

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
E DE MATERIAIS

DANILO GOMES DELLAROZA

OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE PÁS DE TURBINAS EÓLICAS DE MATERIAL
COMPÓSITO VIA FUNÇÕES DE BASE RADIAL

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2021

DANILO GOMES DELLAROZA

**OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE PÁS DE TURBINAS EÓLICAS DE MATERIAL
COMPÓSITO VIA FUNÇÕES DE BASE RADIAL**

**Structural Optimization of Composite Material Wind Turbine Blades via
Radial Basis Function**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de concentração: Mecânica dos Sólidos.

Orientador: Prof. Dr. Marco Antônio Luersen

Coorientador: Prof. Dr. Cláudio Tavares da Silva

CURITIBA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite que outros façam download dos trabalhos e os compartilhem desde que atribuam crédito aos autores, mas sem que possam alterá-los de nenhuma forma ou utilizá-los para fins comerciais. O link sobre a imagem dá acesso a todos os termos da licença.



**Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do
Paraná Câmpus Curitiba**



DANILO GOMES DELLAROZA

**OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE PÁS DE TURBINAS EÓLICAS DE MATERIAL COMPÓSITO VIA
FUNÇÕES DE BASE RADIAL**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Mecânica Dos Sólidos.

Data de aprovação: 26 de Fevereiro de
2021

Prof Marco Antonio Luersen, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Jucelio Tomas Pereira, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Prof Mauricio Vicente Donadon, Doutorado - Instituto Tecnológico de Aeronáutica (Ita)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 26/02/2021.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, por acreditarem, investirem e torcerem por mim incondicionalmente.

Agradeço a minha esposa Isabela por toda sua colaboração e paciência nos momentos que estive ausente trabalhando nessa dissertação.

Agradeço ao Prof. Marco Luersen pela orientação durante o mestrado, por confiar na minha capacidade e ter paciência com meus erros, além de sempre estar disponível para tirar minhas dúvidas.

Agradeço ao Prof. Cláudio Tavares por aceitar ser coorientador deste trabalho, estando sempre disponível a ajudar e a compartilhar seus conhecimentos, confiando e me motivando a terminar o mestrado.

Agradeço a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais (PPGEM) por disponibilizarem toda a infraestrutura necessária para a realização desse trabalho.

RESUMO

Dellaroza, Danilo Gomes. **Otimização Estrutural de Pás de Turbinas Eólicas de Material Compósito Via Funções de Base Radial**, Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 91 páginas, 2021.

Turbinas eólicas são máquinas capazes de converter energia cinética do vento em eletricidade. As pás da turbina são responsáveis por converter as forças aerodinâmicas em torque para o gerador. Na maioria dos casos, as pás são fabricadas com materiais compósitos e sua rigidez e comportamento têm influência direta no desempenho da turbina, e, por sua vez, o material e sequência de laminação influenciam na rigidez da pá. Tirando proveito do acoplamento flexão-torção proporcionado pela sequência de laminação dos materiais compósitos, é possível produzir um controle passivo do ângulo de arfagem das pás de geradores eólicos de pequeno porte. Esse controle passivo tem por objetivo melhorar o rendimento das pás para velocidades de vento superiores à que a velocidade nominal de projeto. Dentro deste contexto, o presente trabalho tem como objetivo obter a melhor configuração de empilhamento para o projeto de uma pá de turbina eólica de material compósito laminado utilizando uma técnica de otimização baseada em metamodelagem. Para isso, utiliza-se o método dos elementos finitos para modelar o comportamento mecânico de uma pá. O modelo é parametrizado de forma a simular diferentes configurações de laminados e avaliar o comportamento da pá com diferentes velocidades de vento. A partir de resultados de simulações do modelo de elementos finitos é construído um metamodelo, utilizando funções de base radial. Adotam-se como variáveis de entrada as orientações das lâminas do material compósito e, como saída, o coeficiente de potência da turbina eólica. Em posse do metamodelo, realiza-se um processo de otimização para encontrar a sequência de laminação que fornece o melhor coeficiente de potência. Essa sequência é comparada com as demais configurações de laminado, assim como as respostas obtidas através do metamodelo são verificadas com as respostas do modelo de elementos finitos. Os resultados encontrados demonstram que a metodologia de otimização utilizando metamodelos é eficiente, além disso, o controle passivo do ângulo de arfagem de pás de geradores eólicos pode ser empregado gerando ganho de rendimento da turbina, usando para isso o acoplamento flexão-torção dos materiais compósitos.

Palavras-chave: Pá de Turbina Eólica. Compósitos Laminados. Otimização. Função de Base Radial. Método dos Elementos Finitos.

ABSTRACT

Dellaroza, Danilo Gomes. **Structural Optimization of Composite Material Wind Turbine Blades via Radial Basis Function**, Master's Dissertation – Postgraduate Program in Mechanical and Materials Engineering, Federal University of Technology – Parana. Curitiba, 91 pages, 2021.

Wind turbines are machines capable of transforming wind kinetic energy into electricity. The turbine blades are responsible for converting aerodynamic forces into torque for the generator. In most cases, blades are made of composite materials and their stiffness and behavior affect the turbine performance, on the other hand, the material and layup orientation influence the blade stiffness. By taking advantage of the bend-twist coupling that is offered by the layup sequence of composite materials, it is possible to produce a passive control of the pitch angle in small size wind turbines. The passive control aims to improve the blade performance for higher wind speeds than the nominal design speed. Within this context, this research aims to obtain the best layup sequence of a wind turbine blade made of laminated composite material using metamodeling based optimization. For this, the finite element method is used to model the mechanical behavior of the wind turbine blade. The model is parameterized in order to simulate several layup configurations and to evaluate the behavior of the blade undergoing different wind speeds. From the simulation responses of the finite element model, a surrogate model is generated, using radial basis functions. Ply orientations are adopted as input variables, and the power coefficient of the wind turbine as output. In possession of the metamodel, an optimization process is carried out to find the layup sequence that offers the highest power coefficient. The optimized layup sequence is compared with other layup configurations, as well as the surrogate model responses with the finite element model itself. The results demonstrate that the optimization methodology using metamodels is efficient, moreover, the passive control of the pitch angle of wind turbine blades can be applied and generates a better performance for the turbine, using for that the bend-twist coupling of composite materials.

Keywords: Wind Turbine Blade. Laminate Composites. Optimization. Radial Basis Functions. Finite Element Method.

LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLOS GREGOS

\mathfrak{S}	Conjunto de pontos Iniciais
Σ	Somatório
Ω	Velocidade angular (rad/s)
Ω_n	Conjunto de novos pontos candidatos
α	Ângulo de ataque (ângulo de arfagem)
β	Coefficiente dos polinômios gerados pela regressão polinomial
γ	Deformação cisalhante
$\delta(\mathbf{x})$	Função erro
ε	Deformação longitudinal
θ	Ângulo de laminação das fibras em relação ao eixo de coordenadas global x
$\theta_{p,o}$	Ângulo de inclinação da pá
θ_p	Ângulo de inclinação da seção da pá
θ_t	Ângulo de torção da seção
θ_x	Ângulo de torção da pá
κ	Curvatura de deformação da superfície média
λ_r	Relação entre a velocidade do vento e a velocidade do rotor
π_j	Permutações aleatórias uniformes independentes
ρ	Densidade específica do ar
σ'	Solidez da corda
σ_x	Tensão normal na direção x
σ_y	Tensão normal na direção y
σ_z	Tensão normal na direção z
τ_{xy}	Tensão de cisalhamento no plano xy
τ_{xz}	Tensão de cisalhamento no plano xz
τ_{yz}	Tensão de cisalhamento no plano yz

φ	Ângulo em relação ao vento
Φ	Vetor funções de base radial
ϕ	Função de base radial
Δ_n	Distância mínima entre pontos avaliados
\in	Significado equivalente a pertence
U	União
\subseteq	Contido
ν	Coefficiente de Poisson

SÍMBOLOS LATINOS

a	Fator de indução axial
A_{ij}	Termos da matriz A pertencente à matriz de rigidez ABD
\mathcal{A}_n	Conjunto de amostras, incluindo somente as entradas
a'	Fator de indução angular
B	Número de pás do rotor
B_{ij}	Termos da matriz B pertencente à matriz de rigidez ABD
\mathcal{B}_n	Conjunto de amostras incluindo entradas e saídas atualizado
c	Comprimento de corda pá
C_d	Coefficiente de arrasto
C_l	Coefficiente de sustentação
C_p	Coefficiente de potência
\mathfrak{D}	Domínio do hiper-cubo
D_{ij}	Termos da matriz D pertencente à matriz de rigidez ABD
dF_d	Incremento da força de arrasto
dF_L	Incremento da força de sustentação
dF_N	Diferencial da força normal
dF_t	Incremento da força tangencial
dm	Diferencial de massa
dQ	Diferencial de torque
E	Módulo de elasticidade do material

$\hat{f}(\mathbf{x})$	Função aproximada pelo metamodelo
$f(\mathbf{x})$	Função objetivo ou resposta de um modelo original
f_i	Conjunto resposta
F_c	Força centrífuga
F_{xj}	Inverso da função de distribuição acumulada
G	Módulo de elasticidade transversal
$g_i(\mathbf{x})$	Função de restrição de desigualdade
$h_j(\mathbf{x})$	Função de restrição de igualdade
k	Número de uma lâmina
l	Número de níveis para a técnica de fatorial completo
M	Momento no plano
m	Quantidade de restrições de desigualdade
N	Esforços normais ao plano
n	Número de amostras
P	Potência da turbina
p	Quantidade de restrições de igualdade
P_{esc}	Potência total disponível no escoamento
$\bar{\mathbf{Q}}_k$	Matriz de rigidez da k-ésima lâmina
\bar{Q}_{ij}	Termos da matriz de rigidez no sistema global de coordenadas
q	Número de variáveis de projeto
\mathbb{R}^N	Conjunto dos números reais naturais
\mathbb{R}	Conjunto dos números reais
R	Raio do rotor
r	Raio do rotor ao eixo
s	Pontos de amostra independentes
$s(\mathbf{x}_i)$	Função de interpolação
S_{ij}	Termos da matriz de amostras finais
t	Espessura de uma lâmina
U	Velocidade do vento (m/s)
U_d	Velocidade do vento logo após o rotor
U_{ij}	Variáveis uniformemente distribuídas de maneira aleatória
U_∞	Velocidade do vento no escoamento não perturbado

$U_{\infty ref}$	Velocidade relativa do vento na direção normal a pá deformada
U_{rel}	Velocidade relativa do vento
$var(\mathbf{x})$	Variância
\mathbf{w}	Vetor pesos atribuídos a funções de base radial
w	Peso atribuído à função de base radial
W_n	Função para pontuação dos pontos candidatos
\mathbf{X}	Matriz de amostras sem considerar fator de distribuição das variáveis
\mathbf{x}^*	Ponto de mínimo
$\mathbf{x}(i \text{ ou } j)$	Conjunto de dados de entrada – Centro das funções RBF
X_{ij}	Elementos da matriz de amostras sem considerar fator de distribuição das variáveis
z	Distância em relação a linha média do laminado

LISTA DE SIGLAS

2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões
BBD	Box-Behken Design
BEMT	Teoria do Momento do Elemento de Pá – <i>Blade Element Momentum Theory</i>
CAD	Desenho Assistido por Computador
CCD	Planejamento Composto Central - <i>Central Composite Design</i>
DoE	Projeto de Experimentos - <i>Design of Experiments</i>
G-MSRS	<i>Global Metric Stochastic Response Surface</i>
GB	Gigabytes
GHz	Gigahertz
GPa	Gigapascal
GW	Gigawatts
HAWT	Turbina Eólica de Eixo Horizontal – <i>Horizontal Axis Wind Turbine</i>
KRG	Kriging
kW	Kilowatts
LHS	Amostragem via Hiper cubo Latino - <i>Latin Hypercube Sampling</i>
MW	Megawatts
RBF	Funções de Base Radial - <i>Radial Basis Functions</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática de uma turbina eólica	18
Figura 2 - Capacidade instalada de geração de energia eólica no mundo	21
Figura 3 - Representação de ângulo de ataque	22
Figura 4 - Volume de controle de um rotor	24
Figura 5 - Representação esquemática de uma pá dividida em N elementos	26
Figura 6 - Geometria da pá de uma turbina eólica de eixo horizontal	26
Figura 7 - Eixos principais de uma lâmina unidirecional de material compósito	31
Figura 8 - Definição do ângulo de laminação em relação aos eixos de referência	32
Figura 9 - Laminado composto por camadas com diferentes orientações	32
Figura 10 - Termos de acoplamento da matriz de rigidez ABD	36
Figura 11 - Fluxograma para se trabalhar com otimização de metamodelos	37
Figura 12 - Projetos de experimentos de três variáveis para construção de modelos de segunda ordem	40
Figura 13 - Exemplo de LHS para duas variáveis com até cinco níveis, uma com distribuição normal e outra com distribuição uniforme.	42
Figura 14 - Carga crítica de flambagem <i>versus</i> dimensão do reforço para diferentes números de camadas e diferentes metamodelos	44
Figura 15 - Carga de Colapso <i>versus</i> dimensão do reforço para diferentes números de camadas e diferentes metamodelos	45
Figura 16 - Diagrama esquemático de uma rede neural construída através de RBF	48
Figura 17 - Sequência de refinamento do metamodelo proposta por Regis e Schoemaker (2007)	50
Figura 18 - Exemplo da curva de potência aplicando controle passivo com objetivo de elevar diâmetro do rotor	54
Figura 19 - Exemplo da curva de potência aplicando controle passivo com objetivo de se trabalhar sempre com ângulo ótimo de ataque	54
Figura 20 - Função objetivo	58
Figura 21 - Fluxograma da metodologia	59
Figura 22 - Comprimento de corda em função da posição radial	60
Figura 23 - Ângulo de torção geométrica em função da posição radial	60

Figura 24 - Perfil de aerofólio NACA 23018 (linha contínua) e sua linha camber (linha tracejada)	61
Figura 25 - Condições de contorno e carregamentos aplicados no modelo de elementos finitos da pá	63
Figura 26 - Pontos de controle na malha de elementos finitos para cálculo do carregamento aerodinâmico	64
Figura 27 - Turbina sob ação do vento	65
Figura 28 - Resultado da função Branin-Hoo por iteração	68
Figura 29 - Posições das amostras avaliadas com a função real na otimização da função Branin-Hoo	68
Figura 30 - Resultado da função Six Hump Camel Back por iteração	69
Figura 31 - Posições das amostras avaliadas com a função real na otimização da função Six-Hump Camel Back	70
Figura 32 - Resultado da função Hartmann 3D por iteração	71
Figura 33 - Análise de convergência da malha do modelo de elementos finitos	72
Figura 34 - Malha de elementos finitos da pá eólica com 588 elementos de casca	73
Figura 35 - Evolução da função objetivo ao longo das iterações	74
Figura 34 - Erro absoluto por iteração	75
Figura 37 - Erro quadrático médio por iteração	77
Figura 38 - Curvas de C_p em função da velocidade do vento para uma configuração otimizada e outra não otimizada	78
Figura 39 - Coeficiente de sustentação para o Laminado 1 e o Laminado 2 em função do raio da pá da turbida (velocidade do vento de 20 m/s)	79
Figura 40 - Coeficiente de arrasto para o Laminado 1 e o Laminado 2 em função do raio da pá da turbina (velocidade do vento de 20 m/s)	80
Figura 41 - Potência do Laminado 1 e do Laminado 2 em função da velocidade do vento	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados para pás rígida e flexível	55
Tabela 2 - Propriedades de uma lâmina de carbono-epóxi unidirecional prepreg	62
Tabela 3 - Resultados das iterações para o laminado [22 / 85 / 90 / 90 / 90 / -46 /-40], com $U = 20$ m/s	73
Tabela 4 - Esforços na pá de turbina	81

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	CONTEXTO	17
1.2	OBJETIVO E JUSTIFICATIVA	19
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	PÁS DE TURBINAS EÓLICAS	21
2.1.1	Energia Eólica	21
2.1.2	Teoria do momento do elemento de pá (BEMT)	23
2.2	MATERIAIS COMPÓSITOS LAMINADOS	30
2.2.1	Conceitos Gerais	30
2.2.2	Tensões e Deformações em Laminados	33
2.3	OTIMIZAÇÃO	36
2.4	OTIMIZAÇÃO COM METAMODELOS	37
2.5	PROJETO DE EXPERIMENTOS (DoE)	38
2.6	METAMODELOS E APLICAÇÕES A ESTRUTURAS LAMINADAS	42
2.7	FUNÇÕES DE BASE RADIAL	46
2.8	REFINAMENTO SEQUENCIAL DO METAMODELO	49
2.9	APLICAÇÕES DE AEROELASTIC TAILORING NA LITERATURA	52
3	METODOLOGIA	57
3.1	FERRAMENTAS	57
3.2	DESCRIÇÃO GERAL DA METODOLOGIA	57
3.3	MODELO MATEMÁTICO DA PÁ DE TURBINA EÓLICA	59
3.4	CÁLCULO DO ÂNGULO DE ARFAGEM	63
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
4.1	TESTE DO ALGORITMO COM FUNÇÕES CONHECIDAS	67
4.1.1	Função Branin-Hoo	67
4.1.2	Função Six Hump Camel Back	69
4.1.3	Hartmann 3D	70
4.2	TESTE DE CONVERGÊNCIA DA MALHA DA PÁ	72
4.3	TESTE DE CONVERGÊNCIA DO COEFICIENTE DE POTÊNCIA	73
4.4	OTIMIZAÇÃO E REFINAMENTO SEQUENCIAL DO METAMODELO	74

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
5.1	CONCLUSÕES	83
5.2	TRABALHOS FUTUROS	84
	REFERÊNCIAS	85
	APÊNDICE A – Termos da matriz ABD	90

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

A matriz energética mundial é composta de 81,3% de combustíveis fósseis (IEA, 2019) e, apesar de largamente utilizada, essa fonte de energia não é renovável e seu custo é elevado. Esses fatores, somados às crescentes demandas por fontes de energia menos poluentes, têm motivado o crescimento da utilização de soluções energéticas renováveis em todo mundo.

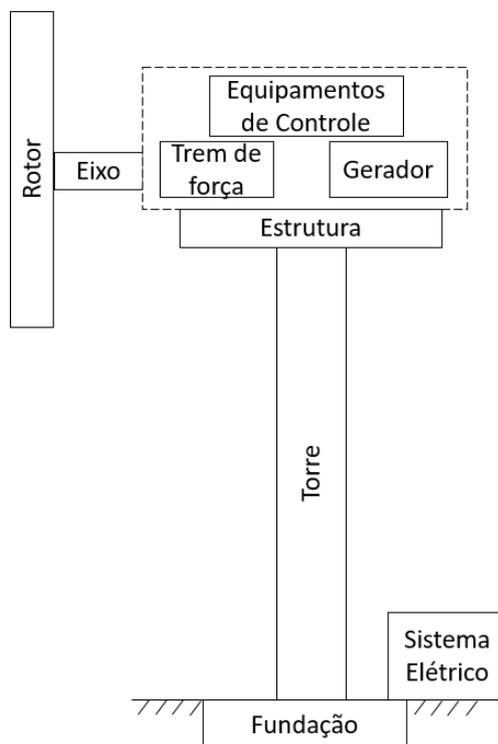
O Brasil possui um cenário diferente do apresentado e cerca de 45% da matriz energética brasileira é constituída de fontes de energia renováveis (IEA, 2019). Dentre essas fontes, destacam-se a energia hidráulica e a eólica, sendo que essa última se encontra em constante aumento de sua capacidade instalada. Só no ano de 2018, a energia eólica alcançou uma potência instalada de 14.390 MW, registrando uma expansão de 17,2% em comparação com 2017 (EPE, 2019).

A conversão de energia do vento em eletricidade é realizada por turbinas eólicas. Nas turbinas modernas, utiliza-se a força aerodinâmica para produzir torque em um eixo, resultando inicialmente em energia mecânica a qual é, em seguida, transformada em eletricidade por um gerador (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009).

Atualmente, o modelo mais utilizado é a turbina eólica de eixo horizontal (HAWT, do inglês *horizontal axis wind turbin*). Essa denominação é utilizada pois seu eixo de rotação é paralelo ao solo. As turbinas de eixos horizontais possuem os seguintes subsistemas: rotor, trem de força, gerador, estrutura, torre, equipamentos de controle e sistema elétrico (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009). Esses sistemas estão representados na Figura 1.

O mercado de geração de energia eólica é composto principalmente por instalações de grande capacidade de produção (acima de 1 MW) que alimentam a rede de distribuição. No entanto, de acordo com o *Global Wind Energy Council* (2019), o desenvolvimento de soluções para pequenas demandas, como casas e galpões, é uma das principais alternativas para o contínuo crescimento das fontes de energia renováveis.

Figura 1 - Representação esquemática de uma turbina eólica



Fonte: Autoria própria

Apesar de serem constituídas basicamente dos mesmos subsistemas, as turbinas eólicas de pequena capacidade de geração são simplificadas e não possuem, por exemplo, o controle ativo do ângulo de arfagem da pá. Esse controle permite ajustar a posição das pás do rotor de acordo com a velocidade do vento elevando a eficiência aerodinâmica da turbina.

Os geradores de elevada capacidade de produção possuem sistemas que realizam esse controle de ângulo de ataque de maneira ativa, porém, não são possíveis de serem aplicados em turbinas menores por razão do custo e consumo de energia para seu funcionamento. Nesses casos, uma alternativa é realizar o controle de maneira passiva. Para isso, utilizam-se as propriedades inerentes do material de construção de pá, no caso, materiais compósitos (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009).

Materiais compósitos consistem em dois ou mais materiais combinados para atingir propriedades físicas que não se conseguiria com seus constituintes de maneira isolada (REDDY, 2004). São utilizados em estruturas onde é necessário aliar elevada resistência mecânica com baixo peso. Existem diversos tipos de materiais compósitos, por exemplo, os compósitos poliméricos, compósitos cerâmicos e compósitos

laminados. Em aplicações de materiais compósitos laminados, para alcançar uma solução estrutural confiável, há inúmeras variáveis que podem ser alteradas, tais como espessura e orientação das lâminas (GIBSON; ASHBY, 1988).

Os ângulos de orientação das fibras que constituem os compósitos laminados são determinantes na resistência mecânica da estrutura. Isso proporciona aos engenheiros mais liberdade no projeto e a oportunidade de explorar plenamente as propriedades do material (SABIDO et al., 2016). Entretanto, o entendimento do comportamento mecânico de estruturas de compósitos laminados apresenta elevada complexidade tanto no nível macroscópico como no nível microscópico (GIBSON; ASHBY, 1988).

Devido à complexidade e ao custo computacional envolvido na avaliação de projetos de estruturas compósitas laminadas, a sua otimização usualmente é feita utilizando metamodelos. Metamodelos são algoritmos que aproximam, com elevada fidelidade, um modelo detalhado que representa um fenômeno, podendo ser utilizados como substitutos a funções de alto custo computacional no processo de otimização em busca do projeto ideal (WANG; SHAN, 2007).

A construção de um metamodelo demanda o uso prévio de um projeto de experimentos (DoE). O projeto de experimentos é uma técnica que auxilia na determinação do valor das variáveis que serão utilizadas na construção do metamodelo (WANG; SHAN, 2007).

Assim, através da aplicação combinada das técnicas: simulação por elementos finitos, projeto de experimentos, metamodelos e otimização, é possível obter um maior rendimento e eficiência no projeto de estruturas laminadas. O resultado disso pode ser visto na otimização de estruturas aeronáuticas, estruturas automotivas e o estudo de caso deste trabalho, estruturas de pás de turbina eólica (JONES, 1999).

1.2 OBJETIVO E JUSTIFICATIVA

Esta dissertação tem como objetivo desenvolver, aplicar e avaliar uma metodologia de otimização de baixo custo computacional para elevar o coeficiente de potência de pás de turbinas eólicas compósitas. Essa metodologia faz uso de metamodelagem, mais especificamente funções de base radial (RBF).

O esforço computacional para projetar uma pá de turbina eólica de maneira convencional é bastante elevado, demandando tempo e recursos nem sempre disponíveis. Logo, o desenvolvimento de uma nova metodologia, mais barata e mais eficiente, torna o projeto desse componente acessível, colaborando com o aumento da utilização dessa fonte de energia limpa e sustentável.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos. O Capítulo 1 faz uma introdução do tema que é detalhado ao longo do trabalho, bem como o objetivo e a justificativa para o desenvolvimento do estudo. O Capítulo 2 apresenta revisões bibliográfica e conceitual sobre os principais temas tratados ao longo da dissertação, que são, pás de turbinas eólicas, materiais compósitos laminados, tensões e deformações em materiais laminados, otimização, otimização com metamodelos, DoE, metamodelos aplicados a estruturas compósitas laminadas, funções de base radial, refinamento sequencial de metamodelos e *aeroelastic tailoring*. O Capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos e a discussão frente a trabalhos relacionados. Por fim, o Capítulo 5 traz a conclusão e algumas propostas de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta o embasamento teórico utilizado ao longo desta pesquisa, assim como alguns trabalhos que utilizaram as técnicas aqui aplicadas e seus resultados.

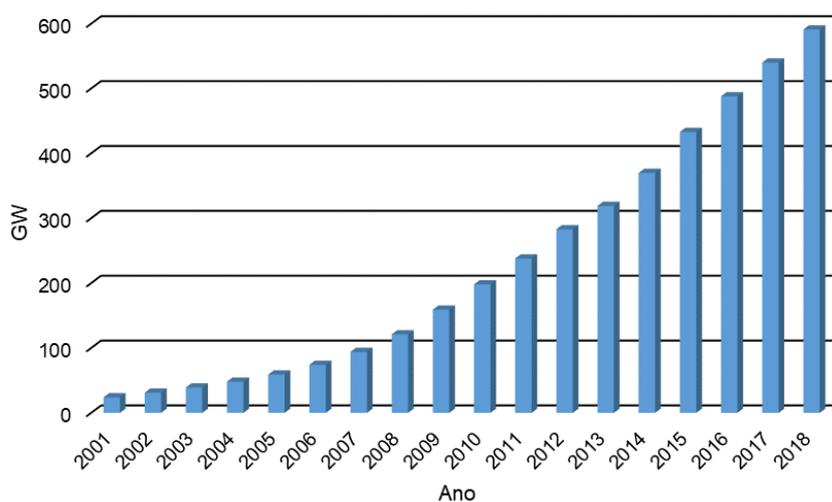
2.1 PÁS DE TURBINAS EÓLICAS

2.1.1 Energia Eólica

Devido às demandas econômicas e ambientais, a utilização de energia eólica vem crescendo substancialmente nos últimos anos. Somente em 2018, em todo o mundo, foram instalados 51,3 Gigawatts (GW) de potência dessa fonte de energia. Em alguns mercados, essa é uma das formas com menor custo de se gerar energia e a sua utilização ultrapassa outras fontes tradicionais, como os combustíveis fósseis.

Atualmente, mais de 90 países utilizam energia eólica na sua matriz energética, sendo que 30 desses possuem mais de 1000 Megawatts (MW) instalados e nove países possuem mais de 10.000 MW instalados. O Brasil ocupa lugar de destaque neste cenário, sendo o quinto país que mais aumentou sua capacidade de produção na modalidade *onshore* no ano de 2018 (GWEC, 2019). A Figura 2 mostra o aumento da capacidade instalada (GW) desse tipo de energia em todo o mundo nos últimos anos. Esse aumento ocorre principalmente devido ao baixo custo de geração de energia e às demandas por fontes de energia renováveis (GWEC, 2019).

Figura 2 - Capacidade instalada de geração de energia eólica no mundo

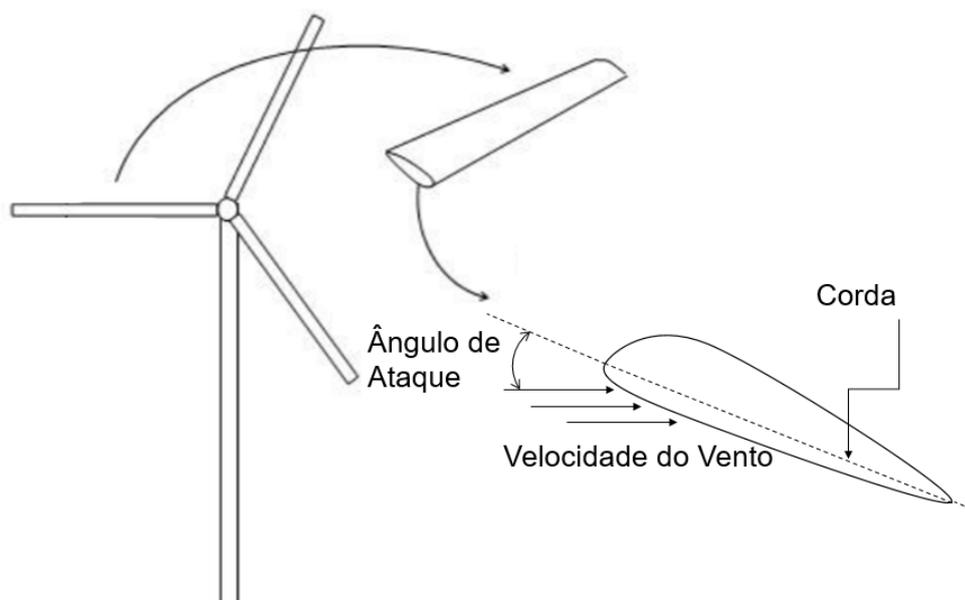


Fonte: Adaptado de Global Wind Energy Council (2019)

As turbinas eólicas são os equipamentos utilizados para transformar energia oriunda do vento em energia elétrica. O seu elemento principal é o rotor, o qual é responsável por converter a energia mecânica do movimento das pás em energia elétrica que alimentará a rede de distribuição. Dessa forma, quanto mais as pás da turbina conseguem aproveitar a energia cinética do vento, maior a geração de energia elétrica dessa turbina. Portanto, o melhor aproveitamento das cargas que atingem as pás do rotor pode gerar um aumento de eficiência das turbinas eólicas. Esse conceito é conhecido como adicionar inteligência às pás (BARLAS; KUIK, 2007).

É possível elevar a “inteligência” das pás de turbinas eólicas de duas maneiras: com controle passivo ou com controle ativo. O controle passivo ocorre quando variações na velocidade do vento são contrabalanceadas através da adaptação passiva da turbina, adaptando a resposta aeroelástica das pás. No controle ativo, as cargas são contrabalanceadas ajustando o ângulo de ataque da pá com o uso de atuadores instalados na turbina. O ângulo de ataque é definido como o ângulo formado pela corda do aerofólio e a direção do seu movimento relativo ao ar. A Figura 3 representa a relação do ângulo de ataque com o perfil da pá.

Figura 3 - Representação de ângulo de ataque



Fonte: Autoria própria

Ambos os métodos são utilizados, porém, o controle passivo ainda demanda bastante estudo para se atingir o melhor rendimento da turbina (BARLAS; KUIK, 2007).

O controle passivo é possível ser aplicado principalmente em turbinas de menor capacidade de geração de energia. Nessas turbinas, é inviável a utilização do controle ativo, dado que, a potência consumida por este tipo de controle representaria uma parcela significativa da energia produzida. Além disso, o controle ativo elevaria o custo total da turbina pela adição de sensores e atuadores de controle.

O mercado de produção de energia por pequenos geradores, segundo o relatório do GWEC (2019), é apontado como uma das diretrizes para o contínuo crescimento da utilização da energia eólica. São soluções que, além de alimentar a rede de energia (*on grid*), podem também atender pequenas demandas fora da rede (*off grid*), por exemplo, casas e galpões.

Essa é também uma das tendências do setor de energia como um todo, a descentralização da produção de energia, ou seja, a geração de energia em pequenas propriedades para o consumo próprio. As iniciativas de descentralização favorecem o desenvolvimento de micro usinas e mini geração de energia, sendo a mini geração definida por usinas até 1 MW (ANEEL, 2012).

2.1.2 Teoria do momento do elemento de pá (BEMT)

O trabalho de Manwell, Mcgowan e Rogers (2009) explica que a teoria do momento do elemento de pá (BEMT, do inglês *blade element momentum theory*) é uma junção de duas outras teorias: a teoria da conservação do momento e a teoria do elemento de pá.

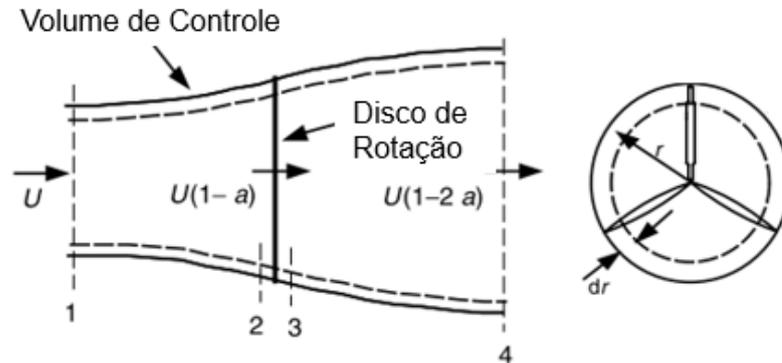
A teoria da conservação do momento refere-se à análise do volume de controle e das forças que atuam num rotor de turbina modelado como um disco atuador. Essa análise é baseada na conservação do momento linear e do momento angular. A teoria do elemento de pá divide a pá de turbina em diversas secções ou elementos de mesmo comprimento, em seguida são avaliadas as forças em uma das secções da pá. A junção dessas duas teorias permite relacionar a geometria da pá e a capacidade do rotor de extrair energia do vento.

2.1.2.1 Teoria da conservação do momento

O volume de controle definido na Figura 4 representa o escoamento em um rotor de turbina, representado na imagem pelo disco de rotação, tem-se, portanto, uma

velocidade inicial no ponto 1, a qual varia nos pontos 2, 3 e 4, sendo uma função do fator de indução axial (a).

Figura 4 - Volume de controle de um rotor



Fonte: Adaptado de Manwell, MCGowan e Rogers (2009)

Dessa forma, o diferencial de torque transmitido às pás é obtido aplicando o princípio de conservação do momento angular entre os pontos 2 e 3, e é dado por:

$$dQ = 4a'(1-a)\rho U\pi r^3 \Omega dr, \quad (1)$$

onde Ω é a velocidade angular da turbina, a' o fator de indução angular, U a velocidade do ar, a o fator de indução axial, ρ a densidade específica do ar e r o raio.

Aplicando o princípio de conservação do momento linear ao volume de controle, tem-se a equação que representa a contribuição diferencial da força normal em uma pá do rotor:

$$dF_N = \rho U^2 4a(1-a)\pi r dr. \quad (2)$$

O fator de indução axial é uma variável adimensional que pode ser interpretada como a medida de influência que o rotor exerce sobre o escoamento. Matematicamente, esse fator pode ser escrito como a relação entre a velocidade do vento logo após o rotor (U_d) e a velocidade do vento no escoamento não perturbado (U_∞):

$$a = \frac{U_{\infty} - U_d}{U_{\infty}}. \quad (3)$$

A magnitude do fator de indução pode variar no intervalo (0, 1). Na situação que

$$U_{\infty} = U_d, \quad (4)$$

a turbina não gera nenhuma alteração no escoamento, logo, a é nulo. Um total bloqueio do escoamento causado pela turbina implica em U_d nulo, logo, $a = 1$. Nessas duas situações não há geração de energia (ALMEIDA, 2013).

2.1.2.2 Teoria do elemento de pá

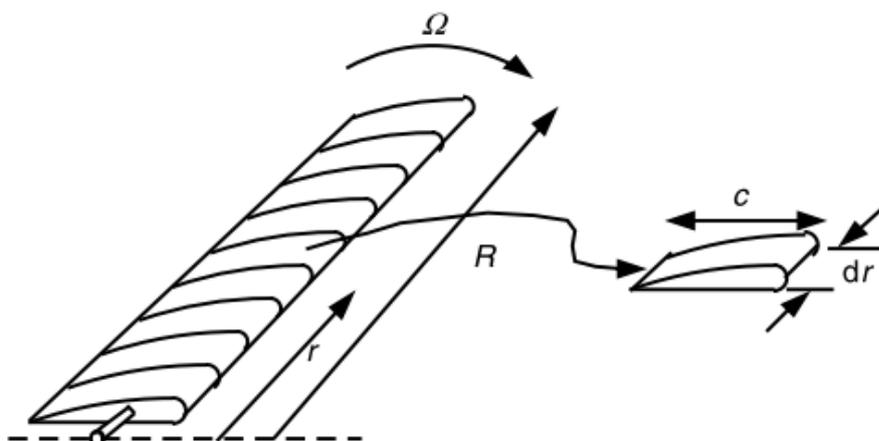
O trabalho de Manwell, Mcgowan e Rogers (2009) afirma que, de acordo com a teoria do elemento de pá, as forças nas pás de uma turbina eólica também podem ser expressas como uma função dos coeficientes de arrasto e sustentação da pá. Para isso, duas hipóteses são admitidas como verdadeiras:

- 1) Não há interação aerodinâmica entre os elementos;
- 2) As forças nas pás são determinadas única e exclusivamente pelos coeficientes de arrasto e sustentação.

Para esta análise, assume-se que a pá é dividida em N secções ou elementos, conforme representado na Figura 5.

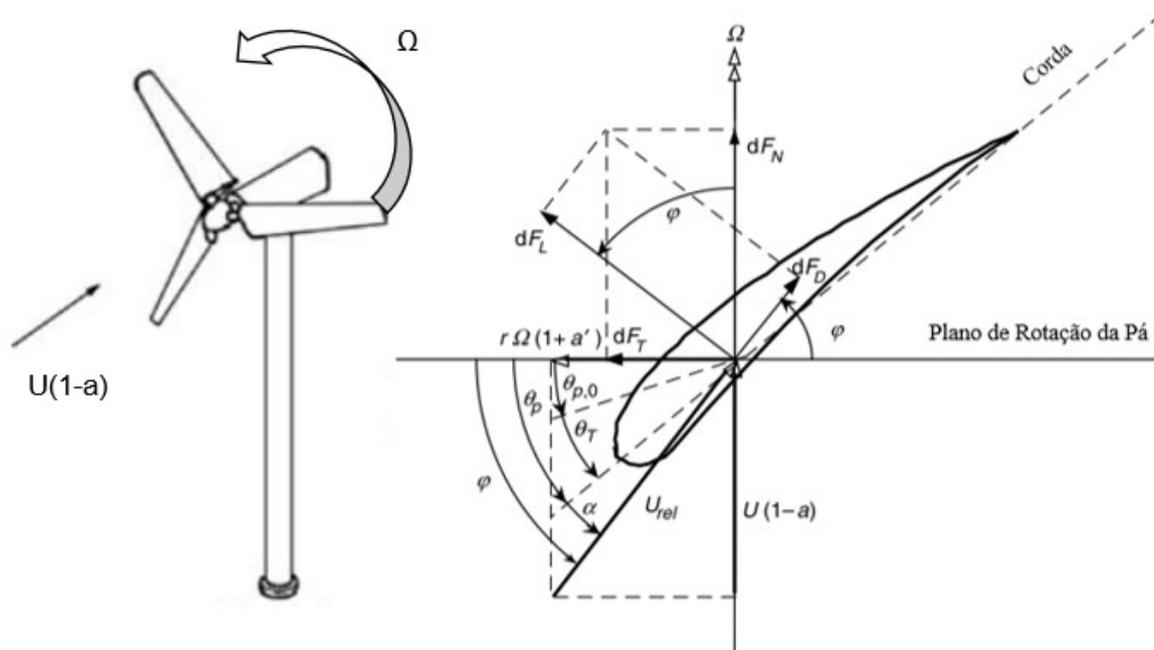
As relações entre as várias forças atuantes, ângulos e velocidades na pá de turbina são mostradas na Figura 6. Nesta figura, $U(1 - a)$ é a velocidade do vento nas pás, U_{rel} a velocidade relativa do vento, θ_p o ângulo de inclinação, $\varphi = (\theta_p + \alpha)$ o ângulo em relação ao vento, $\theta_{p,o}$ o ângulo de inclinação da pá, α o ângulo de ataque, θ_t o ângulo de torção da seção, dF_L o incremento da força de sustentação, dF_d o incremento da força de arrasto, dF_N o incremento da força normal e dF_t o incremento da força tangencial.

Figura 5 - Representação esquemática de uma pá dividida em N elementos



Fonte: Manwell, MCGowan e Rogers (2009)

Figura 6 - Geometria da pá de uma turbina eólica de eixo horizontal



Fonte: Adaptado de Manwell, MCGowan e Rogers (2009)

Da Figura 6 pode-se retirar a relação:

$$U_{rel} = U(1 - a)/\text{sen}\varphi, \quad (5)$$

a qual é utilizada no cálculo do incremento da força de sustentação (dF_L), dado por:

$$dF_L = \frac{1}{2} C_l \rho U_{rel}^2 c dr, \quad (6)$$

onde C_l representa o coeficiente de sustentação e c o comprimento de corda. Já o diferencial de força de arrasto (dF_d) é representado por:

$$dF_d = \frac{1}{2} C_d \rho U_{rel}^2 c dr, \quad (7)$$

onde C_d representa o coeficiente de arrasto da pá.

Assim, da Figura 6 é possível obter o valor de incremento de força normal em uma pá através da relação:

$$dF_N = dF_l \cos\varphi + dF_d \sin\varphi. \quad (8)$$

Caso o rotor tenha B pás, a força normal total na seção a uma distância, r , do centro pode ser calculada por:

$$dF_N = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_l \cos\varphi + C_d \sin\varphi) c dr. \quad (9)$$

O diferencial de torque na turbina é obtido através do incremento de força tangencial operando a uma distância r , sendo obtido através de:

$$dQ = Br dF_t, \quad (10)$$

onde dF_t pode ser calculado através das relações representadas na Figura 6:

$$dF_t = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_l \cos\varphi - C_d \sin\varphi) c dr, \quad (11)$$

unindo as Equações (10) e (11) têm-se a relação que representa o diferencial de torque com base na Teoria do Elemento de pá:

$$dQ = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_l \cos \varphi - C_d \sin \varphi) c r dr. \quad (12)$$

Substituindo a Equação (5) nas Equações (9) e (12), pode-se reescrevê-las como:

$$dF_N = \sigma' \pi \rho \frac{U^2 (1-a)^2}{\sin^2 \varphi} (C_l \cos \varphi - C_d \sin \varphi) r dr, \quad (13)$$

$$dQ = \sigma' \pi \rho \frac{U^2 (1-a)^2}{\sin^2 \varphi} (C_l \cos \varphi + C_d \sin \varphi) r^2 dr, \quad (14)$$

onde a solidez σ' da corda é definida por:

$$\sigma' = \frac{Bc}{2\pi r}. \quad (15)$$

2.1.2.3 União das teorias e o BEMT

Unindo então a teoria da conservação do momento e a teoria do elemento de pá, pode-se obter as variáveis para o cálculo da força normal e torque na turbina.

No cálculo dos fatores de indução a e a' , admite-se que C_d é nulo. Assim, quando as equações de torque das duas teorias (Equações (1) e (14)) são igualadas, obtém-se:

$$\frac{a'}{(1-a)} = \frac{\sigma' C_l}{4\lambda_r \sin \varphi}, \quad (16)$$

onde λ_r é a relação entre a velocidade do vento e a velocidade do rotor.

Ao igualar-se as equações de força normal das duas teorias (Equações (2) e (13)) obtém-se:

$$\frac{a}{(1-a)} = \frac{\sigma' C_l \cos \varphi}{4 \sin^2 \varphi} \quad (17)$$

Com base na Figura 6, pode-se obter a relação:

$$\tan\varphi = \frac{U(1-a)}{\Omega r(1+a')} = \frac{1-a}{(1+a')\lambda_r} \quad (18)$$

Unindo-se as Equações (16), (17) e (18) e fazendo as devidas manipulações algébricas, obtêm-se:

$$C_l = 4\text{sen}\varphi \frac{\cos\varphi - \lambda_r \text{sen}\varphi}{\sigma'(\text{sen}\varphi + \lambda_r \cos\varphi)} \quad (19)$$

e

$$\frac{a'}{(1+a')} = \frac{\sigma' C_l}{4\cos\varphi} \quad (20)$$

Outras relações úteis que podem ser encontradas através das Equações (16), (17) e (18), são:

$$\frac{a}{a'} = \frac{\lambda_r}{\tan\varphi} \quad (21)$$

$$a = \frac{1}{\frac{1 + 4\text{sen}^2\varphi}{\sigma' C_l \cos\varphi}} \quad (22)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4\cos\varphi}{\sigma' C_l} - 1} \quad (23)$$

Um método iterativo pode ser utilizado para se encontrar os fatores de indução a e a' , conforme os passos descritos:

- 1) Admite-se um valor inicial para a e a' ;
- 2) Calcula-se o ângulo relativo ao vento utilizando a Equação (18);
- 3) Calcula-se o ângulo de ataque utilizando $\varphi = \theta_p + \alpha$ e após isto C_l e C_d ;
- 4) Atualiza-se o valor de a e a' com as Equações (16), (17), (22) e (23).

O processo é repetido até que os novos fatores de indução calculados apresentem uma diferença considerada aceitável em relação ao último calculado.

Tendo-se os valores do fator de indução, é possível calcular o fator de potência. Utilizando esses fatores e a Equação (14), é possível calcular a potência através da expressão:

$$P = \int_r^R \Omega dQ \quad (24)$$

A potência disponível no escoamento é dada por:

$$P_{esc} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 U^3 \quad (25)$$

Por fim, o coeficiente de potência é calculado pela equação:

$$C_p = \frac{P}{P_{esc}} \quad (26)$$

O coeficiente de potência possui um limite teórico, conhecido como "Limite de Betz", o qual é definido pela teoria do momento como a fração 16/27, ou seja, aproximadamente 0,593 (ALMEIDA, 2013).

2.2 MATERIAIS COMPÓSITOS LAMINADOS

2.2.1 Conceitos Gerais

Materiais compósitos são dois ou mais materiais que se combinam em uma escala macroscópica para formar um outro material. Esse novo material pode ter diversas propriedades mecânicas melhores que os dois materiais isolados, por exemplo, resistência à fadiga, resistência à corrosão entre outros (JONES, 1999).

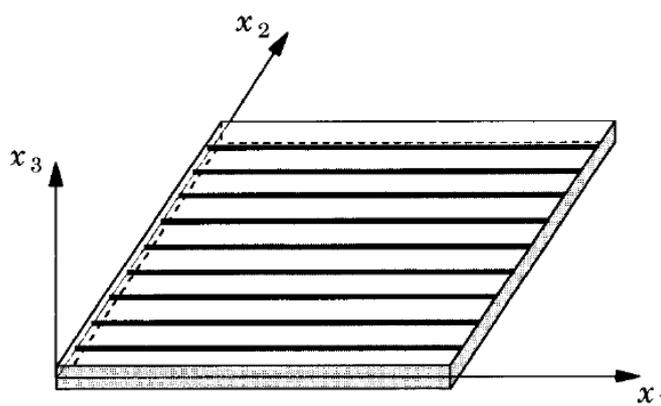
Dentro dos materiais compósitos existe uma classe especial, os compósitos laminados com fibras. Esses contemplam as qualidades dos materiais fibrosos, como também dos materiais laminados. Nesses materiais, as camadas, geralmente constituídas de uma matriz polimérica reforçada com fibras orientadas em uma dada direção, são coladas uma sobre a outra, com diferentes orientações, para gerar resistência mecânica e rigidez em diferentes sentidos. Logo, o compósito laminado de

fibra pode ser projetado para requisitos de projeto estruturais bastante específicos. Alguns exemplos de aplicação são: asas de avião, raquetes de tênis, cascos de barcos, entre outros (JONES, 1999).

Para atingir a melhor configuração possível, muitas vezes é recomendado que se recorra a técnicas de otimização. A função objetivo a ser otimizada deve ser relacionada a alguma propriedade mecânica do material, por exemplo resistência à torção ou rigidez (NIK et al., 2014).

De forma a analisar as propriedades mecânicas do laminado, é necessário definir alguns conceitos da mecânica dos materiais compósitos. A Figura 7 apresenta os eixos principais em uma lâmina de material compósito reforçado com fibras, sendo o eixo x_1 na direção longitudinal da fibra, o eixo x_2 transversal à fibra mas no plano da lâmina, e o eixo x_3 perpendicular à lâmina.

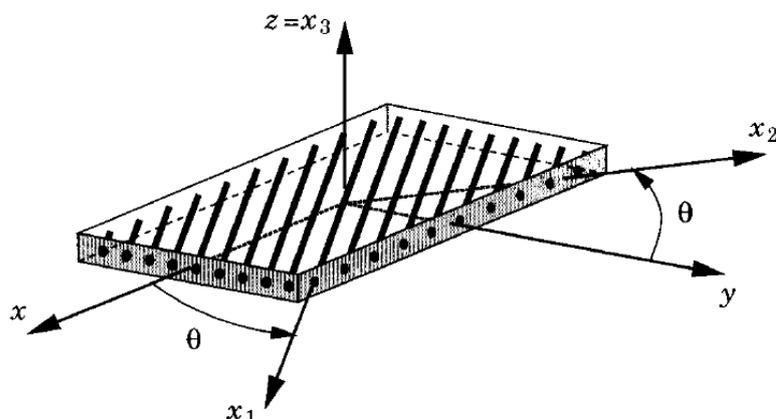
Figura 7 - Eixos principais de uma lâmina unidirecional de material compósito



Fonte: Reddy (2004)

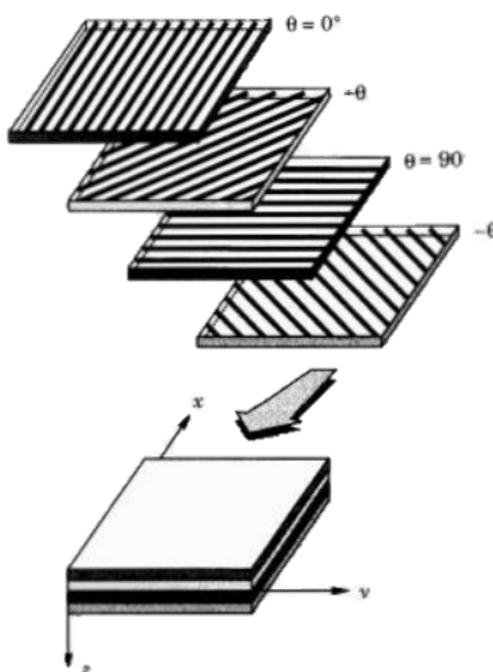
De forma a obter as propriedades desejadas no sentido de carregamento, pode se adotar no laminado (conjunto de lâminas) um sistema de referência diferente do sistema da lâmina. O ângulo de laminação θ é definido como o ângulo de rotação entre o sistema da lâmina rotacionada $[x_1 \ x_2 \ x_3]$ e o sistema de referência $[x \ y \ z]$. A Figura 8 exemplifica esse caso. Reddy (2004) demonstra um laminado com diferentes orientações em cada camada na Figura 9.

Figura 8 - Definição do ângulo de laminação em relação aos eixos de referência



Fonte: Reddy (2004)

Figura 9 - Laminado composto por camadas com diferentes orientações



Fonte: Reddy (2004)

As diferentes orientações possíveis de utilização em projetos laminados leva à necessidade de se definir o conceito de isotropia. Possuem a característica de isotropia os materiais cujas propriedades são as mesmas, independente do plano ou eixo avaliado. Os materiais compósitos são majoritariamente anisotrópicos, ou seja, as propriedades variam em relação aos eixos de referência.

2.2.2 Tensões e Deformações em Laminados

A obtenção dos campos de tensões e deformações dos materiais laminados passa pelo conhecimento da teoria clássica dos materiais laminados. Através dessa teoria e de suas simplificações é possível ir do cálculo de tensões em uma lâmina para o cálculo de tensões em uma estrutura laminada. Jones (1999) apresenta essas simplificações:

- a) Cada lâmina é considerada ortotrópica¹, possui espessura constante e comportamento linear elástico;
- b) O laminado é considerado fino, ou seja, sua espessura é pequena comparada ao seu comprimento e sua largura;
- c) Adota-se o estado plano de tensões. Desse modo, somente as tensões que atuam no plano $x - y$ (plano da lâmina) são consideradas na análise. Portanto, as tensões σ_x , σ_y e τ_{xy} são consideradas não nulas, enquanto σ_z , τ_{xz} e τ_{yz} são nulas;
- d) Uma linha normal à superfície média do laminado indeformado permanece reta e perpendicular à superfície média após a deformação. Desse modo, a deformação normal (ε_z) é nula, bem como as deformações cisalhantes transversais (γ_{xz} e γ_{yz});
- e) O efeito das forças de campo é desprezado.

As relações tensão-deformação em um eixo de coordenadas qualquer de uma lâmina podem ser escritas como:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (27)$$

sendo σ_x e σ_y as tensões normais nas direções x e y , ε_x e ε_y as deformações longitudinais nas direções x e y , τ_{xy} a tensão cisalhante e γ_{xy} a deformação cisalhante. Os termos \overline{Q}_{ij} da matriz de rigidez são definidos pelas constantes de engenharia de acordo com as Equações (60) e (61) do Apêndice A (JONES, 1999).

¹ Material cujas propriedades mecânicas são únicas e independentes nas três direções perpendiculares em que são observadas (Jones, 1999)

A Equação (27) pode ser utilizada para representar a relação tensão-deformação da k -ésima camada de um laminado, podendo ser escrita, de forma compacta, como:

$$\boldsymbol{\sigma}_k = \bar{\mathbf{Q}}_k \boldsymbol{\varepsilon}_k. \quad (28)$$

A deformação $\boldsymbol{\varepsilon}_k$ da k -ésima lâmina é escrita em função das deformações médias $(\varepsilon_x^0, \varepsilon_y^0, \gamma_{xy}^0)$, das curvaturas da superfície média $(\kappa_x, \kappa_y, \kappa_{xy})$ e de sua distância z em relação ao plano médio do laminado:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix}. \quad (29)$$

Assim, as forças resultantes por unidade de comprimento e os momentos atuando no laminado são obtidos através da integração da tensão em cada lâmina através de todo laminado:

$$N_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x d_z \quad (30)$$

$$N_y = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_y d_z \quad (31)$$

$$N_{xy} = \int_{-t/2}^{t/2} \tau_{xy} d_z \quad (32)$$

$$M_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x z d_z \quad (33)$$

$$M_y = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_y z d_z \quad (34)$$

$$M_{xy} = \int_{-t/2}^{t/2} \tau_{xy} z d_z. \quad (35)$$

O termo N representa os esforços de membrana (forças resultantes), M os momentos resultantes atuantes nos planos x e y e t a espessura do laminado. Finalmente, através das Equações (28) a (35) obtêm-se a relação constitutiva:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \\ \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (36)$$

a qual poder ser escrita na forma compacta como:

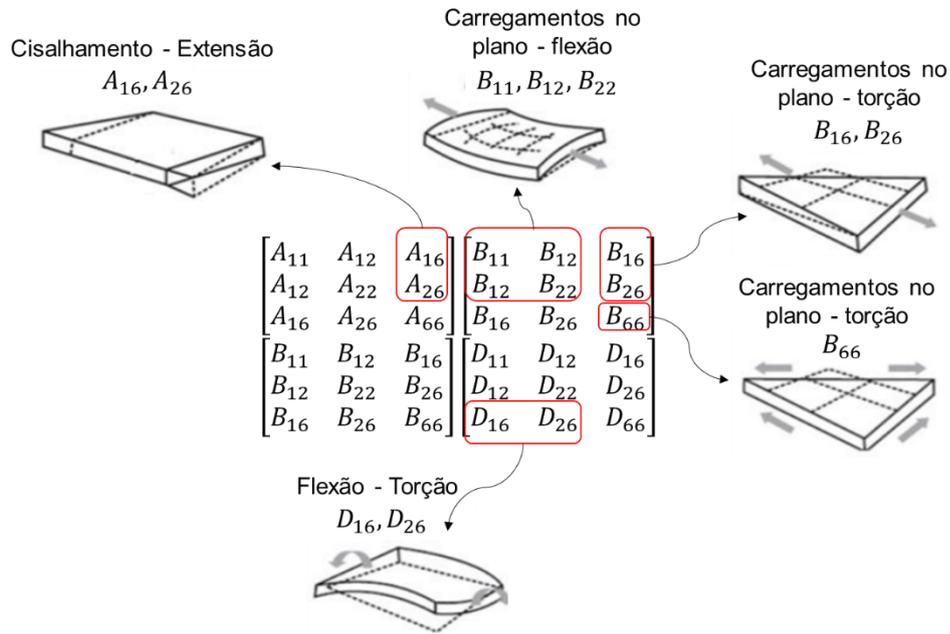
$$\begin{Bmatrix} \mathbf{N} \\ \mathbf{M} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon} \\ \boldsymbol{\kappa} \end{Bmatrix}. \quad (37)$$

As expressões dos termos A_{ij} , B_{ij} e D_{ij} estão descritos nas Equações (62), (63) e (64) do Apêndice A.

As submatrizes \mathbf{A} , \mathbf{B} e \mathbf{D} formam a matriz de rigidez de um laminado. Conforme descrito, a matriz \mathbf{ABD} depende das propriedades elásticas das lâminas e de suas espessuras, da sequência de empilhamento (ordem e orientação das lâminas) e do número de lâminas. Cada termo da matriz representa um modo de deformação do laminado, sendo que os diferentes termos de acoplamento estão representados na Figura 10.

Para materiais isotrópicos, os termos A_{i6} , B_{ij} e D_{i6} são nulos, logo, tem-se somente os termos de acoplamento de deformação–deformação (A_{11} , A_{22} , A_{12} , A_{66} , D_{11} , D_{22} , D_{12} , D_{66}). No caso dos materiais anisotrópicos, os termos de acoplamento que relacionam tensão e deformação não são nulos, esta é a característica que garante propriedades interessantes para esses materiais. Para atender requisitos de projeto, se trabalha nos valores dos termos de acoplamento tensão–deformação até obter a resposta desejada. É exatamente esse acoplamento entre tensões e deformações que é explorado no presente trabalho, especificamente os termos de acoplamento flexo-torção (D_{16} e D_{26}).

Figura 10 - Termos de acoplamento da matriz de rigidez ABD



Fonte: Autoria própria

2.3 OTIMIZAÇÃO

De acordo com Arora (2012), um problema de otimização é definido como a determinação de um ponto (o que caracteriza uma dada configuração do sistema em análise) que minimiza uma função que está sujeita a restrições de igualdade e/ou restrições de desigualdade. Em notação matemática, o problema de otimização é definido em uma forma padrão como:

$$\begin{aligned} &\text{Minimizar } f(\mathbf{x}) \\ &\text{Sujeito a } h_j(\mathbf{x}) = 0; j = 1 \text{ a } p \\ &\quad g_i(\mathbf{x}) \leq 0; i = 1 \text{ a } m \end{aligned} \tag{38}$$

sendo \mathbf{x} o vetor das variáveis de projeto (os parâmetros que podem ser alterados durante o processo de otimização), f a função objetivo, h_j as restrições de igualdade, p a quantidade de restrições de igualdade, g_i as restrições de desigualdade e m a quantidade de restrições de desigualdade.

Analisando a otimização do ponto de vista estrutural, Gallagher (1973) define otimização estrutural como a seleção das variáveis de projeto que fornecem o ponto ótimo da função objetivo para o carregamento especificado ou as condições de

contorno dentro das restrições: comportamento estrutural, geometria entre outros fatores.

Em muitas situações, uma das tarefas mais difíceis no projeto de estruturas é a construção do modelo matemático que represente o problema físico, assim como, a definição das restrições (LANZI; GIAVIOTTO, 2006).

2.4 OTIMIZAÇÃO COM METAMODELOS

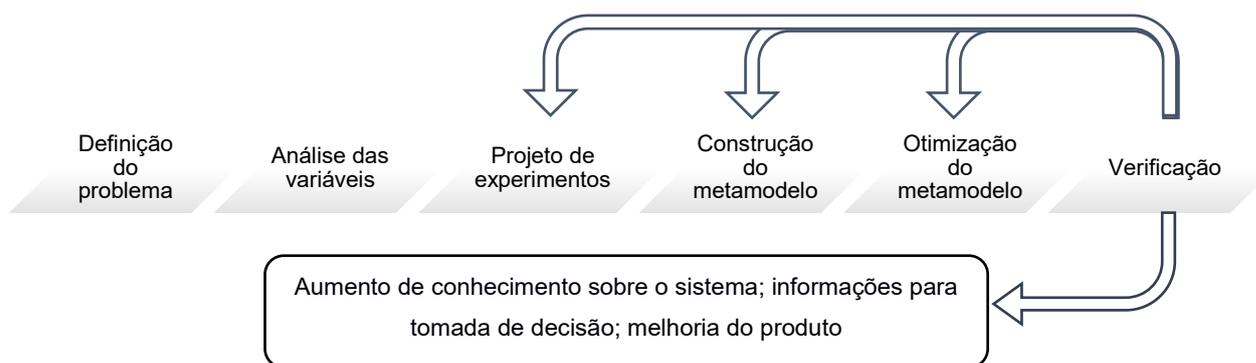
Em algumas situações, a função a ser otimizada apresenta elevada complexidade ou um tempo de avaliação elevado. Nesses casos, a otimização pode tornar-se inviável, tanto por recursos computacionais como por tempo. Uma forma de contornar esse problema é a utilização de um metamodelo para substituir a função original. Um metamodelo gera uma função aproximada, com resultado próximo à função ou modelo original, mas com tempo de avaliação muito menor. A relação entre função original, metamodelo e o erro de aproximação pode ser dada por:

$$f(\mathbf{x}) = \hat{f}(\mathbf{x}) + \delta(\mathbf{x}) \quad (39)$$

onde $f(\mathbf{x})$ representa a resposta da função ou modelo original para determinado ponto \mathbf{x} no espaço de projeto, $\hat{f}(\mathbf{x})$ a resposta do metamodelo e $\delta(\mathbf{x})$ o erro da aproximação (RODRIGUES, 2019).

De acordo com Wang e Shan (2007), o processo de otimização utilizando metamodelo para representar um fenômeno físico pode ser resumido conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - Fluxograma para se trabalhar com otimização de metamodelos



Fonte: Autoria própria

Portanto, para a construção e otimização do metamodelo são necessárias seis etapas:

- 1) Definição do Problema: Nesta etapa são definidas a função objetivo, as restrições e as variáveis de projeto;
- 2) Análise das Variáveis: Análise preliminar das variáveis de projeto mais importantes;
- 3) Projeto de Experimentos (DoE): Definição do projeto de experimentos a ser utilizado, além das primeiras análises para geração do banco de dados que alimentará a construção do metamodelo;
- 4) Construção do Metamodelo: O modelo aproximado é construído a partir dos pontos gerados na etapa 3. Existem diversas opções de metamodelos que podem ser adotados dependendo do problema e precisão desejada. Como exemplos: RBF, Kriging (KRG), regressões polinomiais, redes neurais, máquinas de vetores de suporte;
- 5) Otimização do problema com o Metamodelo: É realizada a otimização do problema utilizando o metamodelo construído para se obter o ponto de ótimo;
- 6) Verificação: Após a obtenção do ponto de ótimo via otimização do metamodelo, o mesmo é verificado através da função original. Na sequência os valores de resposta obtidos pelo metamodelo e pela função original são comparados. Caso a diferença entre as respostas seja maior do que um valor admissível, é feito o refinamento do metamodelo com o novo ponto gerado e retorna-se à etapa 4.

2.5 PROJETO DE EXPERIMENTOS (DoE)

Gerar amostras de dados através de um projeto de experimentos (DoE, do inglês, *design of experiments*) é o primeiro passo na construção de um metamodelo. A seleção dos pontos amostrais e o número de pontos tem efeito significativo na acuracidade do metamodelo (NIK et al., 2014). O modelo traz melhores resultados nas regiões próximas aos pontos de amostragem e, portanto, é importante distribuir de maneira uniforme os pontos ao longo do espaço de projeto.

O objetivo da seleção dos pontos amostrais é obter o máximo de informação possível utilizando um número limitado de experimentos. O DoE foca em planejar os

experimentos para que o erro oriundo dos mesmos tenha uma influência mínima na aprovação ou reprovação das hipóteses. Existem algumas metodologias que auxiliam na definição dos pontos do DoE, que são: o projeto de experimentos fatoriais e o hipercubo latino (LHS, do inglês *latin hypercube sampling*) (RYBERG; BÄCKRYD; NILSSON, 2012).

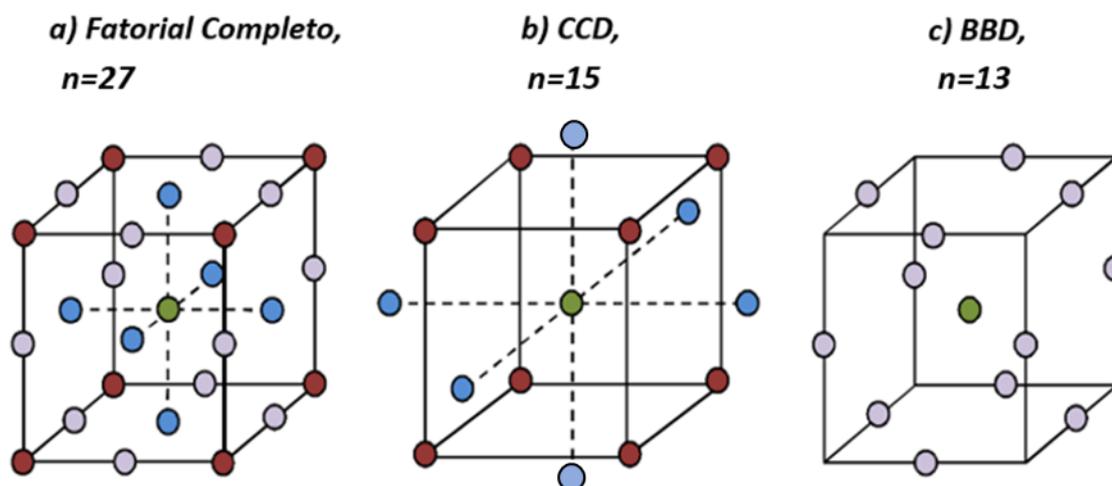
O projeto de experimentos fatoriais é uma matriz de pontos l^q , onde l é número de níveis em uma dimensão e q é o número de variáveis, também chamada de fatores. A quantidade de pontos aumenta exponencialmente com o número de fatores e, portanto, experimentos fatoriais fracionados (l^{q-s}) são muito utilizados quando muitos fatores são necessários, sendo s a quantidade de pontos de amostra independentes. A redução do número de pontos pode não considerar alguns efeitos e interações, portanto é importante escolher os experimentos que permitam uma estimativa independente dos principais efeitos e interações que são importantes (MYERS; MONTGOMERY; ANDERSSON, 2008).

Para a construção de um modelo linear, dois níveis de cada variável são necessários. No caso de um polinômio de segunda ordem, um mínimo de três níveis é necessário para cada variável. Logo, um projeto de 3^q ou 3^{q-s} pontos poderia ser utilizado, porém para se atingir uma boa precisão, usualmente é necessário adicionar muitos outros pontos de análise.

Para reduzir o número de experimentos necessários podem ser adotadas algumas estratégias, como por exemplo, o planejamento composto central (CCD). O CCD é um projeto fatorial de dois níveis (2^q ou 2^{q-s}), incrementado por experimentos centrais e experimentos axiais (Figura 12). A distância entre o centro para os pontos axiais, e o número de experimentos centrais é selecionado para obter diferentes propriedades do projeto.

Outra estratégia é o *box-behnken design* (BBD), essa técnica é caracterizada por planejamento de experimentos com 3 níveis de fatores e eficiente para construção de superfícies de resposta de segunda ordem. O BBD, diferentemente do CCD, não possui pontos nos vértices, sendo assim, recomendado para aplicações onde há restrições que impedem a utilização de pontos de vértice (MYERS; MONTGOMERY; ANDERSSON, 2008).

Figura 12 - Projetos de experimentos de três variáveis para construção de modelos de segunda ordem



Fonte: Adaptado de Ryberg; Bäckryd; Nilsson, (2012)

Nota: n = Número de amostras

O projeto de experimentos fatoriais tem o foco em reduzir o efeito de ruídos em experimentos físicos. Esse método também tende a espalhar os pontos de experimento para próximo aos limites do problema analisado e, assim, somente alguns pontos dentro do espaço estudado são analisados. Em experimentos computacionais, devido à boa repetibilidade, o problema de ruídos de medição não ocorre e, portanto, não é necessário repetir experimentos para um mesmo conjunto de pontos.

Muitas vezes, diversas variáveis de projeto são estudadas e um metamodelo complexo deve ser construído com base nestas variáveis. Nesses casos, recomenda-se que o projeto de experimentos inclua também pontos no interior do domínio. Isso é importante quando o metamodelo é complexo e desconhecido. Esse tipo de abordagem é bastante utilizada em metamodelos não paramétricos como redes neurais artificiais e Kriging (RYBERG; BÄCKRYD; NILSSON, 2012).

Um dos primeiros projetos de experimentos desenvolvidos que foca no preenchimento dos pontos internos (*space-filling*) foi o LHS, introduzido por McKay, Bechman e Conover (1979). De acordo com o estudo desses autores, no LHS, cada variável de entrada q é dividida em n intervalos não sobrepostos de igual probabilidade, sendo n a quantidade de amostras que deseja obter. Um valor dentro de cada intervalo é selecionado de maneira aleatória. Os n valores da primeira variável são emparelhados com n valores da segunda variável. Estes n pares são

combinados aleatoriamente com os n valores da terceira variável, para formar n triplas, e assim por diante, até que se formem n q -triplas. Isto resulta em uma matriz de amostras $n \times q$; onde as colunas q descrevem os níveis de cada variável e as n linhas descrevem as propriedades das variáveis de projeto (MYERS; MONTGOMERY; ANDERSSON, 2008).

Matematicamente, as amostras podem ser geradas a partir da matriz \mathbf{X} composta dos seguintes elementos:

$$X_{ij} = \frac{\pi_j(i) - U_{ij}}{n} \quad 1 \leq i \leq n \quad 1 \leq j \leq q \quad (40)$$

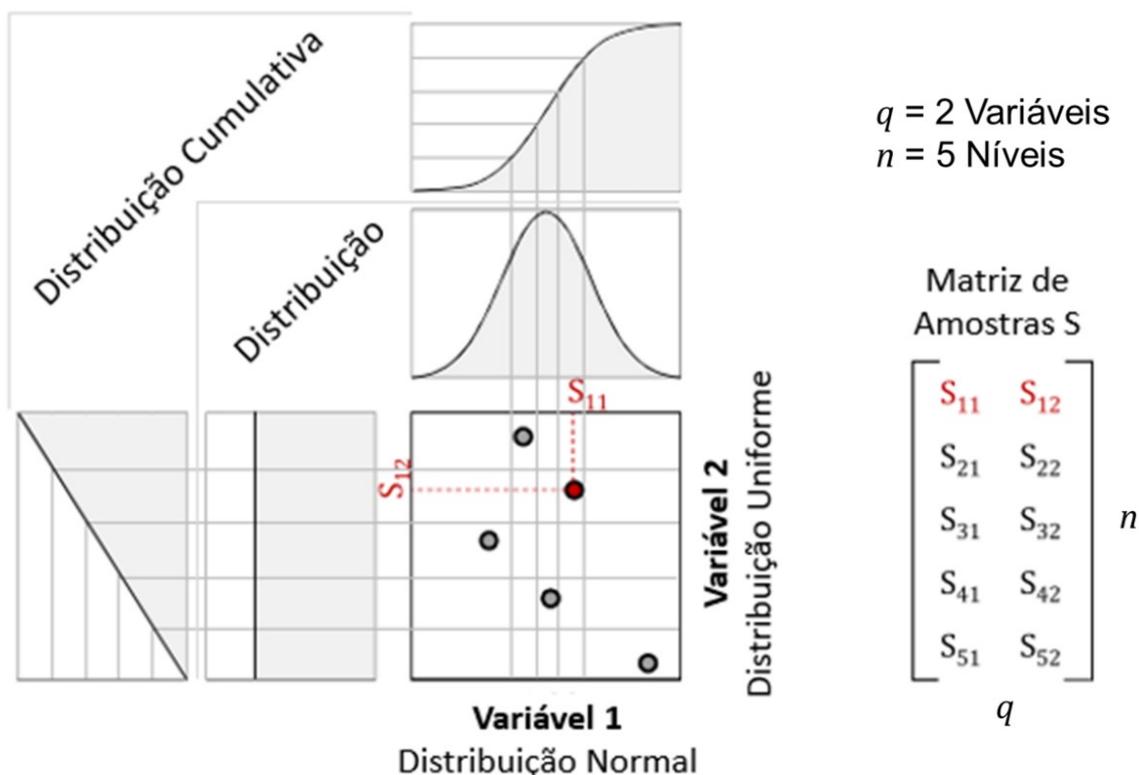
onde $\pi_j(1), \dots, \pi_j(n)$ são permutações aleatórias uniformes independentes dos inteiros de 1 a n , e U_{ij} são variáveis uniformemente distribuídas de maneira aleatória entre 0 e 1, independentemente do valor de π_j .

Cada elemento de X_{ij} é mapeado de acordo com sua distribuição para obter as amostras finais S_{ij} conforme:

$$S_{ij} = F_{x_j}^{-1}(X_{ij}) \quad (41)$$

onde $F_{x_j}^{-1}$ representa o inverso da função de distribuição acumulada para a variável j (RYBERG; BÄCKRYD; NILSSON, 2012). A Figura 13 apresenta um exemplo de LHS para duas variáveis com até cinco níveis, uma com distribuição normal e outra com distribuição uniforme.

Figura 13 - Exemplo de LHS para duas variáveis com até cinco níveis, uma com distribuição normal e outra com distribuição uniforme.



Fonte: Adaptado de Ryberg; Bäckryd; Nilsson (2012)

2.6 METAMODELOS E APLICAÇÕES A ESTRUTURAS LAMINADAS

Alguns modelos computacionais apresentam elevada complexidade, demandando para sua avaliação, tempo e recursos nem sempre disponíveis. Dessa forma, a aplicação mais comum dos metamodelos é atuar como substituto ao modelo complexo e possibilitar a obtenção de uma grande quantidade de resultados rapidamente.

Sendo assim, a ideia central do metamodelo é funcionar como uma “curva” construída através de um banco de dados e que pode prever, sem recorrer ao modelo que a gerou, os resultados da sua simulação de origem. Isso é baseado no fato de que, uma vez construído, o metamodelo poderá gerar resultados com uma boa precisão mesmo em pontos distantes do banco de dados de origem. Logo, pode-se concluir que há dois requisitos básicos na metamodelagem:

- 1) Ganho considerável de tempo na obtenção de resultados;
- 2) Precisão de resultados com erro admissível.

Destaca-se que os dois requisitos estão em constante conflito, portanto é necessário encontrar um equilíbrio entre ambos (FORRESTER; SÓBESTER; KEANE, 2008).

Sendo os metamodelos consideravelmente baratos e simples de avaliar, podem ser utilizados para a substituição de modelos detalhados de elementos finitos, obtendo acuracidade de resultados similar, mas de maneira muito mais rápida (NIK et al., 2014). O tipo de metamodelo pode variar dependendo do objetivo do usuário ou do tipo de modelo complexo que deve capturar. Diferentes bancos de dados são apropriados para construir diferentes metamodelos (RYBERG; BÄCKRYD; NILSSON, 2012).

De acordo com Ryberg, Bäckryd e Nilsson (2012), há algumas desvantagens em utilizar metamodelos para solução de problemas complexos. Uma delas é a introdução de uma fonte adicional de erros. O metamodelo é uma aproximação de modelos de simulação e, para ser útil, precisa ter uma boa precisão. Em geral, quanto mais avaliações oriundas do modelo de simulação detalhada disponíveis, ou seja, quanto maior o banco de dados de origem, mais preciso será o metamodelo. Porém, o tempo para gerá-lo aumenta consideravelmente em função do número de pontos do banco de dados.

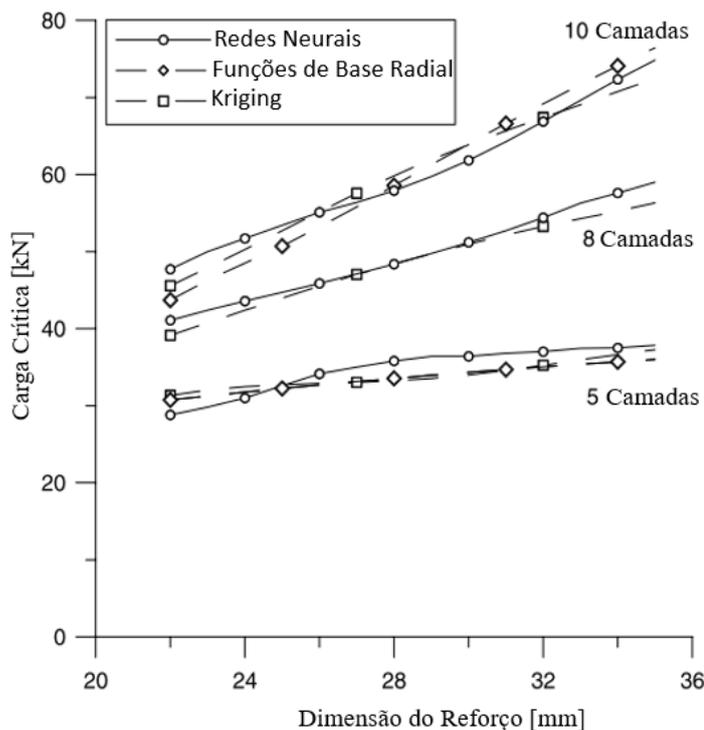
Dentre as aplicações de metamodelos, a literatura apresenta diversos casos de sucesso na otimização de estruturas compósitas de lâminas com fibras retas. Alguns metamodelos utilizados são: RBF, polinômios de segunda ordem e redes neurais artificiais. Todos esses métodos mostraram ser efetivos na redução do tempo para encontrar a máxima carga de flambagem de um painel de placas laminadas (IRISARRI et al., 2011; RIKARDS et al., 2006; BISAGNI e LANZI, 2002).

O trabalho de Lanzi e Giaviotto (2006) faz uma comparação dos métodos KRG, RBF e redes neurais para uma placa submetida a carga compressiva. O objetivo é encontrar a estrutura com menor peso e maior resistência à flambagem. As variáveis de entrada do problema são o número de reforços da estrutura e suas dimensões. Em particular, o número de reforços varia de 3 a 6, enquanto lâminas e flanges são assumidos para terem o mesmo comprimento, e podiam assumir valores de 22 a 35 mm.

A Figura 14 mostra a carga crítica de flambagem *versus* a dimensão da placa, parametrizada em relação ao número de camadas. Os painéis são considerados com

cinco reforços e a sequência de empilhamento: [0 / 45 / 45 / 0]. Nota-se que os resultados são muito próximos, independente do metamodelo utilizado.

Figura 14 - Carga crítica de flambagem *versus* dimensão do reforço para diferentes números de camadas e diferentes metamodelos

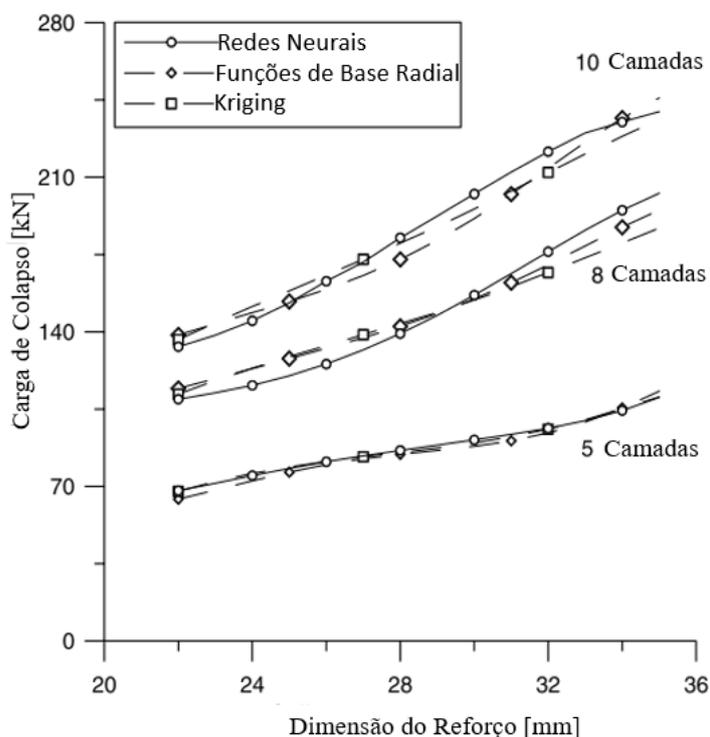


Fonte: Adaptado de Lanzi e Giaviotto (2006)

O estudo de Lanzi e Giaviotto (2006) também realiza a mesma análise para a carga de colapso da estrutura. A Figura 15 mostra os resultados obtidos pelos autores, da carga de colapso *versus* a dimensão do reforço, sendo o reforço parametrizado em relação ao número de camadas.

Os resultados apresentados na Figura 14 e Figura 15 mostraram-se muito próximos independente do metamodelo utilizado, a convergência de resultados entre os diferentes metamodelos eleva o grau de confiança na aplicação desse conceito para representação de compósitos laminados.

Figura 15 - Carga de Colapso versus dimensão do reforço para diferentes números de camadas e diferentes metamodelos



Fonte: Adaptado de Lanzi e Giaviotto (2006)

Além de estudos em estruturas compósitas de lâminas retas, o estudo de Nik e colaboradores (2014) realiza uma comparação dos seguintes metamodelos: Regressão Polinomial, RBF, KRG e Máquina de Vetores de Suporte aplicados na otimização de compósitos de rigidez variável. São examinados três tipos de carregamentos: carga de flambagem, rigidez no plano de um compósito de rigidez variável submetido a uma compressão uniforme e um cilindro de compósito de rigidez variável submetido a flexão pura. Os critérios avaliados em cada metamodelo são precisão, robustez e aptidão.

A conclusão de Nik e colaboradores (2014) é que KRG e RBF apresentam melhor precisão em comparação com os demais metamodelos. O estudo ainda afirma que KRG apresenta melhor desempenho para problemas com poucas variáveis, enquanto RBF é mais apropriado para problemas com muitas variáveis. Verifica-se que a utilização de um metamodelo apropriado pode reduzir o número de iterações para um terço se comparado com um algoritmo genético.

2.7 FUNÇÕES DE BASE RADIAL

O método das RBF's é uma técnica de interpolação que descreve o comportamento de funções não lineares geradas de um conjunto de pontos amostrais \mathbf{x}_i e respostas f_i . A aproximação é gerada por uma combinação linear de funções radiais centradas em cada ponto amostral (HUSSIAN; BURTON; JOSHI, 2002; LANZI e GIAVIOTTO, 2006).

Broomhead e Loewe (1988) definem RBF utilizando uma situação problema.

Problema: Dado um conjunto de n vetores distintos (dados de entrada), $\{\mathbf{x}_i; i = 1, 2, \dots, n\}$ em \mathbb{R}^N , sendo n números reais $\{f_i; i = 1, 2, \dots, n\}$, determine uma função $s: \mathbb{R}^N \rightarrow \mathbb{R}$ que satisfaça as seguintes condições de interpolação:

$$s(\mathbf{x}_i) = f_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (42)$$

Nota-se que a função é restrita pelos pontos conhecidos do conjunto \mathbf{x}_i . Há diversas maneiras de se impor restrições à função $s(\mathbf{x})$. Uma dessas maneiras é utilizando RBF. Nessa abordagem é gerada uma função linear dependente da posição dos pontos conhecidos de acordo com uma distância arbitrária. Logo, n funções "base" (geralmente não lineares) arbitrárias são introduzidas: $\phi(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|)$ onde $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^N$. Os vetores $\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^N, i = 1, 2, \dots, n$ são os centros das RBF obtidos dos pontos de entrada. Portanto, a função $s(\mathbf{x})$ terá a forma:

$$s(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n w_i \phi(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|) \quad (43)$$

Inserindo as condições de interpolação da Equação (42) na Equação (43), gera-se o conjunto de equações lineares para os coeficientes w_j conforme a expressão:

$$\begin{pmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Lambda_{11} & \cdots & \Lambda_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Lambda_{n1} & \cdots & \Lambda_{nn} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix} \quad (44)$$

onde:

$$\Lambda_{ij} = \phi(\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|) \quad i, j = 1, 2, \dots, n. \quad (45)$$

Logo:

$$w_j = \Lambda^{-1} \mathbf{f}. \quad (46)$$

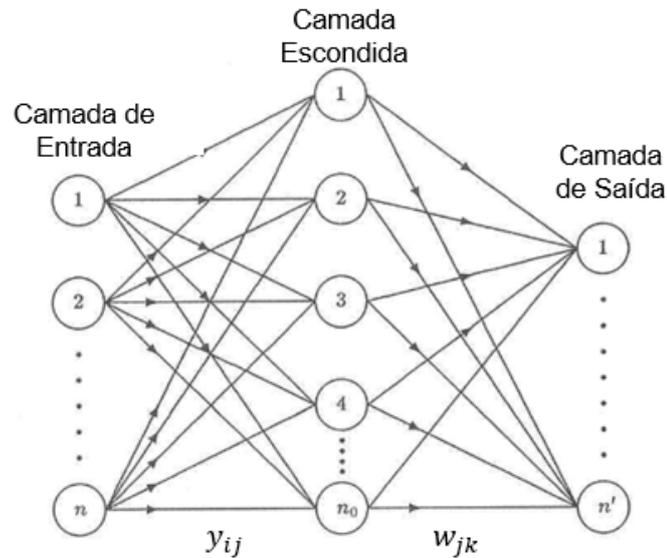
Em geral, é esperado que, para uma escolha arbitrária ϕ , a matriz Λ será singular. Entretanto, para todos os inteiros positivos m, n e para uma grande classe de funções ϕ , a matriz Λ é não singular se os dados de entrada são todos distintos.

Assim que a função ϕ é construída, e uma distância imposta, a relação específica exatamente um problema de interpolação com solução garantida.

A função de base radial gerada, pode ser interpretada como uma rede neural, a qual, possui três camadas: uma camada de entrada ou treino; uma camada com uma função RBF ativa, no caso a função gerada através dos dados de treinamento, $s(\mathbf{x})$ e; uma camada de saída. Essas camadas estão representadas na Figura 16.

Os dados de treino, ou entrada, são expressos por $(\mathbf{x}_i, f(\mathbf{x}_i)) \{i = 1, 2, \dots, n\}$, onde n representa o número de amostras. O termo w_{ik} representa o peso de cada i -ésima função de base (KITAYAMA et al., 2013).

Figura 16 - Diagrama esquemático de uma rede neural construída através de RBF



Fonte: Adaptado de Broomhead e Loewe (1988)

Para problemas menos complexos, pode-se utilizar como funções de base as seguintes relações (FORRESTER; SÓBESTER; KEANE, 2008):

- Linear: $\phi(r) = r$ (47)
- Cúbica: $\phi(r) = r^3$ (48)
- Thin Plate – Spline: $\phi(r) = r^2 \ln(r)$ (49)

A generalização das funções de base para aplicações em problemas mais complexos ou com maior quantidade de variáveis pode ser obtida utilizando funções de base radial paramétricas:

- Gaussiana $\phi(r) = e^{-r^2/2var(x)}$ (50)
- Multi quadrática $\phi(r) = (r^2 + var(x))^{1/2}$ (51)
- Multi quadrática inversa $\phi(r) = (r^2 + var(x))^{-1/2}$ (52)

sendo $r = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|$ e $var(x)$ a variância.

2.8 REFINAMENTO SEQUENCIAL DO METAMODELO

A busca pelo resultado ótimo de um metamodelo pode ser associada ao seu refinamento iterativo. A seleção inicial de pontos feita pelo DoE certamente não terá todos os pontos da função perfeitamente representados. Devido a isso, a construção de um metamodelo útil requer acessos futuros à função original para que seja realizado um refinamento. Esses pontos adicionais são conhecidos como pontos de preenchimento (em inglês, *infill points*).

A seleção dos pontos de preenchimento normalmente ocorre em áreas onde o metamodelo está impreciso ou em áreas onde a combinação das variáveis pode apresentar um resultado útil. Por exemplo, um ponto de mínimo local ou global. A seleção desse ponto pode ser feita utilizando otimização do metamodelo. Após a otimização, a função principal é acessada diversas vezes com os pontos de preenchimentos até que se tenha uma representação satisfatória do metamodelo na região de ótimo. Esse processo é iterativo e depende da eficácia do método de determinação dos pontos de preenchimento (FORRESTER; SÓBESTER; KEANE, 2008).

O estudo de Regis e Shoemaker (2007) apresenta um método de refinamento estocástico para otimização de funções que utilizam um metamodelo para solução. O método é iterativo e, a cada iteração, o metamodelo deve ser atualizado e um novo ponto é selecionado entre pontos aleatoriamente gerados para uma nova avaliação da função principal. Assumindo que a função f tem um único mínimo global no domínio e que os pontos aleatórios seguem uma distribuição probabilística, o método tende a convergir para o mínimo global da função.

O trabalho de Regis e Schoemaker (2007) compara o método proposto, chamado de *Global Metric Stochastic Response Surface* (G-MSRS), com outros seis métodos de otimização de metamodelos em 17 funções distintas. O G-MSRS apresenta resultados melhores que outros modelos, sendo indicado para problemas com dimensões menores ou igual a dez.

Como qualquer método de otimização que utiliza um metamodelo, as primeiras avaliações são feitas em um conjunto determinado de pontos utilizando um DoE.

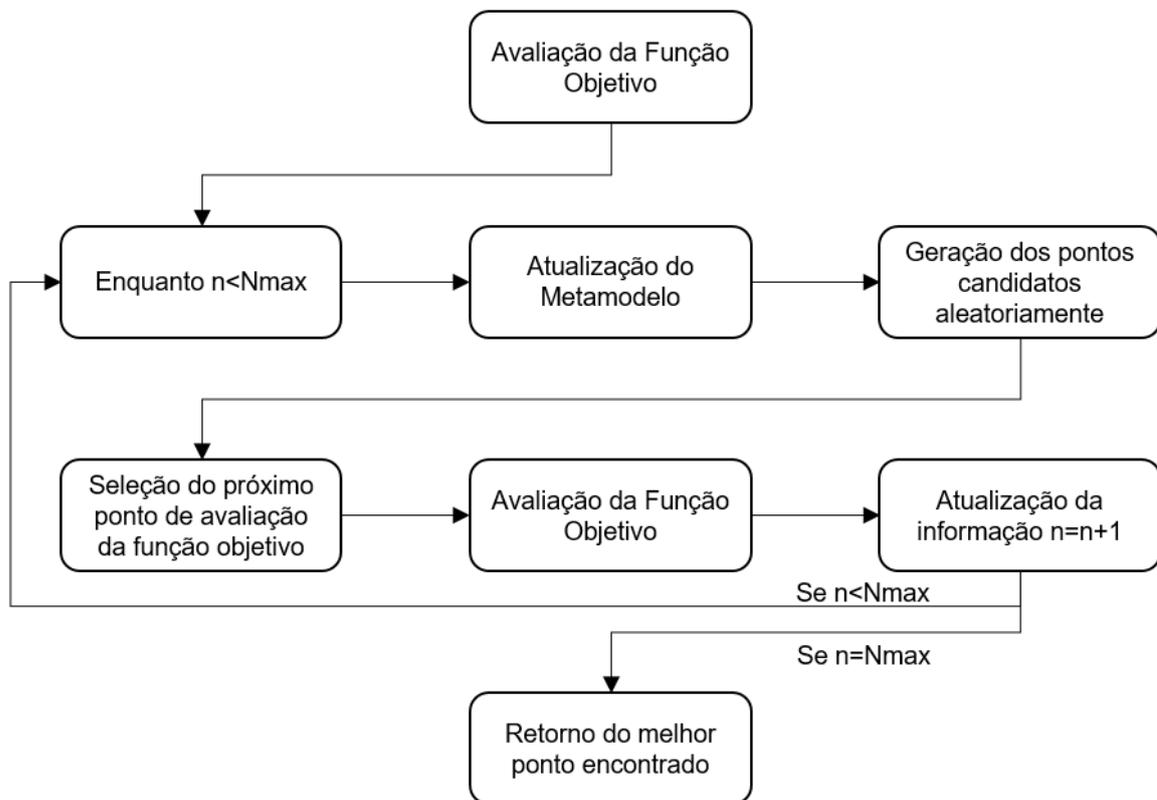
Para o funcionamento do método de Regis e Schoemaker (2007), as seguintes entradas são necessárias:

- 1) Uma função contínua f definida em um hipercubo compacto $\mathcal{D} = [a, b] \subseteq \mathbb{R}^{\mathcal{D}}$;
- 2) Um metamodelo. Ex: RBF ou KRG;
- 3) Um conjunto inicial de pontos $\mathfrak{S} = [\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_{n_0}] \subseteq \mathcal{D}$;
- 4) Número de pontos candidatos gerados aleatoriamente a cada iteração;
- 5) O número máximo de acessos à função principal N_{max} .

A saída do método é o ponto ótimo da função objetivo.

A metodologia proposta por Regis e Schoemaker (2007) segue os passos apresentados na Figura 17.

Figura 17 - Sequência de refinamento do metamodelo proposta por Regis e Schoemaker (2007)



Fonte: Autoria própria

O algoritmo é representado de maneira simplificada na Figura 17, o seu detalhamento segue os passos descritos:

- 1) Avaliação da função objetivo: Avaliar a função objetivo nos pontos iniciais definidos pelo DoE, conjunto \mathfrak{S} . Definido $n = n_0$ e $\mathcal{A}_n = \mathfrak{S}$. Sendo \mathbf{x}_n^* o ponto em \mathcal{A}_n com menor valor;

2) Enquanto $n < N_{max}$

2.1) Atualização do metamodelo: Atualizar o metamodelo utilizando os novos pontos gerados $\mathcal{B}_n = \{(x_i, f_{xi}) : i = 1, \dots, n\}$;

2.2) Geração de pontos candidatos aleatoriamente: Gerar pontos aleatoriamente $\Omega_n = \{y_{n,1}, \dots, y_{n,t}\}$ em \mathbb{R}^4 . Para cada $j = 1, \dots, t$ se $y_{n,t} \notin \mathcal{D}$ substitua $y_{n,j}$ pelo ponto mais próximo em \mathcal{D} . Os pontos Ω_n são chamados pontos candidatos;

2.3) Seleção do próximo ponto de avaliação da função objetivo: Utilizar a informação do metamodelo e \mathcal{B}_n para selecionar o próximo ponto de avaliação x_{n+1} dentro dos pontos candidatos;

2.4) Avaliação da função objetivo: Avaliar a função objetivo em x_{n+1} ;

2.5) Atualização da Informação $\mathcal{A}_{n+1} = \mathcal{A}_n \cup \{x_{n+1}\}$; $\mathcal{B}_{n+1} = \mathcal{B}_n \cup \{x_{n+1}, f(x_{n+1})\}$; x_{n+1} é o ponto ótimo em \mathcal{A}_{n+1} . Adicionar $n = n + 1$;

3) Retorno do melhor ponto encontrado: Retornar x_{nmax}^* .

O passo 2.2 atende algumas especificações técnicas para garantir a convergência do algoritmo. Além disso, é necessário assegurar que os pontos candidatos aleatórios estão todos contidos em \mathcal{D} . Como o princípio para gerar os pontos aleatórios segue uma distribuição probabilista, conforme proposto por Regis e Schoemaker (2007), logo alguns pontos gerados podem estar fora do domínio \mathcal{D} .

No passo 2.2 são gerados dois grupos de pontos amostrais. O primeiro grupo possui pontos uniformemente distribuídos, de maneira aleatória, no domínio \mathcal{D} . O segundo grupo é gerado através da perturbação aleatória da melhor solução x^* obtida até então (MUELLER, 2012).

No passo 2.3 a seleção do próximo ponto de avaliação é feita baseada em dois critérios: valor estimado da função obtido pelo metamodelo e a distância dos pontos previamente avaliados. A cada ponto candidato gerado no passo 2.2 é atribuído uma nota de zero a um em cada um dos critérios, sendo zero a melhor nota. Como o objetivo é minimizar a função e avaliar a maior quantidade de pontos possível, um bom ponto candidato terá um baixo valor da função e pode estar distante de pontos previamente avaliados. O próximo ponto de avaliação é aquele que apresentar o menor valor entre os pontos candidatos. O passo 2.3 pode ser subdividido nas etapas:

- a) Estimar o valor da função para cada ponto candidato. Para cada $\mathbf{x} \in \Omega_n$ calcula-se o valor de $s_n(\mathbf{x})$;
- b) Determinar a distância mínima dos pontos previamente avaliados. Para cada $\mathbf{x} \in \Omega_n$ calcular $\Delta_n(\mathbf{x}) = \min_{1 \leq i \leq n} D(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i)$;
- c) Para cada $\mathbf{x} \in \Omega_n$ calcula-se $V_n^R(\mathbf{x}) = (s_n(\mathbf{x}) - s_n^{\min}) / (s_n^{\max} - s_n^{\min})$;
- d) Para cada $\mathbf{x} \in \Omega_n$ calcula-se $V_n^D(\mathbf{x}) = (\Delta_n^{\max} - \Delta_n(\mathbf{x})) / (\Delta_n^{\max} - \Delta_n^{\min})$;
- e) Para cada $\mathbf{x} \in \Omega_n$ calcula-se $W_n(\mathbf{x}) = w_n^R V_n^R(\mathbf{x}) + w_n^D V_n^D(\mathbf{x})$;
- f) Selecionar o próximo ponto de avaliação da função principal, \mathbf{x}_{n+1} que minimiza a função W_n .

De forma a garantir a convergência para o mínimo global da função, o estudo de Mueller (2012) propõe uma variação da ponderação dos pesos atribuídos aos parâmetros distância de pontos já avaliados e resposta do metamodelo a cada iteração.

Uma busca global pode ser realizada dando preferência a pontos candidatos localizados em regiões ainda não exploradas do metamodelo, para isso é atribuído um peso elevado ao critério de distância (w_n^D). Por outro lado, assim que um ponto promissor é encontrado, a sua vizinhança deve ser avaliada. Uma busca local pode ser realizada elevando o peso atribuído ao critério resposta do metamodelo (w_n^R). Realizando essa variação de uma maneira iterativa, tem-se uma constante transição entre uma busca de ótimo global e local.

De maneira matemática, expressa-se essa sequência da seguinte maneira: Adota-se $w_n^D + w_n^R = 1$ e $w_n^R \geq 0$, para a primeira iteração têm-se $w_n^D = 1$ e a cada iteração se reduz 0,1 desse parâmetro até que $w_n^D = 0$. Em seguida, retorna-se o valor de $w_n^D = 1$ e inicia-se novamente o ciclo repetidamente até atingir o número máximo de acessos permitido.

2.9 APLICAÇÕES DE AEROELASTIC TAILORING NA LITERATURA

O estudo de Shirk e Hertz (1988) define o conceito de *aeroelastic tailoring* como a incorporação da rigidez direcionada em um projeto de uma estrutura

aerodinâmica para controlar sua deformação, influenciando assim seu rendimento aerodinâmico e estrutural de maneira benéfica.

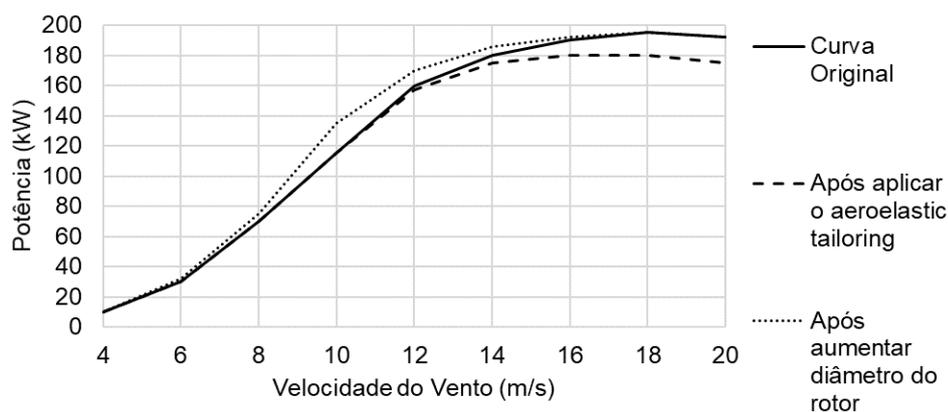
Estudos ao longo dos anos vêm mostrando que a possibilidade de aproveitar a deformação intrínseca da pá de turbina eólica de forma a adaptar um controle ativo de ângulo de ataque é plenamente viável e eficiente. Esse conceito, utiliza os princípios de *aeroelastic tailoring*, os quais aproveitam os acoplamentos de flexão-torção intrínsecos aos materiais anisotrópicos e mostra-se uma importante ferramenta de otimização de pás de turbinas eólicas (VEERS; LOBITZ; BIR, 1998).

O estudo de Veers, Lobitz e Bir (1998) é um dos pioneiros nessa área. Através dele conclui-se que os acoplamentos de flexo-torção podem reduzir as forças aerodinâmicas torcendo a pá no sentido que favoreça a redução do carregamento. A pá é torcida no sentido do estol, reduzindo o carregamento e a potência máxima. Posteriormente, devido a redução do carregamento, é possível aumentar o diâmetro do rotor, elevando a potência gerada em toda a curva e trazendo a potência máxima ao seu valor original. Segundo esse estudo, o emprego dos conceitos de *aeroelastic tailoring* podem gerar um aumento de energia produzida de 5 a 10% em relação a um material que possua comportamento isotrópico.

Diversos outros estudos obtiveram resultados satisfatórios aplicando os conceitos de adaptação passiva ou *aeroelastic tailoring*. Dentre eles, o trabalho de Maheri, Noroozi e Vinney (2007) aplica uma metodologia semelhante a Veers, Lobitz e Bir (1998). A turbina considerada possui velocidade de rotação constante. A melhoria da potência média gerada pela turbina chegou a 15,5%.

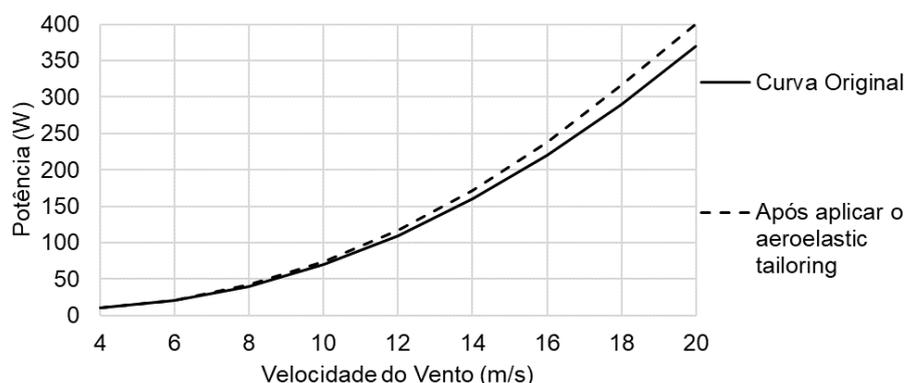
Deilmann (2009) destaca que existem duas abordagens possíveis para se elevar a produção de energia em uma turbina utilizando os conceitos de controle passivo das pás. A primeira opção é a abordagem empregada por Veers, Lobitz e Bir (1998). A segunda alternativa é utilizar a adaptação passiva da pá buscando o ângulo de ataque ótimo independente da velocidade de vento a que a turbina está submetida. As duas abordagens estão exemplificadas na Figura 18 e Figura 19 respectivamente.

Figura 18 - Exemplo da curva de potência aplicando controle passivo com objetivo de elevar diâmetro do rotor



Fonte: Autoria própria

Figura 19 - Exemplo da curva de potência aplicando controle passivo com objetivo de se trabalhar sempre com ângulo ótimo de ataque



Fonte: Autoria própria

Deilmann (2009), assim como o presente trabalho, utiliza a segunda alternativa em uma turbina conhecida (NREL phase VI). Essa turbina possui um rotor de diâmetro 5.029 m e potência nominal de 19,8 kW. A otimização é implementada para a velocidade de início de operação (5 m/s) até a velocidade nominal (11 m/s). Em seguida a turbina entra em condição de estol de forma a evitar carregamentos excessivos. Dessa forma, a otimização é realizada para velocidades de vento até 11 m/s. A melhoria de eficiência atingida na faixa de 5 a 11m/s chega a 6%. Em velocidades de vento superiores a velocidade nominal de projeto, o ganho de eficiência ao se aplicar os conceitos de *aeroelastic tailoring* são mais expressivos, podendo atingir até 20%. Porém, como desvantagem, ocorre aumento do carregamento.

O estudo de Macphee e Beyene (2018) realiza uma análise comparativa de rendimento em uma turbina de baixa potência (<100 kW) entre uma pá rígida e uma pá flexível. A pá de turbina flexível permite a geometria se deformar de acordo com as condições de vento locais, tornando a pá mais eficiente em pontos de operação fora do ponto nominal de projeto. Nas velocidades de vento diferentes da nominal, a deformação apresentada pela pá de turbina tende a deixar a sua geometria o mais próximo possível da configuração nas condições ótimas de operação.

Com o objetivo de elevar a área de operação e aumentar a eficiência média o estudo faz uma verificação experimental. Constrói-se duas pás de turbina eólica, uma flexível e uma rígida. De forma a garantir a deformação da pá flexível, utiliza-se um poliuretano flexível como material de construção, enquanto a pá rígida é construída com poliuretano rígido, ambas são geometricamente idênticas e são construídas com base no perfil NACA 0015, o diâmetro do rotor é 0,5714 metros. Para verificação do aumento da eficiência média, varia-se o ângulo de ataque inicial das pás rígidas e flexíveis de 3 a 9 graus em intervalos de 3°. Considera-se para a análise uma razão de velocidade na ponta da pá entre 5 e 7, dependendo da velocidade de vento. A Tabela 1 mostra os resultados obtidos.

Tabela 1 - Resultados para pás rígida e flexível

Velocidade do vento (m/s)	Ângulo de ataque (°)	C_p máx. (pá rígida)	C_p máx. (pá flexível)	Diferença (%)
2,05	3	0,254	0,256	0,79
2,60	3	0,248	0,251	1,21
3,15	3	0,244	0,244	0,00
2,05	6	0,204	0,235	15,2
2,60	6	0,211	0,246	16,6
3,15	6	0,207	0,225	8,70
2,05	9	0,169	0,224	32,6
2,60	9	0,170	0,196	15,3
3,15	9	0,167	0,212	26,9

Fonte: Adaptado de Macphee e Beyene (2018)

Conclui-se que nas condições em que a pá de turbina apresenta pior rendimento, ou ângulos de ataque mais elevadas (9°), são os pontos onde há maior possibilidade de ganho em se aplicar uma pá que se deforma de acordo com o carregamento sofrido, a diferença no rendimento varia de 15,3% a 32,6% em relação a pá rígida. Além disso, consegue-se uma melhoria no rendimento da turbina em

velocidades de vento diferentes do ponto ótimo de operação (velocidade de vento= 3,15 m/s).

Barr e Jaworski (2019) apresenta a aplicação dos conceitos de adaptação passiva em uma pá de turbina eólica de grandes dimensões (63 metros de envergadura). Isso favorece os deslocamentos na ponta da pá e por consequência os deslocamentos gerados devido ao acoplamento de flexo-torção. Neste trabalho, as orientações da fibra utilizadas são variáveis ao longo da estrutura. Assim a orientação da fibra na base é diferente daquela na ponta da pá de turbina eólica. O estudo é realizado para as velocidades de vento de 4,4; 6,7; 9,0 e 11,4 m/s. O aumento de potência é de 15, 10, 10 e 7%, respectivamente, se comparado à sequência de laminação otimizada a uma pá rígida.

Barr e Jaworski (2019) ainda concluem que a utilização dos conceitos de *aeroelastic tailoring* tem potencial em elevar a potência média de uma turbina, para isso, busca-se evitar condição de estol da pá de turbina eólica em velocidades de vento elevadas. Abordagem essa semelhante a utilizada nesse trabalho.

Os resultados encontrados na literatura demonstram que, independentemente da abordagem, é possível obter ganhos expressivos ao se aplicar os conceitos de adaptação passiva do ângulo de ataque em pás de turbinas eólicas aproveitando o acoplamento flexão-torção da sequência de laminação do material compósito de construção da pá.

3 METODOLOGIA

O presente capítulo descreve as ferramentas utilizadas e a metodologia adotada no trabalho. Além disso, são apresentados detalhes sobre o modelo de turbina eólica e algumas metodologias de cálculo.

3.1 FERRAMENTAS

O trabalho fez uso de três ferramentas computacionais e duas linguagens de programação. Para a geração do modelo 3D utiliza-se o programa computacional CAD PTC CREO2.0. O pacote comercial Abaqus 6.18 foi utilizado para gerar o modelo de elementos finitos para obtenção da resposta estrutural da pá de turbina eólica. Para a obtenção dos coeficientes aerodinâmicos foi utilizado o programa computacional Qblade.

A plataforma computacional Matlab em conjunto com a linguagem de programação Python foram utilizadas para gerar as rotinas de cálculo e garantir a automatização das simulações.

3.2 DESCRIÇÃO GERAL DA METODOLOGIA

Para fazer a otimização estrutural da pá de turbina eólica, isto é, encontrar a configuração de laminado que fornece o maior valor de C_p , um modelo CAD 3D é gerado. Com base no modelo 3D o modelo numérico é gerado no pacote comercial de elementos finitos.

Na sequência, a rotina de programação desenvolvida gera 15 configurações diferentes de laminados através de um DoE. A rotina calcula através do BEMT os carregamentos iniciais que está submetida a pá, para as velocidades de vento de 13 m/s, 15 m/s e 20 m/s.

O processo de cálculo é iterativo. Inicialmente cada configuração de pá é submetida ao primeiro carregamento e isso gera deformações que alteram o ângulo de arfagem e, por consequência, alteram a amplitude do carregamento inicial. As deformações geradas em cada configuração de pá de turbina eólica são verificadas através do modelo de elementos finitos. Destaca-se que o primeiro carregamento para cada velocidade de vento, independente do laminado, será sempre o mesmo visto que a pá de turbina eólica ainda não sofreu deformações.

Assim, baseado nos resultados de deformação da simulação anterior, calcula-se um novo carregamento através do BEMT e uma nova simulação é realizada, devido aos diferentes acoplamentos flexo-torção cada configuração de laminado, ou pá de turbina eólica, apresentará uma deformação diferente. Esse processo é repetido até que obtenha uma diferença pequena, da iteração corrente para a anterior, no valor do deslocamento da linha média no eixo “z” na ponta da pá (menor que 1%). Em seguida, calcula-se o C_p para a configuração de pá na velocidade de vento simulada. Esse processo é feito sucessivamente para cada configuração de pá e para as diferentes velocidades.

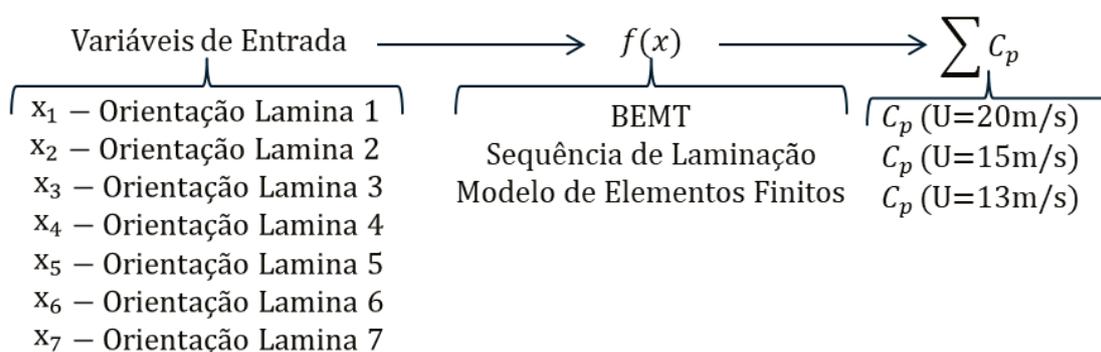
Finalizadas as etapas já descritas, soma-se o C_p das velocidades de vento 13 m/s, 15 m/s e 20 m/s de cada configuração de laminado. Obtém-se, assim, um C_p acumulado para o laminado. Esta manipulação é necessária para gerar um banco de dados para a construção do metamodelo constituído de diferentes variáveis de entrada, porém, com uma única saída.

Assim, o banco de dados para a construção do metamodelo é finalizado. Tendo-se como variáveis de entrada as orientações das camadas de material compósito, e como variável de saída o C_p acumulado. Finalmente, inicia-se a construção do metamodelo através das RBF's.

O metamodelo é submetido ao processo de otimização e, conseqüentemente, ao refinamento sequencial conforme descrito na Seção 0. Dessa forma, obtém-se a configuração que apresenta o maior C_p acumulado.

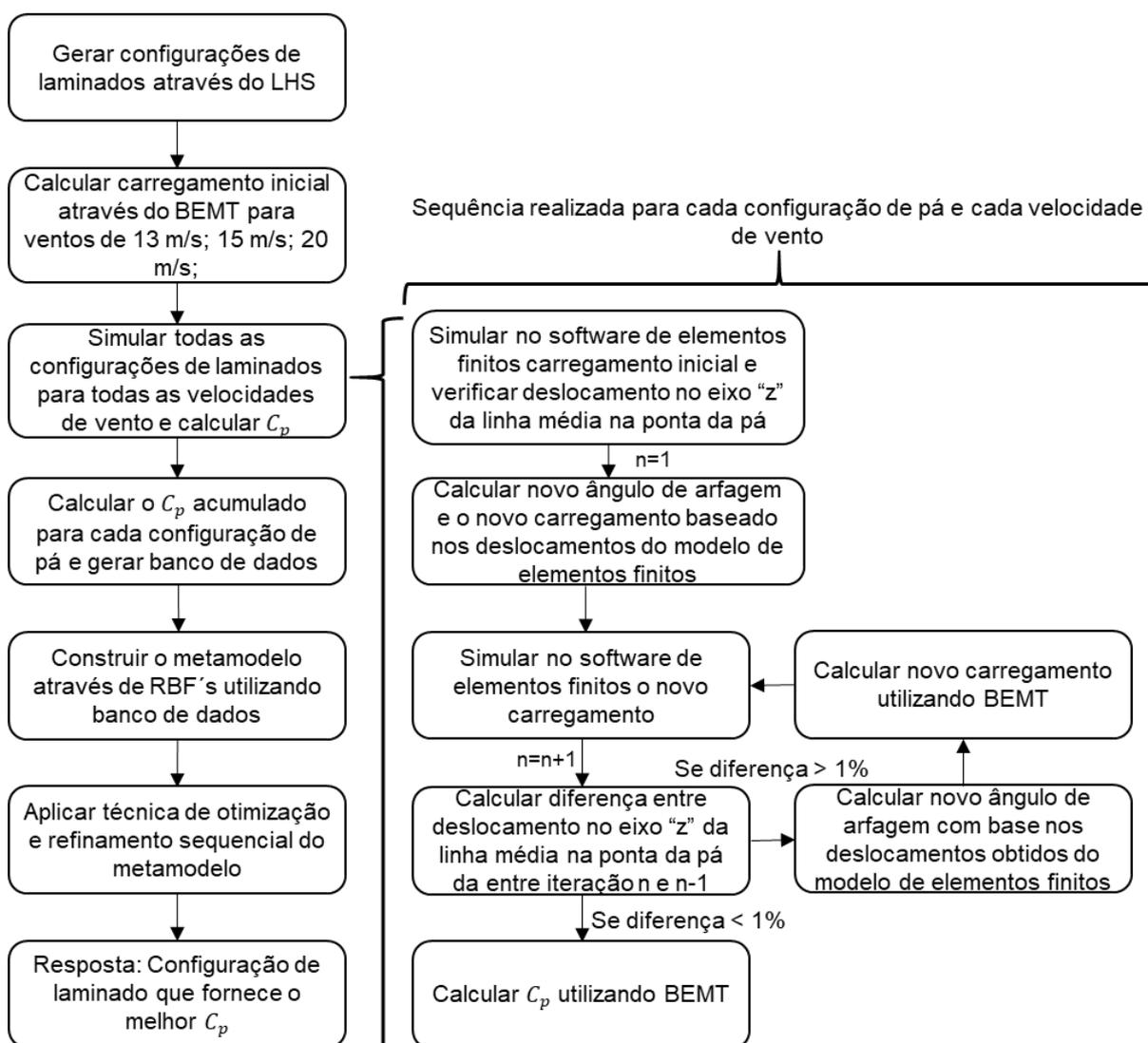
Pode-se então escrever o problema em questão na forma de uma função objetivo a ser otimizada, essa representada na Figura 20.

Figura 20 - Função objetivo



A Figura 21 apresenta a metodologia descrita previamente em forma de fluxograma.

Figura 21 - Fluxograma da metodologia

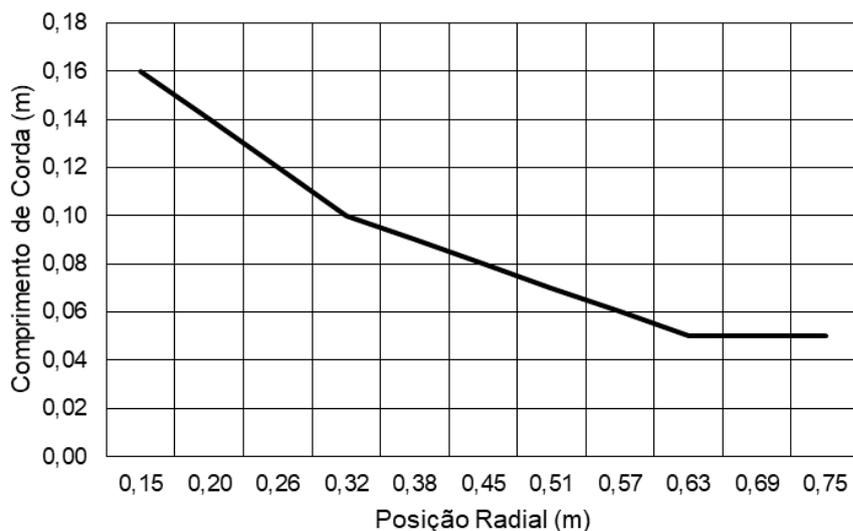


Fonte: Autoria própria

3.3 MODELO MATEMÁTICO DA PÁ DE TURBINA EÓLICA

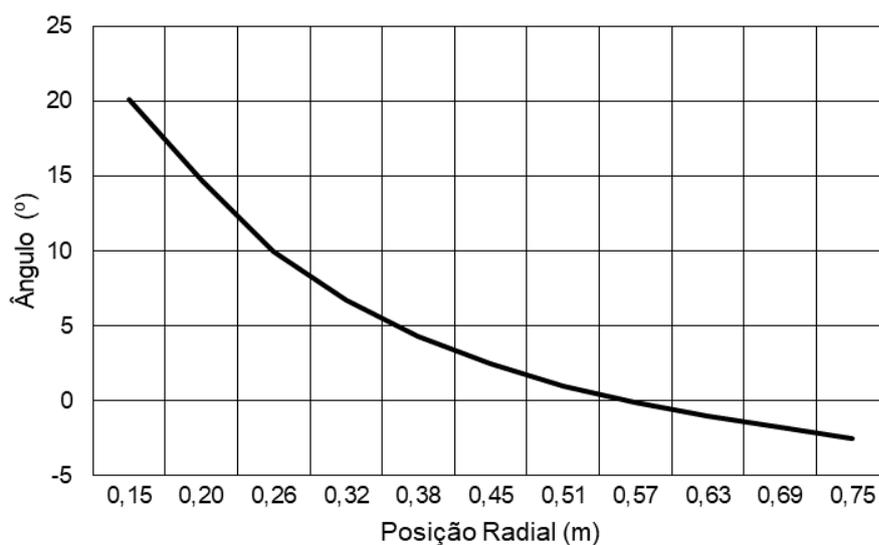
O modelo de pá utilizado como referência é aquele proposto por Leite e Ferreira (2019). A pá correspondente possui um comprimento total de 750 mm, sendo que a área útil começa a partir de uma distância radial de 150 mm. A Figura 22 mostra o comprimento de corda em função da posição radial, e a Figura 23 traz a relação do ângulo de torção geométrica em relação a posição radial.

Figura 22 - Comprimento de corda em função da posição radial



Fonte: Autoria própria

Figura 23 - Ângulo de torção geométrica em função da posição radial

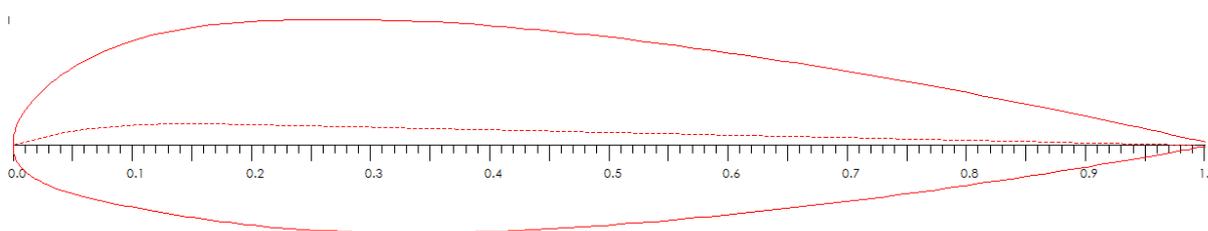


Fonte: Autoria própria

Para a construção da pá de turbina eólica estudada, utiliza-se como referência a linha de camber do perfil de aerofólio NACA23018. Os perfis NACA foram desenvolvidos pelo Conselho Nacional de Aeronáutica dos Estados Unidos (*National Advisory Committee for Aeronautics*), órgão extinto que deu origem à Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (*National Aeronautics and Space Administration - NASA*). Esses perfis são amplamente utilizados em projetos de componentes aerodinâmicos e suas propriedades essenciais são previamente mapeadas (IRA et al., 1945).

Utilizando o programa computacional livre Qblade, é possível traçar o perfil de NACA23018, o qual está representado na Figura 24. A linha de camber é a linha média do perfil estudado. O modelo de pá de turbina eólica estudada é construído com 4 mm de espessura adotando como linha média a linha de camber do perfil NACA23018. A espessura é constituída de 7 lâminas de material compósito laminado de 0,57 mm.

Figura 24 - Perfil de aerofólio NACA 23018 (linha contínua) e sua linha camber (linha tracejada)



Fonte: Autoria própria

Tem-se assim o perfil da pá de turbina, o ângulo de torção da geometria, raio e comprimento de corda, logo, é possível gerar uma nuvem de pontos e o modelo 3D da pá de turbina de referência. O qual, é na sequência utilizado para gerar o modelo de elementos finitos.

Utilizando o programa computacional Qblade, gera-se um banco de dados dos coeficientes aerodinâmicos (C_d e C_l) para o modelo de aerofólio proposto. O banco de dados é construído considerando o número de Reynolds entre 60.000 e 200.000, com um passo de 20.000 e valores de ângulo de ataque entre 0° e 20° , com um passo de $0,1^\circ$ (colunas). Tem-se, portanto, duas matrizes de dimensão 8×201 dos coeficientes C_d e C_l . Essa matriz é utilizada como base na rotina de cálculos de forças aerodinâmicas através do BEMT.

O modelo de elementos finitos é construído com elementos de casca de quatro nós (S4R). A análise realizada é estática, considerando o material dentro do regime elástico-linear, mas a estrutura pode sofrer grandes deslocamentos (análise não-linear geométrica). A técnica numérica utilizada para solução do sistema não-linear de equações é o método de Newton. Opta-se por esse método devido à sua melhor taxa de convergência se comparada aos métodos alternativos, tais como Newton modificado e quase-Newton, os quais costumam ser utilizados em soluções de modelos com grande quantidade de elementos (ABAQUS, 2010).

O material compósito utilizado é o carbono-epóxi unidirecional prepreg, cujas propriedades estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades de uma lâmina de carbono-epóxi unidirecional prepreg

Propriedade	Valor
E_1	121 GPa
E_2	8,6 GPa
G_{12}	4,7 GPa
ν_{12}	0,27
Densidade	1,6 g/cm ³

Fonte: Autoria própria

Os ângulos de orientação das sete lâminas (-90° a 90°) são as variáveis de entrada do presente estudo, e responsáveis por gerar diferentes acoplamentos flexão-torção e, por consequência, diferentes C_p 's.

Inicialmente é realizado um estudo de convergência de malha, onde aplica-se um carregamento padrão equivalente a uma velocidade de vento de 20 m/s para valores fixos de cada orientação de lâmina. O deslocamento total da linha média na ponta da pá é utilizado como parâmetro de verificação. Refina-se a malha até o momento em que a adição de novos elementos não gere variações no resultado do deslocamento superiores a 0,01 mm.

As condições de contorno do modelo estão representadas na Figura 25. A pá é engastada em uma das suas extremidades. Há também dois carregamentos atuantes. Em cor magenta está representado o carregamento aerodinâmico. Esse carregamento é dependente da torção apresentada pela pá. Na Subseção 2.1.2 é explicado como se obter esse valor através da metodologia BEMT, sendo o seu cálculo feito através de uma rotina codificada em Matlab. A sua aplicação ao modelo matemático é feita na forma de uma pressão equivalente por elemento, sendo distribuída ao longo de toda a superfície do aerofólio.

Em cor verde está representado o carregamento distribuído devido à força centrífuga, oriunda da rotação do rotor, e calculada por:

$$F_c = dm \Omega^2 r, \quad (53)$$

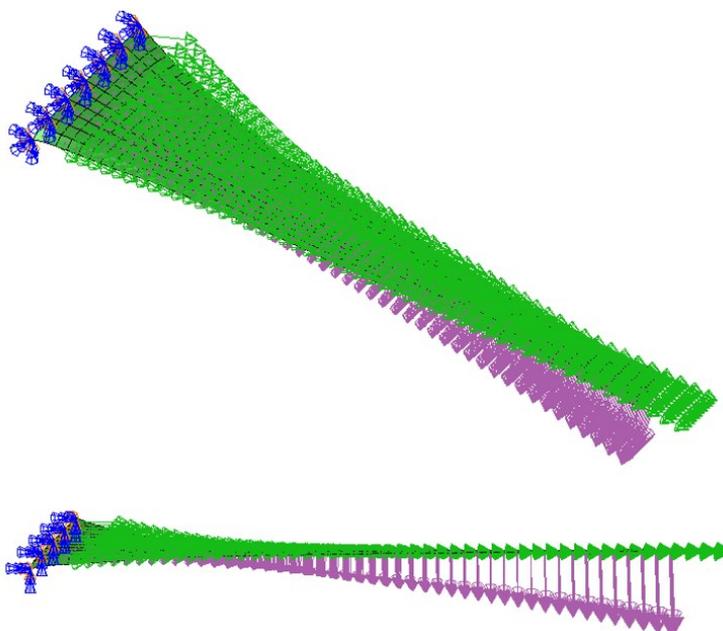
sendo dm o diferencial de massa, Ω a velocidade angular e r a distância radial do eixo do rotor ao centro do diferencial de massa.

Obteve-se os valores de rotação do rotor através da relação proposta por Leite e Ferreira (2019):

$$\Omega = \sqrt{1467,95U + 387,67} - 19,69, \quad (54)$$

a aplicação desse carregamento é feita de maneira uniformemente distribuída ao longo do aerofólio.

Figura 25 - Condições de contorno e carregamentos aplicados no modelo de elementos finitos da pá



Fonte: Autoria própria

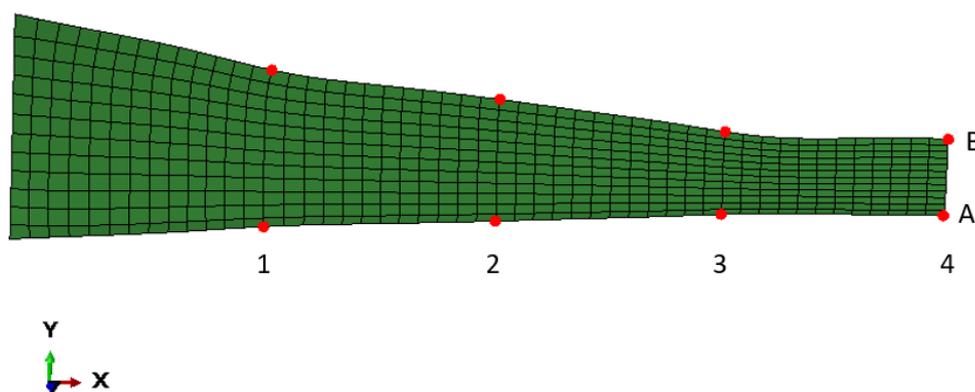
3.4 CÁLCULO DO ÂNGULO DE ARFAGEM

Conforme descrito na metodologia, o cálculo de C_p para cada velocidade de vento segue um processo iterativo onde admite-se inicialmente um carregamento sobre uma pá rígida. Com base nos deslocamentos, obtêm-se novos carregamentos e assim sucessivamente até obter uma diferença no deslocamento da ponta da pá no eixo “z” entre duas iterações consecutivas menor que 1%.

Para o cálculo dos novos carregamentos da pá deformada é necessário avaliar a sua torção. São estabelecidos oito pontos de controle associados em quatro

pares espaçados entre si de 150 mm. Esses pontos de controle estão representados na Figura 26.

Figura 26 - Pontos de controle na malha de elementos finitos para cálculo do carregamento aerodinâmico



Fonte: Autoria própria

A partir da posição inicial dos pontos (x,y,z) e do deslocamento em cada ponto após a aplicação do carregamento, geram-se vetores unindo os pares AB para a posição inicial (\mathbf{v}_0) e a posição deformada (\mathbf{v}) . Em seguida, calcula-se o ângulo formado entre esses dois vetores para obter a torção em cada um dos pontos. Esse ângulo é dado por:

$$\theta_x = \cos^{-1}(\mathbf{v}_0) - \cos^{-1}(\mathbf{v}_{0x}) \quad (55)$$

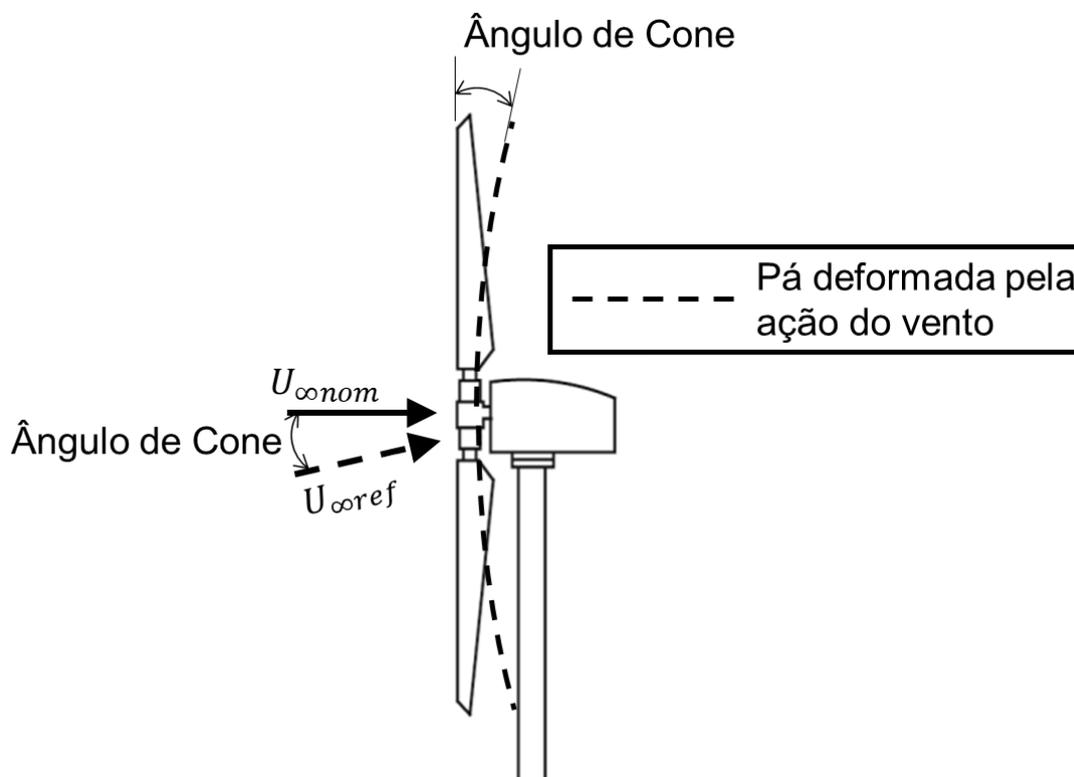
Utiliza-se somente a torção em torno do eixo x por ser este o eixo longitudinal da pá, conforme demonstrado na Figura 26.

Obteve-se, assim, a torção nas secções um, dois, três e quatro. Para o cálculo dos novos carregamentos, é necessário obter a torção em cada um dos elementos da pá. No trabalho em questão, a pá é dividida em 50 elementos. Portanto, para obter os valores de torção para todas as secções é feita uma interpolação do tipo *spline* considerando-se os valores encontrados nas secções um, dois, três e quatro.

O ângulo de torção obtido é adicionado ao ângulo nominal de fabricação da pá para obter o valor do novo ângulo de ataque. Porém, este ainda não é o único ajuste necessário no carregamento. Os carregamentos aerodinâmicos geram uma inclinação do eixo da pá em relação ao plano do rotor. Esse é o ângulo entre a linha

que conecta a raiz e a ponta da pá após a aplicação da deflexão devido aos carregamentos aerodinâmicos, conforme demonstrado na Figura 27.

Figura 27 - Turbina sob ação do vento



Fonte: Autoria própria

Logo, a velocidade de vento a ser considerada não é mais a velocidade nominal, e sim a velocidade $U_{\infty ref}$. Dessa forma, tem-se um novo ângulo de arfagem e uma nova velocidade de vento de referência, o que permite que o cálculo dos novos carregamentos seja realizado para a próxima iteração.

Quando essa inclinação da pá de turbina atinge valores superiores a 5° ocorrem reduções significativas no torque da turbina (NOVES; QIN; LOTH, 2019). Devido a isso, de forma a evitar grandes reduções na potência da turbina, a rotina programada em Matlab faz esta verificação cada vez que uma nova simulação é realizada, excluindo configurações que apresentem ângulos superiores a 5° . Esta exclusão impactaria o processo de otimização, uma vez que o ponto de ótimo poderia estar exatamente em uma região do domínio eliminada da análise.

Para resolver este inconveniente uma restrição deveria ser aplicada ao problema de otimização e ao metamodelo. Porém, nenhum ponto amostral verificado

durante toda a análise violou tal restrição, assim sendo, de forma a não onerar desnecessariamente o processo de otimização, ela não foi considerada na construção e otimização do metamodelo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos da metodologia e algoritmos propostos nesta dissertação. O algoritmo de otimização desenvolvido para encontrar a melhor sequência de laminação da pá de turbina é inicialmente testado com funções matemáticas conhecidas, de forma a avaliar o seu funcionamento. Os resultados obtidos são mostrados na Seção 4.1. Na Seção 4.2 é demonstrado um teste de convergência de malha do modelo de elementos finitos. Na Seção 4.3 é apresentada uma verificação do cálculo do coeficiente de potência e, por fim, os resultados da otimização da pá de turbina eólica são apresentados na Seção 4.4.

4.1 TESTE DO ALGORITMO COM FUNÇÕES CONHECIDAS

O algoritmo de otimização desenvolvido foi testado previamente com funções conhecidas e, dessa forma, foi possível assegurar o seu correto funcionamento. As funções testadas foram Branin-Hoo, Six Hump Camel Back e Hartmann 3D, que são funções bastante utilizadas na literatura para a avaliação de algoritmos de otimização. Da mesma forma como proposto para a otimização da pá de turbina, cada função foi avaliada 15 vezes para gerar um metamodelo na etapa de DoE. Na sequência, o metamodelo é submetido ao processo de refinamento sequencial e otimização.

Destaca-se que a maneira como o algoritmo de otimização foi concebido, interpolando entre buscas locais e globais, faz com que o mesmo não atinja obrigatoriamente o ponto de mínimo global, em determinadas funções ele pode estimar pontos muito próximos ao mínimo global sem atingir esse ponto.

4.1.1 Função Branin-Hoo

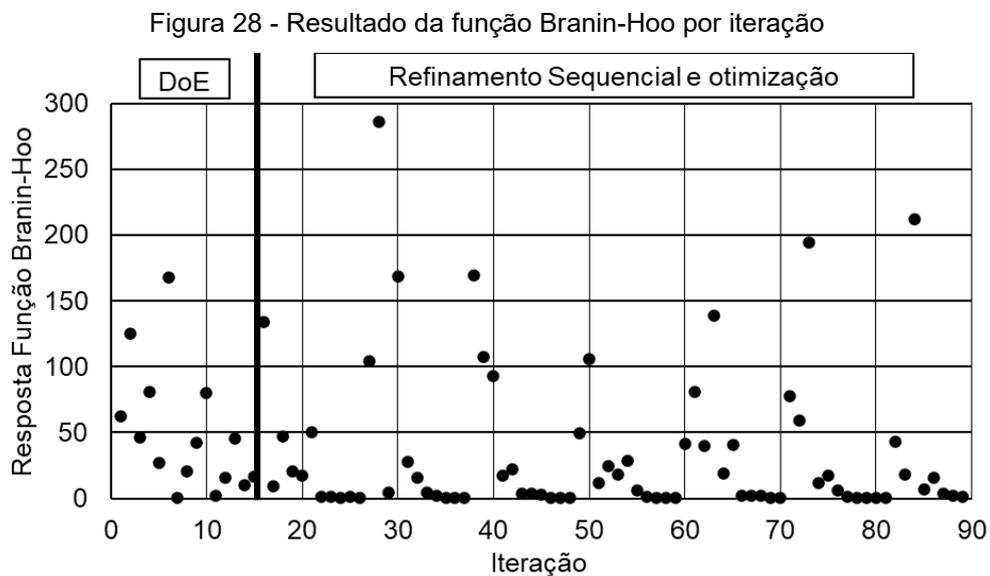
A função Branin-Hoo pode ser representada pela equação:

$$f(\mathbf{x}) = \left(x_2 - \frac{5,1}{4\pi^2} + \frac{5}{\pi} x_1^2 - 6 \right)^2 + 10 \left(1 - \frac{1}{8\pi} \right) \cos x_1 + 10 \quad (56)$$

$$x_1 \in [-5; 10] \text{ e } x_2 \in [0; 15]$$

A função possui os pontos de mínimo $\mathbf{x} = (-3,14; 12,275); (3,14; 2,275)$ e $(9,425; 2,475)$, sendo $f(\mathbf{x}) = 0,397887$. O ponto de mínimo é encontrado pelo

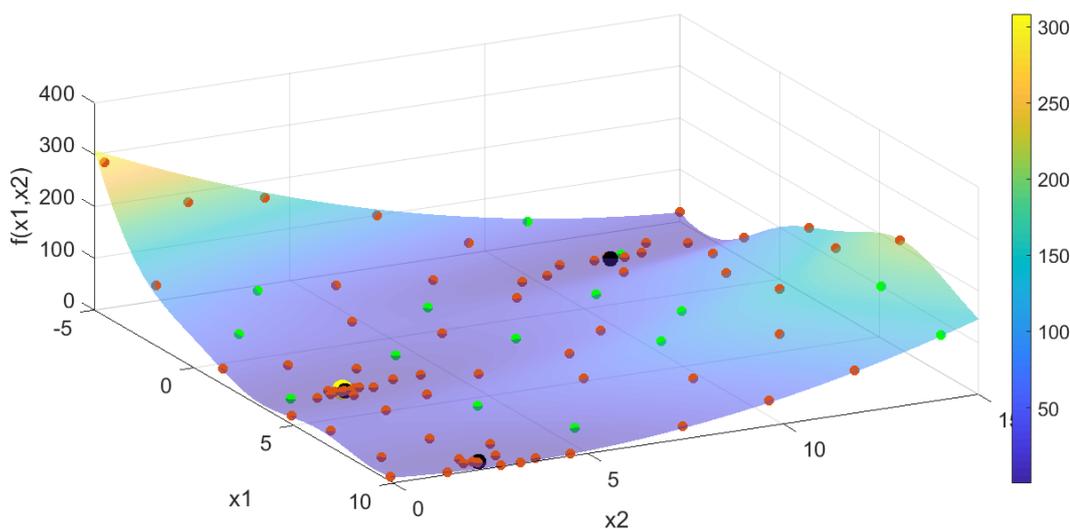
algoritmo após 70 iterações, a Figura 28 representa o processo de busca do ponto ótimo a cada iteração, demonstrando a resposta da função a cada iteração.



Fonte: Autoria própria

A Figura 29 demonstra o processo de busca do algoritmo em função das variáveis de entrada x_1 e x_2 .

Figura 29 - Posições das amostras avaliadas com a função real na otimização da função Branin-Hoo



Fonte: Autoria própria

Nota: Esferas em verde = Pontos amostrais da etapa de DoE; Esferas em laranja = Pontos amostrais do refinamento sequencial; Esferas em preto = Variáveis ótimas da função; Esfera em amarelo = Ponto de ótimo encontrado pelo algoritmo.

Nota-se que todo o domínio foi explorado, além disso, nas regiões próximas aos pontos de ótimo global da função há uma maior concentração de pontos amostrais. Esse comportamento é de certa forma esperado, visto que o algoritmo interpola entre a busca global e busca local nos pontos com maior potencial de ótimo da função. Destaca-se ainda a maneira como o DoE distribui os pontos entre todo o domínio explorando as regiões internas, o que favorece a construção de metamodelos complexos.

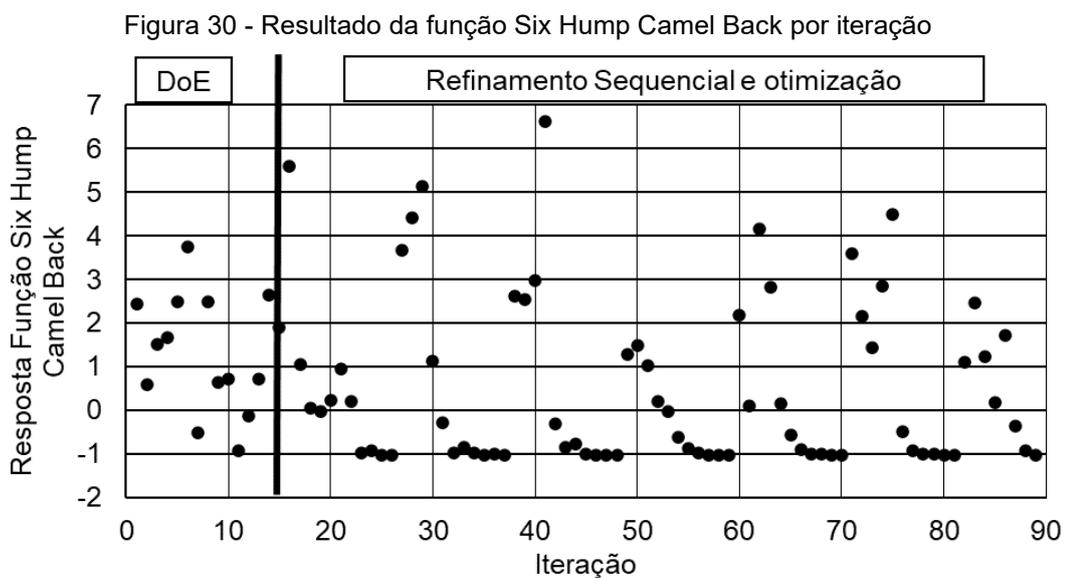
4.1.2 Função Six Hump Camel Back

A função Six Hump Camel Back pode ser representada pela equação:

$$f(\mathbf{x}) = \left(4 - 2,1x_1^2 + \frac{x_1^4}{3}\right)x_1^2 + x_1x_2 + (-4 + 4x_2^2)x_2^2 \quad (57)$$

$$x_1 \in [-2; 2]; x_2 \in [-1; 1]$$

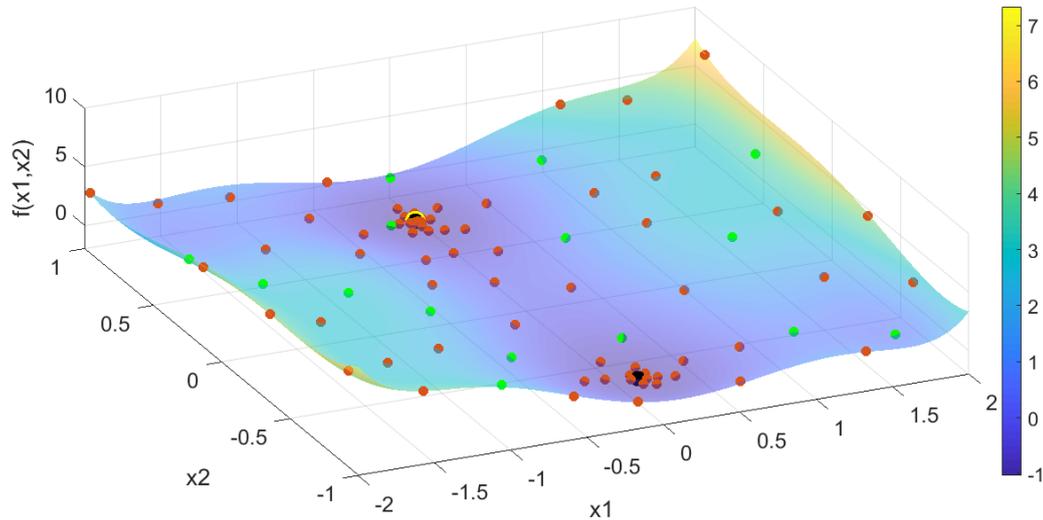
A função possui os pontos de mínimo $\mathbf{x} = (0,0898; -0,7126)$ e $(-0,0898; +0,7126)$, sendo $f(\mathbf{x}) = -1,0316$. O ponto de mínimo é encontrado pelo algoritmo após 81 iterações, a Figura 30 representa o processo de busca do ponto ótimo a cada iteração.



Fonte: Autoria própria

A Figura 31 demonstra o processo de busca do algoritmo em função das variáveis de entrada x_1 e x_2 .

Figura 31 - Posições das amostras avaliadas com a função real na otimização da função Six-Hump Camel Back



Fonte: Autoria própria

Nota: Esferas em verde = Pontos amostrais da etapa de DoE; Esferas em laranja = Pontos amostrais do refinamento sequencial; Esferas em preto = Variáveis ótimas da função; Esfera em amarelo = Ponto de ótimo encontrado pelo algoritmo.

O Algoritmo apresentou um comportamento semelhante ao apresentado na função Branin-Hoo, investigando todo o domínio e mantendo foco nos possíveis pontos de ótimo da função. O comportamento traz bastante confiabilidade ao algoritmo desenvolvido na aplicação do problema em questão.

4.1.3 Hartmann 3D

A função Hartmann pode ser escrita da seguinte forma:

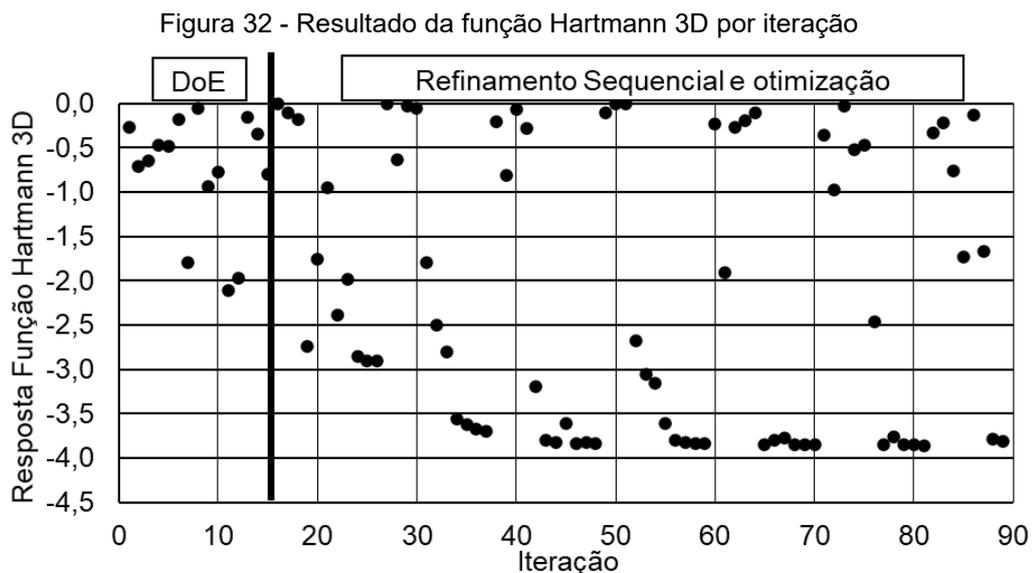
$$f(\mathbf{x}) = - \sum_{i=1}^4 \alpha_i \exp \left(- \sum_{j=1}^3 A_{ij} (x_j - P_{ij})^2 \right) \quad x_{1,2,3} \in [0; 1] \quad (58)$$

$$\alpha = (1,0; 1,2; 3,0; 3,2)^T$$

$$A = \begin{pmatrix} 3,0 & 10 & 30 \\ 0,1 & 10 & 35 \\ 3,0 & 10 & 30 \\ 0,1 & 10 & 35 \end{pmatrix}$$

$$P = 10^{-4} \begin{pmatrix} 3689 & 1170 & 2673 \\ 4699 & 4389 & 7470 \\ 1091 & 8732 & 5547 \\ 381 & 5743 & 8828 \end{pmatrix}$$

A função possui o ponto de mínimo $\mathbf{x} = (-0,114614; 0,555649; 0,852547)$, sendo $f(\mathbf{x}) = -3,86278$. O ponto de mínimo é encontrado pelo algoritmo após 81 iterações, a Figura 32 representa o processo de busca do ponto ótimo a cada iteração.



Fonte: Autoria própria

Na função Hartmann 3D, assim como nas funções Branin-Hoo e Six Hump Camel Back, o algoritmo foi eficiente, convergindo após poucas iterações para o valor ótimo da função.

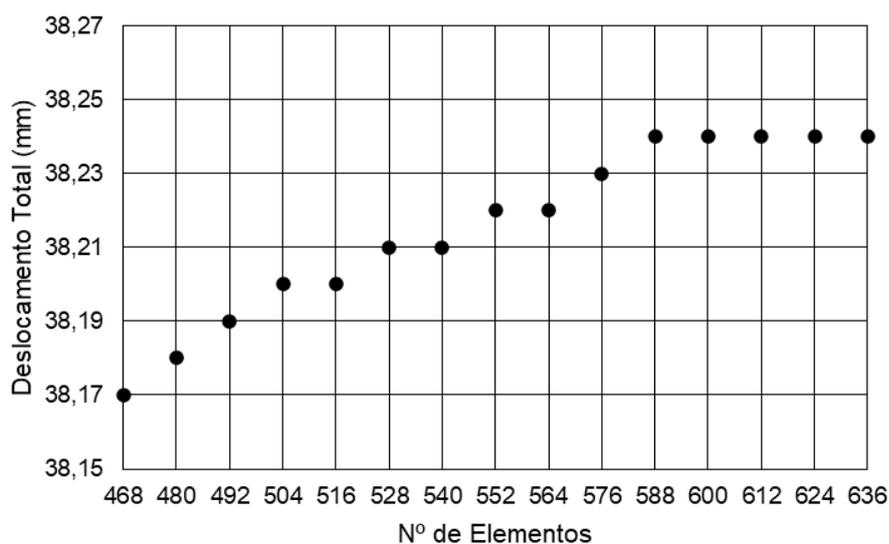
Os resultados obtidos nas funções conhecidas não garantem a convergência para o ponto de ótimo da função objetivo do trabalho em questão, porém elevam a confiabilidade da aplicação do algoritmo na busca da configuração de laminado capaz de fornecer o valor de C_p mais elevado.

4.2 TESTE DE CONVERGÊNCIA DA MALHA DA PÁ

No teste de convergência para definição da malha de elementos finitos utilizada no processo de otimização, iniciou-se com um modelo constituído por 468 elementos. Na sequência, a malha é refinada diminuindo o tamanho dos elementos e adicionam-se, consecutivamente, 12 elementos até que o deslocamento total da linha média da ponta da pá apresente diferença inferior a 0,01 mm entre duas iterações consecutivas. Conforme pode ser observado na

Figura 33, a partir de 588 elementos o valor do deslocamento se estabiliza, indicando convergência de malha. Logo, define-se como sendo essa a quantidade de elementos para o modelo utilizado no processo de otimização.

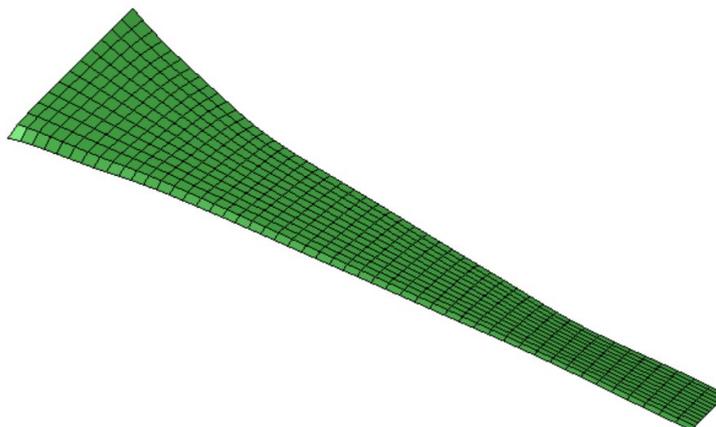
Figura 33 - Análise de convergência da malha do modelo de elementos finitos



Fonte: Autoria própria

A Figura 34 representa a malha gerada e o perfil da pá de turbina eólica que é estudada.

Figura 34 - Malha de elementos finitos da pá eólica com 588 elementos de casca



Fonte: Autoria própria

4.3 TESTE DE CONVERGÊNCIA DO COEFICIENTE DE POTÊNCIA

A Tabela 3 apresenta um exemplo dos resultados obtidos no processo iterativo de cálculo proposto na Figura 21 e detalhado na Seção 3.2, adiciona-se aqui a verificação do valor de C_p após cada etapa. O laminado possui a sequência de empilhamento [20 / 85 / 90 / 90 / 90 / -46 / -40] e a velocidade de vento é de 20 m/s.

A Tabela 3 traz também valores do deslocamento na direção z da linha média da ponta da pá. Esses dados servem para verificar a convergência do modelo de elementos finitos.

Tabela 3 - Resultados das iterações para o laminado [22 / 85 / 90 / 90 / 90 / -46 / -40], com $U = 20$ m/s

Iteração	C_p	Diferença (%) p/ iteração anterior	Deslocamento em z da ponta da pá (mm)
1	0,3240	Na	20,02
2	0,3311	2,19	20,46
3	0,3361	1,51	20,77
4	0,3396	1,04	20,98
5	0,3397	0,03	20,99

Fonte: Autoria própria

Nota-se que, a cada iteração, o valor do deslocamento da ponta da pá na direção z vai convergindo para 20,99 mm. Na iteração 5 tem-se uma diferença de

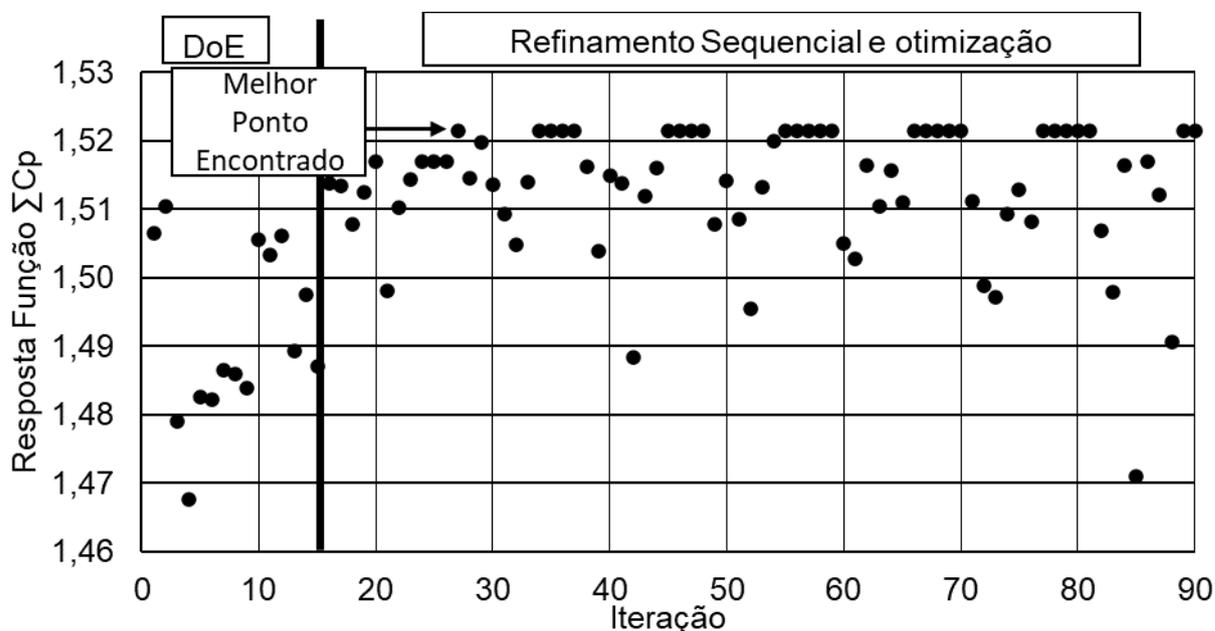
somente 0,03% em relação ao resultado de deslocamento obtido na iteração 4, atendendo assim ao critério de parada (diferença em relação a iteração anterior < 1%).

4.4 OTIMIZAÇÃO E REFINAMENTO SEQUENCIAL DO METAMODELO

A aplicação combinada das técnicas descritas no Capítulo 2 deste trabalho permite obter uma proposta de sequência de laminação para uma pá de turbina eólica com coeficiente de potência ótimo. A Figura 35 apresenta o resultado da função objetivo por iteração, sendo a resposta da função objetivo a combinação do modelo de elementos finitos da pá de turbina eólica e o cálculo do C_p baseado no BEMT, conforme representado na Figura 20.

Os 15 primeiros pontos são originados pelo DoE, os demais são resultados do refinamento sequencial. O melhor valor para a função objetivo obtido no DoE é de 1,511. Na etapa de refinamento sequencial e otimização o valor máximo de 1,522 já é encontrado na iteração 27. Nota-se que existem diversos pontos de máximo, ou seja diversas combinações de laminado que fornecem o coeficiente de potência ótimo.

Figura 35 - Evolução da função objetivo ao longo das iterações



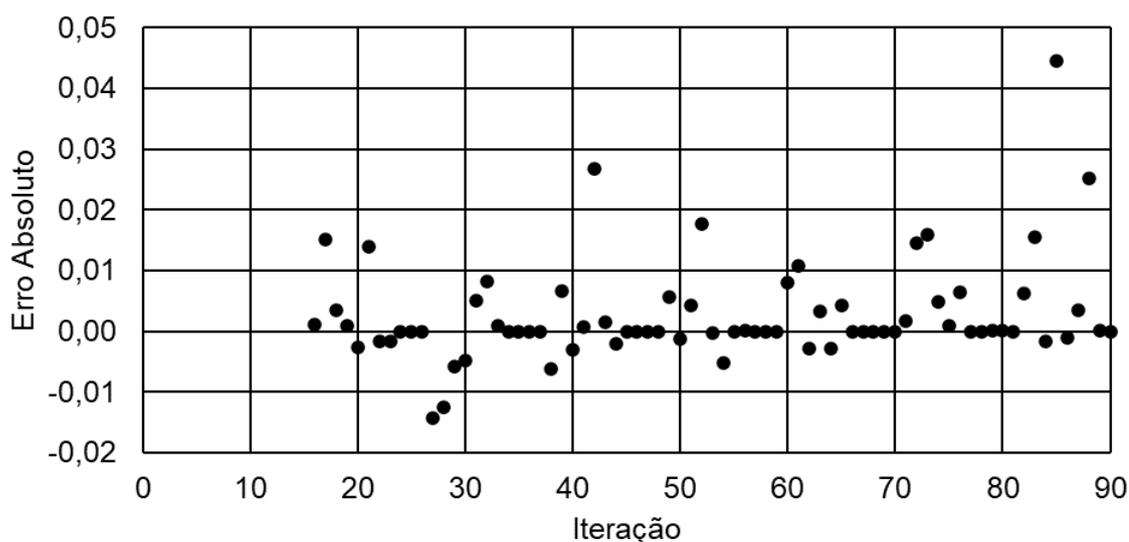
Fonte: Autoria própria

A cada iteração avalia-se o valor do metamodelo da função objetivo em aproximadamente 4.000 pontos. Ou seja, 4.000 seqüências de laminação diferentes são avaliadas pelo metamodelo para encontrar aquela que fornece o valor ótimo.

Após definir a possível seqüência de laminação que pode ser um ponto de ótimo, a mesma é verificada experimentalmente, o que permite calcular a precisão do metamodelo. Calcula-se a diferença entre o valor previsto e valor observado em cada uma das iterações da etapa de refinamento sequencial, esses valores estão representados na Figura 36.

Observam-se valores de erro absoluto muito próximos a zero, soma-se a isso o fato do erro proporcional médio das iterações ser de 0,31%. Isso sugere que o metamodelo de RBF apresenta uma elevada precisão nas regiões exploradas.

Figura 36 - Erro absoluto por iteração



Fonte: Autoria própria

A precisão obtida através do metamodelo de RBF corrobora com os resultados encontrados nos trabalhos de Lanzi e Giaviotto (2006) e Nik e colaboradores (2014). O estudo de Lanzi e Giaviotto (2006) realiza análises comparativas entre os resultados do metamodelo e o modelo de elementos finitos para o painel descrito na Seção 2.6 deste trabalho, para carga de colapso o modelo RBF estimou 201 kN, enquanto o modelo de elementos finitos apresentou 204,6 kN, uma diferença de 1,7%. Já para deformação da estrutura até o início da flambagem a

diferença entre o valor previsto pelo modelo de RBF e o modelo de elementos finitos foi de 1,8%.

Nik e colaboradores (2014) utilizam como parâmetro de avaliação de precisão o módulo do erro relativo médio, dado por:

$$RAAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n \times STD}, \quad (59)$$

onde o problema estudado é a configuração de laminado curvilíneo que apresenta maior resistência à carga de flambagem. Na equação, \hat{y}_i representa o valor estimado pelo metamodelo, y_i o valor verificado experimentalmente e STD o desvio padrão

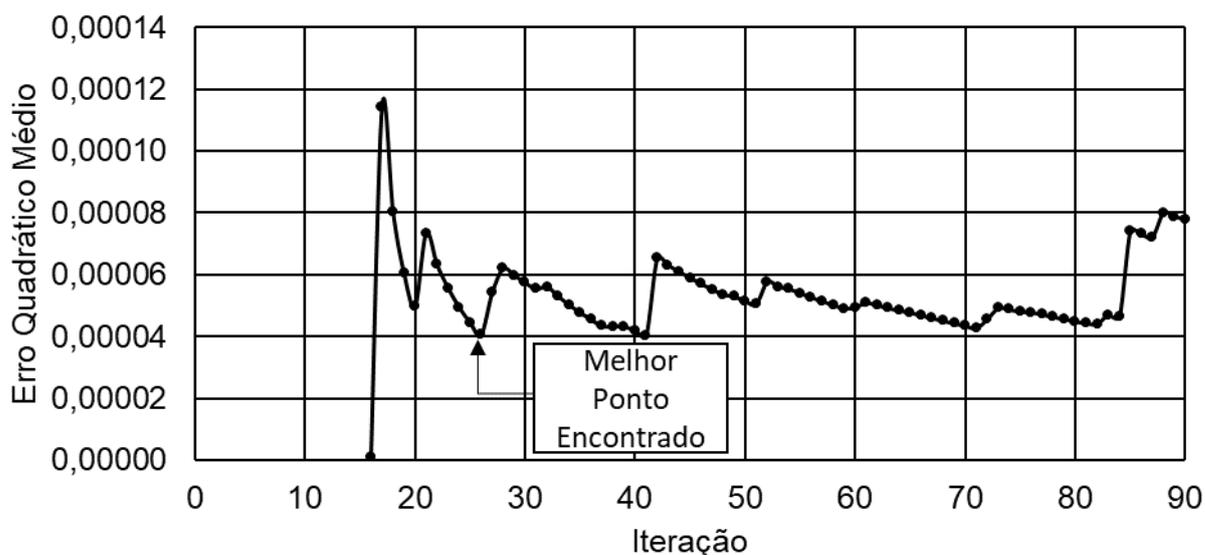
Quanto mais próximo a zero o valor obtido de $RAAE$, mais preciso é o metamodelo, além disso, a Equação 59 não possui limite superior, quanto menos preciso o metamodelo maior o valor obtido. Nik e colaboradores (2014) obtiveram um valor próximo a 0,3, enquanto o presente trabalho obteve o valor de 0,62, valor considerado adequado.

A aplicação do metamodelo de RBF para a representação de uma pá de turbina eólica apresentou-se ligeiramente mais precisa do que os trabalhos de referência considerando os critérios previamente apresentados. Porém, a similaridade obtida nos resultados traz confiabilidade ao metamodelo de RBF em aplicações estruturais de materiais compósitos laminados, ou mais especificamente, na otimização de pás de turbinas eólicas compósitas.

O erro quadrático médio também é avaliado e representado na Figura 37. Nota-se a sua convergência para o valor de 0,00004 após cerca de 26 iterações. Porém, essa convergência não se confirma ao longo das iterações, sofrendo algumas oscilações a medida que se adiciona novos experimentos, essas oscilações ocorrem quando o algoritmo inicia uma nova busca de ponto ótimo em uma região pouco explorada.

A medida que se adicionam novos experimentos a amplitude dessas oscilações deve diminuir, chegando a ponto de serem quase imperceptíveis. Quando esse ponto for atingindo, pode-se afirmar que não há mais vantagens em adicionar experimentos ao metamodelo. Essa quantidade de experimentos não foi alcançada no presente trabalho que buscou fazer a otimização com no máximo 90 experimentos.

Figura 37 - Erro quadrático médio por iteração

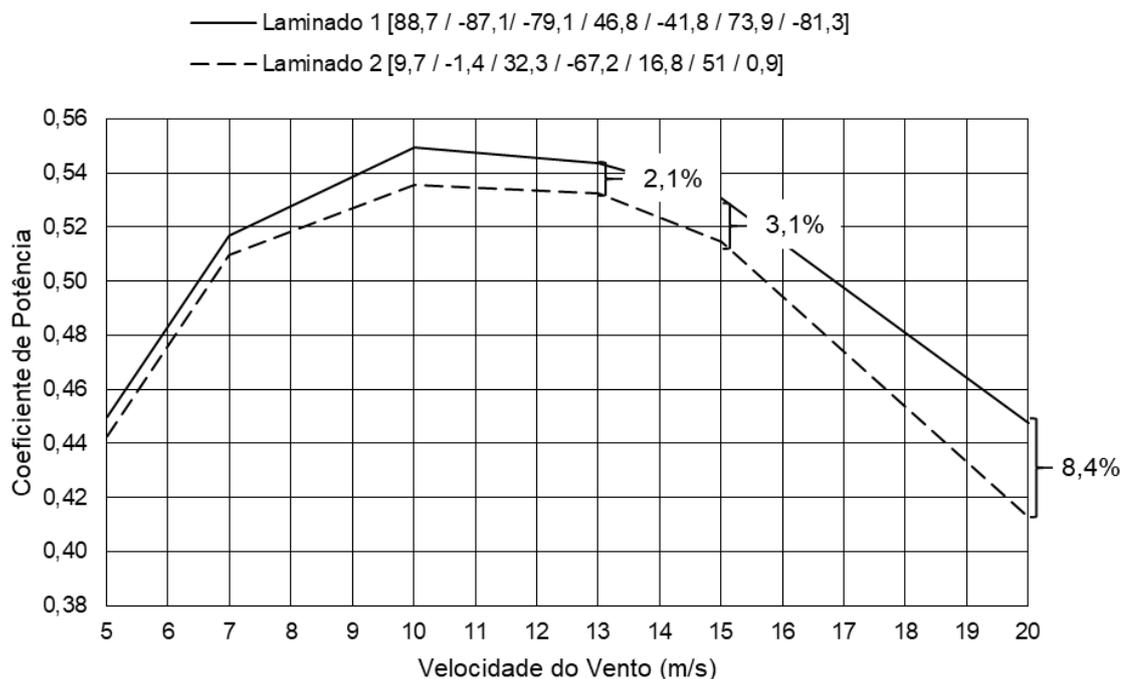


Fonte: Autoria própria

Para avaliar a eficiência da metodologia proposta, aplicou-se a mesma três vezes consecutivas ao problema em questão, sendo que em cada aplicação um novo conjunto de pontos iniciais (DoE) foi gerado. Assim, foi possível verificar o ganho real de utilizar a metodologia proposta nesse trabalho. A melhoria média da resposta da função objetivo obtida em relação ao melhor valor encontrado no DoE foi de 0,6%. Essa melhoria é pequena, porém é importante destacar que esse valor é meramente representativo pois avalia o somatório de C_p em somente três diferente velocidades.

Para realizar uma avaliação do ganho na potência gerada, seleciona-se a configuração de laminado que apresentou o maior e menor valor de $\sum C_p$, denominados Laminado 1 e Laminado 2, respectivamente. A curva de C_p desses laminados é representada na Figura 38. É possível notar que a aplicação adequada dos conceitos de *aeroelastic tailoring* podem gerar ganhos consideráveis em um projeto de uma pá de turbina eólica laminada, principalmente para velocidades de vento superiores a velocidade nominal de projeto (10 m/s). A uma velocidade de vento de 13 m/s a diferença pode chegar a 2,1%, considerando uma velocidade de vento 15 m/s essa diferença atinge 3,1%, por fim, com 20 m/s encontra-se uma diferença de até 8,4% entre os laminados.

Figura 38 - Curvas de C_p em função da velocidade do vento para uma configuração otimizada e outra não otimizada



Fonte: Autoria própria

Esse ganho no coeficiente de potência é obtido somente com a redefinição da sequência de laminação, não são necessários investimentos ou custos adicionais no processo, basta que seja realizada uma mudança no processo de fabricação.

O aumento no coeficiente de potência obtido utilizando os conceitos de *aeroelastic tailoring* corroboram com os resultados do trabalho de Veers, Lobitz e Bir (1998), os quais afirmam que a aplicação dos conceitos de *aeroelastic tailoring* podem gerar um ganho de 5 a 10% na potência.

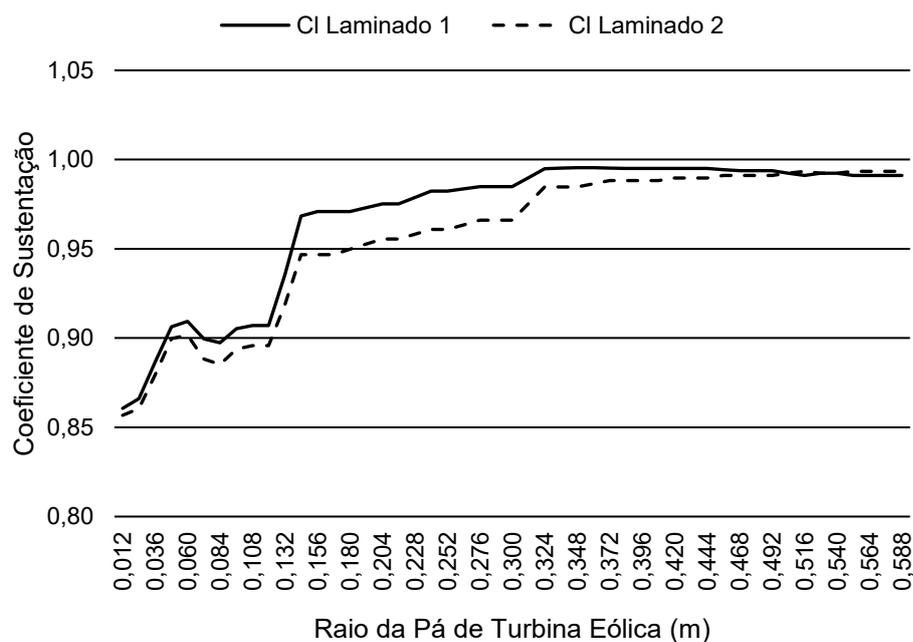
Além de Veers, Lobitz e Bir (1998), os trabalhos de Maheri, Noroozi e Vinney (2007) e Barr e Jaworski (2019) encontraram ganhos de rendimento de até 15% em algumas faixas de operação da turbina. Todos esses trabalhos aplicaram os conceitos de *aeroelastic tailoring* de uma maneira similar, mas não igual ao trabalho em questão. Esses trabalhos utilizam o conceito de adaptação passiva buscando reduzir os carregamentos máximos para se aumentar o diâmetro do rotor.

O trabalho em questão utiliza a deformação passiva de forma a fazer com que a pá de turbina esteja com o ângulo de ataque em faixas de operação que fornecem maiores coeficientes de sustentação e menores coeficientes de arrasto, gerando mais torque no eixo, e, por consequência, elevando a potência gerada. Deilmann (2009)

aplicou essa mesma metodologia, encontrando o ganho de rendimento de até 6% para algumas faixas de operação.

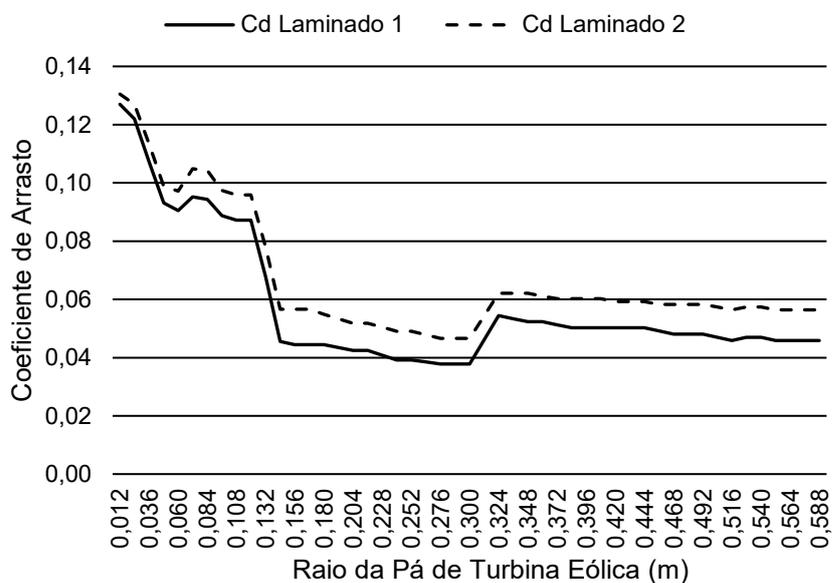
A diferença no coeficiente de sustentação e arrasto que acaba por gerar mais torque na turbina pode ser vista na Figura 39 e Figura 40. Essas figuras mostram uma comparação entre o C_l e C_d do laminado 1 e laminado 2 ao longo da pá para uma velocidade de vento de 20 m/s. Nota-se que o C_l , responsável por elevar o torque gerado na turbina, é maior no laminado 1, chegando a apresentar uma diferença de até 2,54% em algumas secções. Já o C_d , responsável por reduzir o torque gerado pela turbina é maior no laminado 2, apresentando uma diferença de até 21,55% em relação ao laminado 1.

Figura 39 - Coeficiente de sustentação para o Laminado 1 e o Laminado 2 em função do raio da pá da turbina (velocidade do vento de 20 m/s)



Fonte: Autoria própria

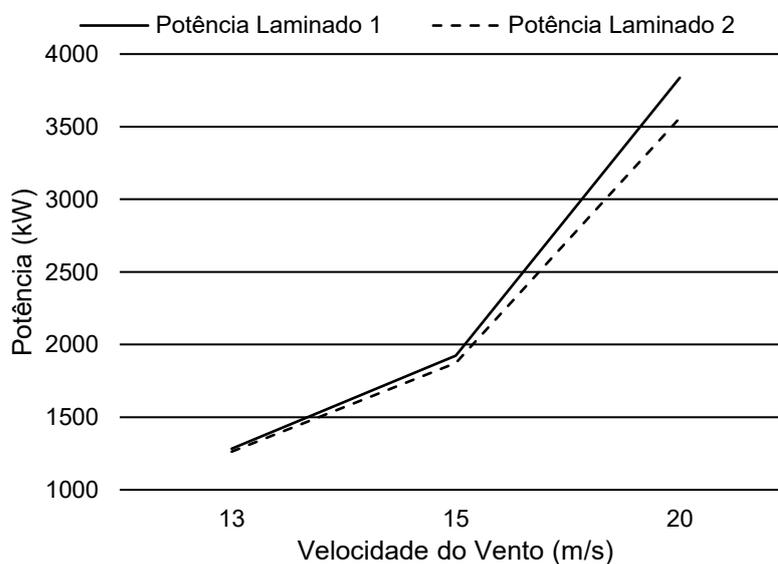
Figura 40 - Coeficiente de arrasto para o Laminado 1 e o Laminado 2 em função do raio da pá da turbina (velocidade do vento de 20 m/s)



Fonte: Autoria própria

Ao analisar a diferença na potência gerada pelas turbinas construídas com pás com configuração do Laminado 1 e Laminado 2 verifica-se que a mesma acompanha os ganhos verificados no C_p , apresentando maiores diferenças entre os laminados nas regiões de velocidade mais elevada, a Figura 41 representa essa diferença nas curvas de potência em velocidades de vento superiores a 13 m/s, velocidade a partir da qual se observa os maiores ganhos de potência.

Figura 41 - Potência do Laminado 1 e do Laminado 2 em função da velocidade do vento



Fonte: Autoria própria

A aplicação da adaptação passiva buscando elevar o C_p para velocidades de vento superiores à velocidade nominal de projeto gera um efeito que pode ser considerado indesejado, que é o aumento do carregamento para o qual a pá foi projetada.

Essa elevação no carregamento é representada na Tabela 4. Na tabela tem-se o torque gerado no eixo e a força normal média no laminado 1 e laminado 2 a uma velocidade de vento de 20 m/s. Nota-se que há uma diferença de cerca de 1,7 Nm no torque e 0,8 N na força normal, em termos absolutos são valores pequenos frente ao ganho de eficiência obtido. Porém, é necessário que haja ao menos uma verificação estrutural, etapa não contemplada no presente trabalho.

Tabela 4 - Esforços na pá de turbina

Configuração	Torque no eixo (N m)	Força normal total (N)
Laminado 1	25,05	348,2
Laminado 2	23,30	347,4

Fonte: Autoria própria

Conforme mencionado anteriormente, um dos problemas na avaliação de projetos de pás de turbinas eólicas é o elevado esforço computacional necessário. A avaliação experimental do comportamento da pá de turbina eólica em uma determinada velocidade de vento leva cerca de 5 minutos, essa avaliação inclui todo o processo de cálculo, desde a simulação estrutural até o cálculo de C_p com as iterações necessárias. O computador utilizado possui com processador Intel Core I5 2,5 GHz e 8 GB de memória RAM.

O número de variáveis de entrada para o problema em questão eram sete, que são, os ângulos de orientação das fibras de cada camada, considerando que esses ângulos podem variar de -90° a $+90^\circ$ em intervalos de um grau, tem-se 180^7 combinações possíveis de laminados, para verificar todas essas combinações em busca da sequência ótima para uma única velocidade de vento seria necessário milhares de anos.

A metodologia proposta na Seção 3 deste trabalho permitiu obter a sequência ótima de laminação após cerca de 26 iterações, ou seja, aproximadamente duas horas, esses dados corroboram com a afirmativa de que é necessário desenvolver

uma metodologia mais rápida para projetos de pás de turbinas eólicas e que a aplicação de metamodelagem combinada com uma técnica de otimização pode gerar resultados bastante satisfatórios.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresenta as principais conclusões resultantes da presente pesquisa, bem como propostas de trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

Na presente dissertação uma metodologia para otimização de pás de turbinas eólicas compósitas é desenvolvida e testada. Tal metodologia foi baseada no desenvolvimento de um metamodelo de funções de base radial, após a construção do metamodelo aplica-se o método de otimização desenvolvido por Regis e Schoemaker (2007). O modelo experimental desenvolvido pelo método dos elementos finitos foi integrado ao método de otimização através de rotinas em Matlab e Python, as quais permitiram realizar as análises de maneira automatizada.

Os resultados da otimização de uma pá de turbina eólica compósita encontrados foram considerados satisfatórios permitindo o aumento da eficiência da turbina somente com a alteração da sequência de laminação.

A metodologia proposta parece ter superado o problema de elevado custo computacional, pois permite a obtenção da sequência ótima de laminação após cerca de 26 experimentos computacionais (simulações). Esse valor é baixo, considerando o fato que existem milhões de combinações possíveis. Isso representa um ganho significativo de tempo na busca de um projeto ótimo para uma pá de turbina eólica.

O metamodelo de RBF mostrou ser adequado para essa aplicação, apresentando boa precisão na previsão dos resultados do modelo experimental, permitindo uma avaliação rápida do modelo experimental em todo o domínio com elevada confiabilidade.

Por fim, a aplicação dos conceitos de *aeroelastic tailoring* pode proporcionar uma melhoria no C_p de turbinas de pás eólicas, os maiores ganhos de C_p ocorrem em velocidades de vento superiores velocidade nominal de projeto. Esse valor vai crescendo continuamente com o aumento da velocidade, a diferença entre aplicar corretamente os conceitos de *aeroelastic tailoring* e um pá de turbina com uma sequência de laminação ineficiente chega a 8,4% em velocidades de vento mais elevadas.

Destaca-se ainda que os conceitos aqui utilizados são aplicáveis a turbinas com baixa capacidade de geração, onde os carregamentos não são elevados. No

caso de aplicações para grandes turbinas pode ser mais interessante aplicar o *aeroelastic tailoring* com o objetivo de reduzir o carregamento para se aumentar o diâmetro do rotor, conforme exposto em alguns dos trabalhos de referência.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros sugere-se:

- Realizar a otimização de pás de turbinas eólicas com diferentes metamodelos, por exemplo KRG, Redes Neurais, e comparar a eficiência entre os mesmos;
- Refinar o modelo estrutural da pá de turbina eólica considerando perfil espesso e longarina;
- Aplicar a mesma metodologia com o objetivo de reduzir o carregamento para elevar a potência da turbina através do aumento do diâmetro do rotor;
- Realizar a otimização e refinamento sequencial do metamodelo utilizando outros métodos e compará-los;
- Verificar a possível aplicação da metodologia em turbinas de elevada capacidade de produção energética.

REFERÊNCIAS

ABAQUS Version 6.10 Documentation. Dassault Systèmes Simulia Corp, 2010.

ALMEIDA M. S., **Implementação Computacional Para Desenvolvimento de Pás de Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal**. 137f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Ceará. 2013.

ANEEL- Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa N°482 de 17 de abril de 2012**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 15 de fev. de 2020.

ARORA, J. **Introduction to Optimum Design**. 3. ed. San Diego: Academic Press, 2012.

BARLAS, T. K.; KUIK, G. V. State of the art and prospective of smart rotor control for wind turbines. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 75, p. 1-20, 2007.

BARR, S. M.; JAWORSKI, J. W. Optimization of tow-steered composite wind turbine blades for static aeroelastic performance. **Renewable Energy**. v. 139, p. 859-872, 2019.

BLOM, A. W.; SETOODEH, S.; HOL, J. M. A. M.; GÜRDAL, Z. Design of variable-stiffness conical shells for maximum fundamental eigenfrequency. **Computers and Structures**, v. 86, n. 9, p. 870–878, 2008.

BISAGNI, C.; LANZI L. Post-buckling optimization of composite stiffened panels using neural networks. **Composite Structures**, v. 58, p. 237–247, 2002.

BROOMHEAD, D.S; LOEWE, D. Multivariate functional interpolation and adaptive networks. **Complex Systems**, v.2, p. 321–55, 1988.

DEILMANN, C. **Passive Aeroelastic Tailoring of Wind Turbine Blades - A Numerical Analysis**.76 f. Dissertação (Mestrado). Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 2009.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2019**, 2019. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-470/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%20BEN%202019%20Ano%20Base%202018.pdf>>. Acesso em 30 de mar. de 2020.

FORRESTER, A.I.J.; SÓBESTER, A.; KEANE, A.J. **Engineering Design Via Surrogate Modelling: A Practical Guide**. 1 ed. Pondicherry, India: John Wiley & Sons, 2008.

GALLAGHER, R.H.; ZIENKIEWICZ, O.C. **Optimum Structural Design: Theory and Applications**. London: John Wiley and Sons. 1. ed. 1973.

GIBSON, L.J.; ASHBY M. **Cellular Solids: Structure and Properties**. 1ed. Oxford: Pergamon Press, 1988.

GWEC - GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global Wind Report 2019**, 2019. Disponível em: <<https://gwec.net/global-wind-report-2018/>>. Acesso em: 09 de jan. de 2020.

HUSSIAN, M.F.; BURTON R.R.; JOSHI S.B. Metamodeling: radial basis function, versus polynomials. **European Journal of Operational Research**, v.138, p.142-154, 2002.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Balances 2019**, 2019. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-2019>>. Acesso em 30 de mar. de 2020.

IRA, H.; ABBOTT; ALBERT E.; DOENHOFF V; STIVERS L. S.; **Summary of Airfoil Data**, National Advisory Committee for Aeronautics, Report. 824, 1945.

IRISARRI, F.X; LAURIN, F.; LEROY F.H.; MAIRE J.F. Computational strategy for multiobjective optimization of composite stiffened panels. **Composite Structures**, v. 93, p. 1158–1167, 2011.

JONES, R.M., **Mechanics of Composite Materials**. 2.ed. Philadelphia: Taylor & Francis. 1999.

KITAYAMA, S.; SRIRAT, J.; ARAKAWA, M.; YAMAZAKI, K. Sequential approximate multi-objective optimization using radial basis function network. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 48, n. 3, p. 501–515, 2013.

LANZI, L.; GIAVOTTO, V. Post-buckling optimization of composite stiffened panels: Computations and experiments. **Composite Structures**, v. 73, n. 2, p. 208–220, 2006.

LEITE, I.T.; FERREIRA J.V.; **Prova de Conceito de Controle Passivo de Ângulo de Arfagem em Pás de Microgeradores Eólicos**. 70f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2019.

MACPHEE, W. D.; BEYENE, A., Performance Analysis of a Small Wind Turbine Equipped with Flexible Blade. **Renewable Energy**, v. 132, p. 497-508, 2018.

MAHERI, A.; NOROOZI, S; VINNEY, J., Application of combined analytical/FEA coupled aero-structure simulation in design of wind turbine adaptive blades. **Renewable Energy**, v.32, n. 12, p.2011-2018, 2007.

MANWELL J. F.; MCGOWAN J. G.; ROGERS A. L.; **Wind Energy Explained: Theory, Design and Application**. 2.Ed. USA: Wiley, 2009.

MCKAY, M.D.; BECHMAN, R.J.; CONOVER, W.J.; A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. **Technometrics**, v. 21, n.2, p. 239–245, 1979.

MUELLER J. **User Guide For Modularized Surrogate Model Toolbox**. Department of Mathematics, Tampere University of Technology, Tampere, Finland. 2012.

MUELLER, J. **Surrogate Model Algorithms for Computationally Expensive Black-Box Global Optimization Problems**. 276f. Tese de Doutorado -Tampere University of Technology. 2012.

MYERS, R.H., MONTGOMERY, D.C., ANDERSSON-COOK, C.M. **Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments**. 3 ed. Hoboken, New Jersey, USA: Wiley.Olsson. 2008.

NIK, M. A.; FAYAZBAKHS, K.; PASINI, D.; LESSARD, L. A comparative study of metamodeling methods for the design optimization of variable stiffness composites. **Composite Structures**, v. 107, p. 494–501, 2014.

NOYES, C.; QIN, C.; LOTH, E. Analytic analysis of load alignment for coning extreme-scale rotors. **Wind Energy**, v.23, n. 3, p. 1–13, 2019.

REDDY, J.N. **Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells: Theory and Analysis**. 2. ed. USA: Boca Raton, 2004.

REGIS, R.G. and SCHOEMAKER, C.A. A stochastic radial basis function method for the global optimization of expensive functions. **Journal on Computing**, v. 19: p. 497–509, 2007.

RIKARDS, R.; ABRAMOVICH H.; KALNINS K.; AUZINS J. Surrogate modeling in design optimization of stiffened composite shells. **Composite Structures**, v. 73, p. 244–251, 2006.

RODRIGUES, M. T. **Otimização ao Impacto de Estruturas do Tipo Honeycomb via Funções de Base Radial**. 99 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

RYBERG, A.; BÄCKRYD, R. D.; NILSSON, L. **Metamodel-Based Multidisciplinary Design Optimization for Automotive Applications**. 1 ed. Linköping: LiU-Tryck, 2012.

SABIDO A.; BAHAMONDE L.; HARIK R.; TOOREN M. J. Van, Maturity assessment of the laminate variable stiffness design process. **Composite Structures**, v. 160, p. 804-812, 2017.

SHIRK, H.M.; HERTZ H. T.; Aeroelastic Tailoring—Theory, Practice, and Promise. **Journal Aircraft**. V. 23, n. 1, p. 6-18, 1988.

VEERS, P.; LOBITZ, D.; BIR, G.; Aeroelastic tailoring in wind-turbine blade applications. **Windpower**, American Wind Energy Association Meeting and Exhibition, Bakersfield, California, 28 de Abril - 1 de Maio, 1998.

WANG G.; SHAN S., Review of metamodeling techniques in support of engineering design optimization. **Journal of Mechanical Design**, v. 129, n. 4, p. 370-380, 2007.

APÊNDICE A – Termos da matriz ABD

Os termos da matriz de rigidez \bar{Q} , que relaciona tensões e deformações no plano para uma lâmina, podem ser expressos pelas equações (REDDY, 2004):

$$\begin{aligned}
 \bar{Q}_{11} &= Q_{11} \cos^4 \theta + 2(Q_{11} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22} \sin^4 \theta \\
 \bar{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{12}(\sin^4 \theta \cos^4 \theta) \\
 \bar{Q}_{22} &= Q_{11} \sin^4 \theta + 2(Q_{11} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22} \cos^4 \theta \\
 \bar{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \cos \theta \sin^3 \theta \\
 \bar{Q}_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \cos \theta \sin^3 \theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta \\
 \bar{Q}_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{66} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta)
 \end{aligned} \tag{60}$$

onde,

$$\begin{aligned}
 Q_{11} &= \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\
 Q_{12} &= \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\
 Q_{22} &= \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\
 Q_{66} &= G_{12}
 \end{aligned} \tag{61}$$

sendo, E_1 o módulo de elasticidade do material na direção das fibras da lâmina, E_2 o módulo de elasticidade do material na direção perpendicular as fibras, ν o coeficiente de Poisson, G_{12} o módulo de elasticidade transversal e θ o ângulo de orientação das fibras da lâmina em relação ao eixo x .

Os termos da matriz **ABD** podem ser expressos por:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}) \tag{62}$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (\overline{Q_{ij}})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \quad (63)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (\overline{Q_{ij}})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad (64)$$