciences and Research - IJESRT* Vol. 6 (6) (2017). DOI: [10.5281/zenodo.817900](https://zenodo.org/record/817900) (ver pp. 13, 36).
- [9] *Airfoil Tools*. Acessado em: 09/09/2024. 2024. URL: <http://airfoiltools.com/> (ver p. 13).

- [10] M. da Gama. «Defects tracking in Out-of-Autoclave composite materials». Tese de mestrado. Universidade do Porto, 2017. URL: <https://hdl.handle.net/10216/107984> (ver pp. 21–23).
- [11] O. Nixon-Pearson et al. *Wind turbine blades: Design and manufacturing, current state of the art - Literature Review*. Cornwall Flow Accelerator, 2022. URL: <https://shorturl.at/jqnTS> (ver pp. 22, 24, 26, 28–30).
- [12] L. Beyland. «Segmentation technology for large onshore blades». Em: *IQPC Conference "Advances in Rotor Blades for Wind Turbines"*. 2014. URL: <https://shorturl.at/BANws> (ver p. 23).
- [13] B. Hand, G. Kelly e A. Cashman. «Structural analysis of an offshore vertical axis wind turbine composite blade experiencing an extreme wind load». Em: *Marine Structures* Vol. 75 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2020.102858> (ver p. 26).
- [14] *BASF - The Chemical Company*. Acessado em: 11/08/2024. 2017. URL: www.basf.de/science_around_us (ver p. 27).
- [15] *INTERMAS*. Acessado em: 19/08/2024. 2016. URL: <https://shorturl.at/XUgga> (ver p. 28).
- [16] B. Post et al. «Additive manufacturing of wind turbine molds». Em: *OAK Ridge National Laboratory* (2017). URL: <https://shorturl.at/15jJy> (ver pp. 29, 30).
- [17] M. Froese. «Senvion to power its largest turbine blade manufacturing facility with wind». Em: *Wind Power Engineering and Development* (2018). URL: <https://shorturl.at/90qNe> (ver p. 31).
- [18] Z. Tech. *Blade Mould Hydraulic Hinge Systems*. Acessado em: 23/08/2024. 2017. URL: <https://zz-tech.de/wind-power/blade-mould-hydraulic-hinge-systems/> (ver p. 31).
- [19] M. Jensen et al. *Wind turbine blade: Handbook*. Bladerna, 2019. ISBN: 978-87-971709-0-8 (ver pp. 32–35).
- [20] R. Brincker e C. Ventura. *Introduction to Operational Modal Analysis*. John Wiley e Sons, Ltd, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/9781118535141> (ver pp. 42–44, 48).
- [21] P. V. Overschee e B. de Moor. *Subspace Identification for Linear Systems: Theory - Implementation - Applications*. Springer New York, NY, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0465-4> (ver p. 45).
- [22] A. Iliopoulos, R. Shirzadeh e W. Weijtens. «A modal decomposition and expansion approach for prediction of dynamic responses on a monopile offshore wind turbine using a limited number of vibration sensors». Em: *Mechanical Systems and Signal Processing* Vol. 68-69 (2016). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2015.07.016> (ver p. 51).

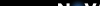
- [23] N. Maia, A. Urgueira e R. Almeida. «Estimation of the structural dynamic response using the transmissibility concept». Em: *Proceedings of International Conference of Acústica (Acústica 2008)*. 2008. URL: <https://shorturl.at/CkWTF> (ver pp. 51, 52).
- [24] T. Diasa e P. Amaral. «A classification method based on a cloud of spheres». Em: *EURO Journal on Computational Optimization* Vol. 11 (2023). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejco.2023.100077> (ver pp. 57–60, 74).
- [25] V.-S. Kyriakos, F. Spilios e S. John. «An automated hypersphere-based healthy subspace method for robust and unsupervised damage detection via random vibration response signals». Em: *Structural Health Monitoring* Vol. 21 (2) (2021). DOI: <https://doi.org/10.1177/14759217211004429> (ver p. 81).



2024

SOBRE O DESENVOLVIMENTO E UTILIZAÇÃO DE UM MODELO DE TESTES PARA IDENTIFICAÇÃO DE DANO EM PÁS DE TURBINAS EÓLICAS

Luís Gomes



NOVA

UNIVERSITY OF LISBON

SCHOOL OF

ENGINEERING

AND TECHNOLOGY