

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia UFMG
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Christiano Pagung Neto

**DESENVOLVIMENTO DE TURBINAS EÓLICAS COM GEOMETRIA BIO-INSPIRADA E USO
DE PERFIS AERODINÂMICOS GERADOS POR MÉTODOS HEURÍSTICOS**

Belo Horizonte
2022

Christiano Pagung Neto

**DESENVOLVIMENTO DE TURBINAS EÓLICAS COM GEOMETRIA BIO-INSPIRADA E USO
DE PERFIS AERODINÂMICOS GERADOS POR MÉTODOS HEURÍSTICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Dr. Rudolf Huebner

Belo Horizonte

2022

P139d

Pagung Neto, Christiano.

Desenvolvimento de turbinas eólicas com geometria bio-inspirada e uso de perfis aerodinâmicos gerados por métodos heurísticos [recurso eletrônico] / Christiano Pagung Neto. - 2022.

1 recurso online (86 f.: il.,color.) : pdf.

Orientador: Rudolf Huebner.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 84-86.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Otimização - Teses. 3. Energia eólica - Teses. 4. Algoritmos genéticos - Teses. I. Huebner, Rudolf.
II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.
III. Título.

CDU: 621(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

DESENVOLVIMENTO DE TURBINAS EÓLICAS COM GEOMETRIA BIO-INSPIRADA E USO DE PERFIS AERODINÂMICOS GERADOS POR MÉTODOS HEURÍSTICOS

CHRISTIANO PAGUNG NETO

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, constituída pelos Professores: Dr. Rudolf Huebner (Orientador – Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Ricardo Poley Martins Ferreira (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG) e Dr. Guilherme de Souza Papini (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Projeto e Sistemas**".

Dissertação aprovada no dia 25 de março de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Rudolf Huebner, Professor do Magistério Superior**, em 20/04/2022, às 12:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Poley Martins Ferreira, Professor do Magistério Superior**, em 20/04/2022, às 15:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Guilherme de Souza Papini, Membro**, em 04/05/2022, às 19:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1340210** e o código CRC **FAA2BECF**.

AGRADECIMENTOS

Agradecer primeiramente ao meu orientador, professor Rudolf Huebner, pelo apoio principalmente nas etapas mais complicadas desse projeto.

Também agradeço meus pais, Aderbal e Rosana, e minha irmã Victoria por todo apoio durante esse período.

RESUMO

O uso de energias renováveis vem ganhando importância nos últimos anos. Uma dessas fontes de energia que também vem crescendo é o aproveitamento de energia eólica. Um exemplo é a aprovação em fevereiro de 2022 em mais sete usinas eólicas a serem construídas na Bahia com apoio do BNDES. A melhoria desse aproveitamento é de extrema importância para a sociedade tanto em âmbito ambiental como em âmbito econômico. Existem duas abordagens de melhoria de ganhos para turbinas eólicas: localização e projeto da turbina. Esse trabalho se propõe a expandir a segunda abordagem. Para isso, serão utilizadas três técnicas de melhoria de geometria a fim de obter uma geometria ótima. Inicialmente é escolhida uma turbina eólica comercial para definir os parâmetros de escoamento. Em seguida, utilizando o método de *momentum* de elemento de pá (BEMM) será criada uma geometria primária utilizando os melhores NACAs para cada seção de pá. Logo após, é introduzida em cada geometria o enflexamento proveniente de alguma das sementes selecionadas e uma segunda geometria é calculada. O uso desse enflexamento será analisado ao longo do comprimento da pá pois, apesar de reduzir algumas formas de arrasto, ele também reduz sustentação. Por fim, utilizando o método de algoritmo genético, serão criadas geometrias de perfil para cada seção. De posse dessas geometrias, pode-se criar geometrias finais de turbina baseadas em cada semente estudada. Os resultados finais demonstram um ganho de potência significativo com o uso dessa metodologia. Para o melhor dos casos o ganho é de quase o dobro de potência para mesmas condições de escoamento da turbina comercial. Após os resultados teóricos, ocorre validação utilizando software comercial de fluido-dinâmica computacional (CFD). Os resultados de CFD obtidos ajudam a corroborar os resultados, apresentando diferença final de potência de menos de 10%. Essa diferença pode ser atribuída ao método empregado de compensação de enflexamento associado ao BEMM ou de outros fenômenos aerodinâmicos tridimensionais não considerados. Pode-se concluir ao final, que as geometrias finais realmente apresentam um ganho de potência de aproximadamente 4% em relação as geometrias otimizadas utilizando NACAs. Ainda assim, mais estudos de validação devem ser realizados pois algumas dimensões de análise não foram consideradas nesse método.

Palavras-chave: otimização topológica, energia eólica, BEMM, Algoritmo genético, CFD

ABSTRACT

The use of renewable energy has gained importance in recent years. One of these energy sources that is also growing is wind energy. The use of this source is extremely important for society both in the environmental and in the economic sphere. There are two approaches to improving gains for wind turbines: location and turbine design. This work proposes to expand on the second approach. For this, three geometry improvement techniques will be used in order to obtain an optimal geometry. Initially, a commercial wind turbine is chosen to define the flow parameters. Then, using the blade element momentum method (BEMM) a primary geometry will be created using the best NACA's for each blade section. Soon after, the sweep from selected seeds is introduced in each geometry, and a second geometry is calculated. The use of this sweep will be analyzed along the length of the blade, because, despite reducing some forms of drag, it also reduces lift. Finally, using the genetic algorithm method, profile geometries for each section will be created. With these geometries in hand, it is possible to create final turbine geometries based on each studied seed. The final results demonstrate a significant power gain with the use of this methodology. For the best case, the gain is almost double the power for the same flow conditions as the commercial turbine. After the theoretical results, validation takes place using commercial computational fluid dynamics (CFD) software. The CFD results obtained help to corroborate the results, even considering a certain final difference in potency. This difference can be attributed to the method employed of sweep compensation within BEMM or other three-dimensional aerodynamic phenomena not considered. In the end, it can be concluded that the final geometries actually present a significant power gain. Even so, further validation studies should be carried out as some dimensions of analysis were not considered in this method.

Keywords: topology optimization, wind energy, BEMM, Genetic Algorithm, CFD

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Turbinas HAWT e VAWT	17
Figura 2.2 – Ilustração do modelo de disco atuador	18
Figura 2.3 – Nomenclatura geométrica de um perfil aerodinâmico	20
Figura 2.4 – Nomenclatura aerodinâmica de um perfil	21
Figura 2.5 – C_l x α de um perfil NACA2412	22
Figura 2.6 – escoamento oblíquo em uma asa	23
Figura 2.7 – Ilustração dos elementos de pá	25
Figura 2.8 – Esquemática geral do método de algoritmo genético	29
Figura 3.1 – Diagrama de resumo da metodologia do trabalho	32
Figura 3.2 – Divisão da pá em seções	33
Figura 3.3 – Semente da <i>Acer Campestre</i>	34
Figura 3.4 – Semente da <i>Acer Platanoides</i>	35
Figura 3.5 – Semente da <i>Acer Pseudoplatanus</i>	35
Figura 3.6 – Intervalos de variação dos pontos de controle do perfil NACA 0012	36
Figura 3.7 – Esquemático de aplicação do algoritmo genético	38
Figura 3.8 – Representação do volume de controle	40
Figura 4.1 – Razão de velocidade na ponta da pá vs. Coeficiente de Potência	42
Figura 4.2 – Comprimento de corda em função da posição da pá	42
Figura 4.3 – Valores dos ângulos de ataque e <i>pitch</i> em função da posição da pá	43
Figura 4.4 – Número de Reynolds em função da posição da pá	43
Figura 4.5 – Número de Mach em função da posição da pá	44
Figura 4.6 – Vistas da primeira geometria de turbina	45
Figura 4.7 – <i>Tracing</i> da semente <i>Acer Campestre</i>	46
Figura 4.8 – Enflexamento local por posição na pá para semente <i>Acer Campestre</i>	46
Figura 4.9 – <i>Tracing</i> da semente <i>Acer Platanoides</i>	47
Figura 4.10–Enflexamento local por posição na pá para semente <i>Acer Platanoides</i>	48
Figura 4.11– <i>Tracing</i> da semente <i>Acer Pseudoplatanus</i>	49
Figura 4.12–Enflexamento local por posição na pá para semente <i>Acer Pseudoplatanus</i>	49
Figura 4.13– C_p em função do ponto início do enflexamento da pá para <i>Acer Campestre</i>	51
Figura 4.14–Comprimento de corda em função da posição da pá para turbina com enflexamento da <i>Acer Campestre</i>	51
Figura 4.15–Valores dos ângulos de ataque e <i>pitch</i> em função da posição da pá para turbina com enflexamento da <i>Acer Campestre</i>	52
Figura 4.16–Número de Reynolds em função da posição da pá para turbina com enflexamento da <i>Acer Campestre</i>	52
Figura 4.17–Número de Mach em função da posição da pá para turbina com enflexamento da <i>Acer Campestre</i>	53
Figura 4.18– C_p em função do ponto início do enflexamento da pá para <i>Acer Platanoides</i>	54

Figura 4.19–Comprimento de corda em função da posição da pá para turbina com enflexamento da <i>Acer Platanoides</i>	54
Figura 4.20–Valores dos ângulos de ataque e <i>pitch</i> em função da posição da pá para turbina com enflexamento da <i>Acer Platanoides</i>	55
Figura 4.21–Número de Reynolds em função da posição da pá para turbina com enflexamento da <i>Acer Platanoides</i>	55
Figura 4.22–Número de Mach em função da posição da pá para turbina com enflexamento da <i>Acer Platanoides</i>	56
Figura 4.23– C_p em função do ponto início do enflexamento da pá para <i>Acer Pseudoplatanus</i>	57
Figura 4.24–Comprimento de corda em função da posição da pá para turbina com enflexamento da <i>Acer Pseudoplatanus</i>	57
Figura 4.25–Valores dos ângulos de ataque e <i>pitch</i> em função da posição da pá para turbina com enflexamento da <i>Acer Pseudoplatanus</i>	58
Figura 4.26–Número de Reynolds em função da posição da pá para turbina com enflexamento da <i>Acer Pseudoplatanus</i>	58
Figura 4.27–Número de Mach em função da posição da pá para turbina com enflexamento da <i>Acer Pseudoplatanus</i>	59
Figura 4.28–Curvas de Bézier e intervalos de variação de pontos para NACA 2214	61
Figura 4.29–Histórico evolutivo de geometria do perfil para raiz da pá - <i>Acer Campestre</i> .	61
Figura 4.30–Histórico evolutivo de geometria do perfil para meio da pá - <i>Acer Campestre</i>	62
Figura 4.31–Histórico evolutivo de geometria do perfil para ponta da pá - <i>Acer Campestre</i>	62
Figura 4.32–Histórico evolutivo de geometria do perfil para raiz da pá - <i>Acer Platanoides</i>	64
Figura 4.33–Histórico evolutivo de geometria do perfil para meio da pá - <i>Acer Platanoides</i>	65
Figura 4.34–Histórico evolutivo de geometria do perfil para ponta da pá - <i>Acer Platanoides</i>	65
Figura 4.35–Histórico evolutivo de geometria do perfil para raiz da pá - <i>Acer Pseudoplatanus</i>	67
Figura 4.36–Histórico evolutivo de geometria do perfil para meio da pá - <i>Acer Pseudoplatanus</i>	68
Figura 4.37–Histórico evolutivo de geometria do perfil para ponta da pá - <i>Acer Pseudoplatanus</i>	68
Figura 4.38–Comprimento de corda em função da posição da pá para turbina <i>Acer Campestre</i> final	70
Figura 4.39–Valores dos ângulos de ataque e <i>pitch</i> em função da posição da pá para turbina <i>Acer Campestre</i> final	70
Figura 4.40–Número de Reynolds em função da posição da pá para turbina <i>Acer Campestre</i> final	70
Figura 4.41–Número de Mach em função da posição da pá para turbina <i>Acer Campestre</i> final	71
Figura 4.42–Vistas da turbina eólica - <i>Acer Campestre</i>	72
Figura 4.43–Comprimento de corda em função da posição da pá para turbina <i>Acer Platanoides</i> final	72

Figura 4.44–Valores dos ângulos de ataque e <i>pitch</i> em função da posição da pá para turbina <i>Acer Platanoides</i> final	73
Figura 4.45–Número de Reynolds em função da posição da pá para turbina <i>Acer Platanoides</i> final	73
Figura 4.46–Número de Mach em função da posição da pá para turbina <i>Acer Platanoides</i> final	74
Figura 4.47–Vistas da turbina - <i>Acer Platanoides</i>	75
Figura 4.48–Comprimento de corda em função da posição da pá para turbina <i>Acer Pseudoplatanus</i> final	76
Figura 4.49–Valores dos ângulos de ataque e <i>pitch</i> em função da posição da pá para turbina <i>Acer Pseudoplatanus</i> final	76
Figura 4.50–Número de Reynolds em função da posição da pá para turbina <i>Acer Pseudoplatanus</i> final	77
Figura 4.51–Número de Mach em função da posição da pá para turbina <i>Acer Pseudoplatanus</i> final	77
Figura 4.52–Vistas da turbina - <i>Acer Pseudoplatanus</i>	78
Figura 4.53–Simulações de esteira para turbina <i>Acer Campestre</i> final	80
Figura 4.54–Simulações de Malha para turbina <i>Acer Campestre</i> final	81
Figura 4.55–Simulações de esteira para turbina <i>Acer Pseudoplatanus</i> final	82
Figura 4.56–Simulações de Malha para turbina <i>Acer Pseudoplatanus</i> final	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Turbina eólica AWP 3.7 - African Windpower	33
Tabela 4.1 – Estimativas iniciais para início da primeira geometria	41
Tabela 4.2 – Dados da primeira geometria de turbina	44
Tabela 4.3 – Dados da segunda geometria de turbina - <i>Acer Campestre</i>	53
Tabela 4.4 – Dados da segunda geometria de turbina - <i>Acer Platanoides</i>	56
Tabela 4.5 – Dados da segunda geometria de turbina - <i>Acer Pseudoplatanus</i>	59
Tabela 4.6 – Dados da segunda geometria de turbina por seção - <i>Acer Campestre</i>	60
Tabela 4.7 – Pontos de Controle - NACA 2214	60
Tabela 4.8 – Dados aerodinâmicos dos perfis GA - <i>Acer Campestre</i>	63
Tabela 4.9 – Dados da segunda geometria de turbina por seção - <i>Acer Platanoides</i>	64
Tabela 4.10–Dados aerodinâmicos dos perfis GA - <i>Acer Platanoides</i>	66
Tabela 4.11–Dados da segunda geometria de turbina por seção - <i>Acer Pseudoplatanus</i>	67
Tabela 4.12–Dados aerodinâmicos dos perfis GA - <i>Acer Pseudoplatanus</i>	69
Tabela 4.13–Dados de desempenho da turbina - <i>Acer Campestre</i>	71
Tabela 4.14–Dados de desempenho da turbina - <i>Acer Platanoides</i>	75
Tabela 4.15–Dados de desempenho da turbina - <i>Acer Pseudoplatanus</i>	78
Tabela 4.16–Resumo de desempenho das turbinas	79
Tabela 4.17–Parâmetros fixos - Simulações de Esteira - <i>Acer Campestre</i>	80
Tabela 4.18–Resultados - Simulações de Esteira - <i>Acer Campestre</i>	80
Tabela 4.19–Parâmetros fixos - Simulações de Refinamento de Malha - <i>Acer Campestre</i>	81
Tabela 4.20–Resultados - Simulações de Malha - <i>Acer Campestre</i>	81
Tabela 4.21–Análise GRI - <i>Acer Campestre</i>	82
Tabela 4.22–Parâmetros fixos - Simulações de Esteira - <i>Acer Pseudoplatanus</i>	82
Tabela 4.23–Resultados - Simulações de Esteira - <i>Acer Pseudoplatanus</i>	83
Tabela 4.24–Parâmetros fixos - Simulações de Refinamento de Malha - <i>Acer Pseudoplatanus</i>	83
Tabela 4.25–Resultados - Simulações de Malha - <i>Acer Pseudoplatanus</i>	83
Tabela 4.26–Análise GRI - <i>Acer Pseudoplatanus</i>	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

HAWT	<i>Horizontal Axis Wind Turbine</i>
VAWT	<i>Vertical Axis Wind Turbine</i>
BEMM	<i>Blade Element Momentum Method</i>
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
SOGA	<i>Single Objective Genetic Algorithm</i>
MOGA	<i>Multiple Objective Genetic Algorithm</i>
CFD	<i>Computer Fluid Dynamics</i>
GRI	<i>Grid Refinement Index</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

T	Torque
U	Velocidade do escoamento
ρ	Densidade do escoamento
A	Área da turbina
\dot{m}	Fluxo mássico do escoamento
a	Coefficiente de indução axial
a'	Coefficiente de indução angular
P	Potência da turbina
C_p	Coefficiente de potência
C_T	Coefficiente de empuxo
L	Sustentação
D	Arrasto
α	Ângulo de ataque
Re	Número de Reynolds
Ma	Número de Mach
μ	Viscosidade do escoamento
C_L	Coefficiente de Sustentação
C_D	Coefficiente de Arrasto
Λ	Ângulo de enflexamento
c	Corda do perfil
y_t	Valor de meia espessura do perfil ao longo da corda
x	Porcentagem da corda
t	Espessura máxima do perfil
y_c	Valor da linha média de câmber ao longo da corda
m_c	Valor máximo de câmber em porcentagem de corda

p_c	Localização do máximo de câmber em porcentagem de corda
x_{extra}	Coordenada em x do extradorso
y_{extra}	Coordenada em y do extradorso
x_{intra}	Coordenada em x do intradorso
y_{intra}	Coordenada em y do intradorso
η	Eficiência mecânica da turbina
R	Raio da turbina eólica
r_i	raio médio da seção i da pá
N	Número de seções utilizadas no BEMM
λ	Razão de velocidades na ponta da pá
λ_r	Razão de velocidades em alguma seção da pá
ϕ	Ângulo relativo do vento
B	Número de pás da turbina
σ'	Rigidez local
F	Fator de perda da ponta
p	<i>pitch</i> local da turbina
h	Tamanho representativo da malha
ΔV	Volume de célula
ψ	Parâmetro significativo para estudo
r_{ij}	Razão de tamanhos representativos
e_a	Erro aparente
e_{ext}	Erro extrapolado
GCI	Índice de convergencia da malha

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Aerodinâmica de turbinas eólicas e perfis	17
2.1.1	Disco atuador e Limite de Betz	17
2.1.2	Aerodinâmica geral de um perfil	19
2.1.3	Correção do Enflexamento	22
2.1.4	Perfis NACA	23
2.1.5	Método de <i>Momentum</i> de elemento de pá	24
2.2	Otimização de perfis aerodinâmicos	27
2.2.1	Algoritmo Genético	28
2.2.2	Curvas de Bézier	29
2.3	CFD	30
2.3.1	Índice de Refinamento de Malha - GRI	30
3	METODOLOGIA	32
3.1	Estudo de Caso	32
3.2	Geometria Primária	33
3.3	Informações das Sementes	34
3.4	Geometria Secundária e Final	35
3.4.1	Implementação do Algoritmo Genético	37
3.4.2	Geometria final e Comparações	38
3.5	Comparações e CFD	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1	Primeira Geometria	41
4.2	Tracing das sementes	45
4.2.1	<i>Acer Campestre</i>	45
4.2.2	<i>Acer Platanoides</i>	47
4.2.3	<i>Acer Pseudoplatanus</i>	48
4.3	Segunda Geometria	50
4.3.1	<i>Acer Campestre</i>	50
4.3.2	<i>Acer Platanoides</i>	53
4.3.3	<i>Acer Pseudoplatanus</i>	56
4.4	Geometria Final	59
4.4.1	Algoritmo genético	60
4.4.1.1	<i>Acer Campestre</i>	60
4.4.1.2	<i>Acer Platanoides</i>	63

4.4.1.3	<i>Acer Pseudoplatanus</i>	66
4.4.2	BEMM	69
4.4.2.1	<i>Acer Campestre</i>	69
4.4.2.2	<i>Acer Platanoides</i>	72
4.4.2.3	<i>Acer Pseudoplatanus</i>	75
4.4.2.4	Comparações	78
4.5	CFD	79
4.5.1	<i>Acer Campestre</i>	79
4.5.1.1	Tamanho da esteira	80
4.5.1.2	Refinamento de Malha	80
4.5.2	<i>Acer Pseudoplatanus</i>	82
4.5.2.1	Tamanho da esteira	82
4.5.2.2	Refinamento de Malha	82
4.5.3	Discussão das Simulações	84
5	CONCLUSÃO	85
	REFERÊNCIAS	86

1 INTRODUÇÃO

De acordo com relatório da (IEA, 2021), no ano de 2021, o mundo sofreu um aumento de 5% da demanda de energia. Quase metade dessa demanda foi suprida por energias fósseis, ameaçando recorde de emissão de gases estufa para o ano de 2022. Esse relatório ilustra a necessidade de desenvolvimento de tecnologias verdes visando o futuro da humanidade. Uma dessas tecnologias é o uso de turbinas eólicas para geração de energia elétrica. Apesar de sua utilização vir aumentando nos últimos anos (GWEC, 2019), principalmente no Brasil (EPE, 2021), a área ainda apresenta grande potencial de melhoria (DREW; BARLOW; COCKERILL, 2013). Duas abordagens podem ser tomadas, encontrar locais novos e melhores para geração de energia eólica ou melhorar o projeto de turbinas eólicas para casos já existentes.

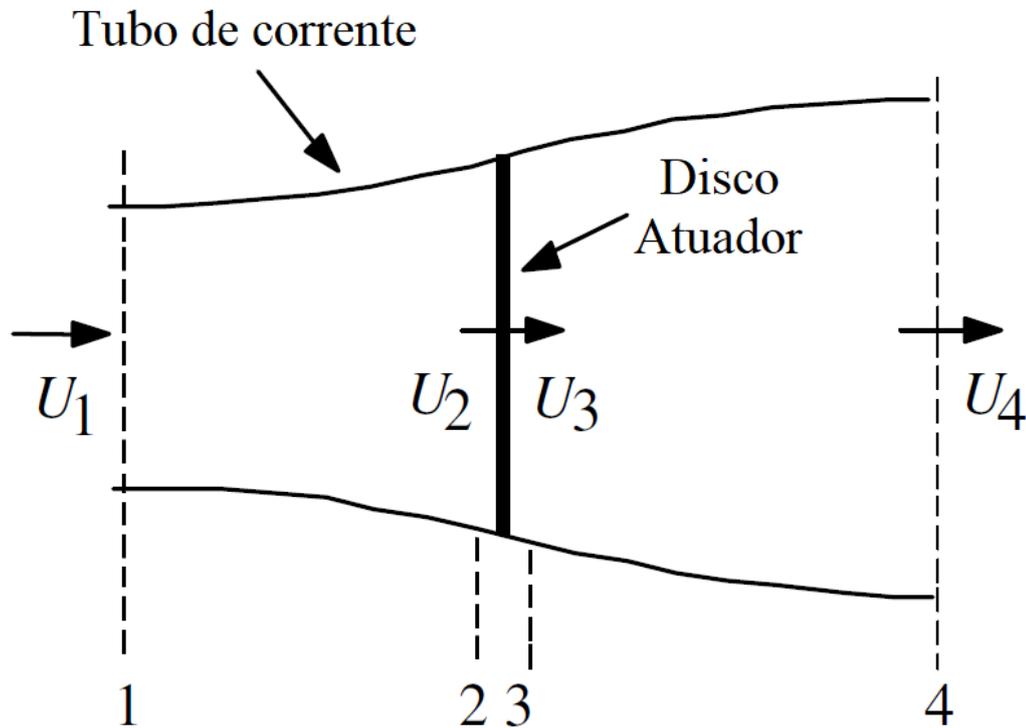
Diversos estudos já foram realizados com a finalidade de otimizar a geometria final da turbina. Métodos para melhoria da pá como um todo, (DOGAN; MARTINOPOULOS, 2015), melhoria do perfil aerodinâmico da pá (RIBEIRO; AWRUCH; GOMES, 2012) e estudos de geometrias não convencionais (JANG et al., 2019) já foram realizados. Entretanto, um caminho pouco explorado e com potencial para também encontrar melhorias é o uso do bio-mimetismo.

De acordo com (CHOI et al., 2015), bio-mimética é uma forma criativa de tecnologia que se inspira na natureza para melhorar a vida humana. O seu uso na área da aerodinâmica é datado desde a antiguidade com a criação de passáros mecânicos por Archytas na Itália antiga, (DALAMAGKIDIS, 2014). Já a procura de soluções baseadas na natureza para geração de energia eólica vem se mostrando mais tímida. O estudo de (HOLDEN; CALEY; TURNER, 2015) mostra que existe grande potencial de extração de energia eólica utilizando-se a geometria encontrada em sementes de algumas árvores. Estudos subsequentes realizados por (CHU; CHONG, 2017), (IKEDA et al., 2018) e (CHU; LAM, 2020) corroboram o potencial desse caminho.

Ao invés de olhar para a pá como um todo, outro caminho para melhoria de geometria é a melhoria dos perfis aerodinâmicos utilizados. Algoritmos heurísticos vem-se popularizando nessa vertente. Resultados obtidos por (AZEVEDO et al., 2016) e (RIBEIRO; AWRUCH; GOMES, 2012) ilustram a difusão dessas técnicas. Uma delas bem popular na geração de perfis, segundo (PEIGIN; EPSTEIN, 2004), é o método de algoritmo genético.

Finalmente, a implementação dessas diversas técnicas de otimização de geometria em conjunto são também um caminho para obtenção de uma geometria ainda melhor.

Figura 2.2 – Ilustração do modelo de disco atuador



Fonte: Adaptado de (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2002)

De acordo com (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2002), essa análise utiliza de algumas condições simplificadoras:

- escoamento homogêneo, incompressível e em regime permanente
- Sem arrasto de atrito
- Número infinito de pás na turbina
- Empuxo uniforme na região do disco
- Esteira com rotacional nulo
- Pressão estática longe do disco é igual a pressão ambiente

Utilizando a conservação da quantidade de movimento linear, o empuxo no disco, T , será igual numericamente à mudança de momentum no fluxo representado pela Equação abaixo:

$$T = U_1(\rho AU)_1 - U_4(\rho AU)_4 \quad (2.1)$$

onde ρ denota a densidade do ar, A denota a área do disco atuador e U denota a velocidade média do ar. Para escoamento em regime permanente, a Equação é simplificada para:

$$T = \dot{m}(U_1 - U_4) \quad (2.2)$$

onde \dot{m} denota o fluxo massico do escoamento. O empuxo também pode ser obtido utilizando a Equação de Bernoulli. A Equação final obtida é:

$$T = \frac{1}{2}\rho A_2(U_1^2 - U_4^2) \quad (2.3)$$

Da Equação 2.2 e 2.3 tem-se:

$$U_2 = \frac{U_1 + U_4}{2} \quad (2.4)$$

Define-se um fator de indução axial, a , como a diminuição fracionária entre a velocidade do vento no escoamento livre e no rotor:

$$a = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \quad (2.5)$$

E sendo a potência do rotor, P , o empuxo multiplicado pela velocidade, a Equação final simplificada é:

$$P = \frac{1}{2}\rho A U_\infty^3 4a(1 - a)^2 \quad (2.6)$$

Assim, pode-se definir o coeficiente de potência, C_P , como

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A U_\infty^3} = \frac{\text{Potência do rotor}}{\text{Potência do vento}} = 4a(1 - a)^2 \quad (2.7)$$

O valor máximo de C_P ocorre quando $a = \frac{1}{3}$ e é igual a:

$$C_{P,max} = \frac{16}{27} = 0,5926 \quad (2.8)$$

Esse é conhecido como Limite de Betz e quanto mais próximo o C_P de uma turbina se aproximar desse valor, mais eficiente é sua geometria.

De maneira semelhante à potência, o empuxo da turbina pode ser caracterizado por um fator adimensional utilizando a Equação 2.9:

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho A U^2} \quad (2.9)$$

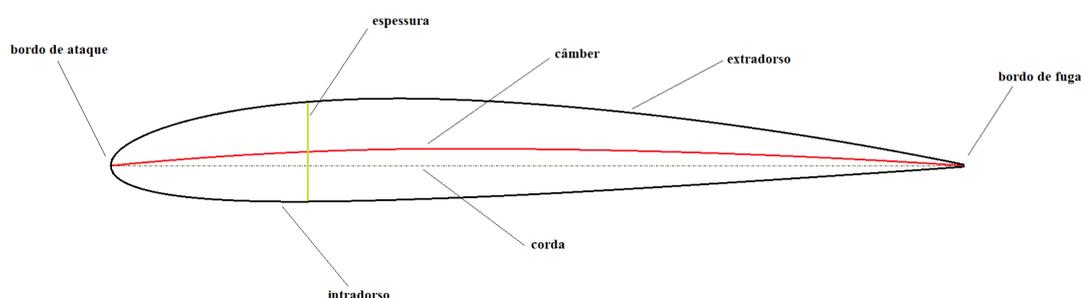
onde C_T denota o coeficiente de empuxo da turbina.

2.1.2 Aerodinâmica geral de um perfil

De acordo com (HAU, 2013), o estudo da aerodinâmica de turbinas eólicas pode ser aprofundado incluindo na análise o perfil aerodinâmico encontrado nas pás. O uso da reação aerodinâmica aumenta a eficiência e, hoje em dia, turbinas modernas são projetadas levando isso em consideração.

Para começar o estudo de perfis aerodinâmicos, algumas nomenclaturas devem ser estabelecidas. O autor utilizará a nomenclatura estabelecida pelo Comitê Nacional para Aconselhamento sobre Aeronáutica que, segundo (ANDERSON, 2001), é a nomenclatura padrão nos dias atuais. O comprimento do perfil aerodinâmico é chamado de corda (c). A linha média do perfil é chamada de câmber. A superfície superior do perfil é chamada de extradorso. A superfície inferior do perfil é chamada de intradorso. A diferença, na mesma posição de corda, entre o extradorso e o intradorso é chamada de espessura do perfil. A região do perfil por onde o escoamento estabelece contato inicial é chamada de bordo de ataque. A região final do perfil por onde o escoamento termina de fluir é chamada de bordo de fuga. Um resumo da nomenclatura geométrica do perfil é encontrado na Figura 2.3.

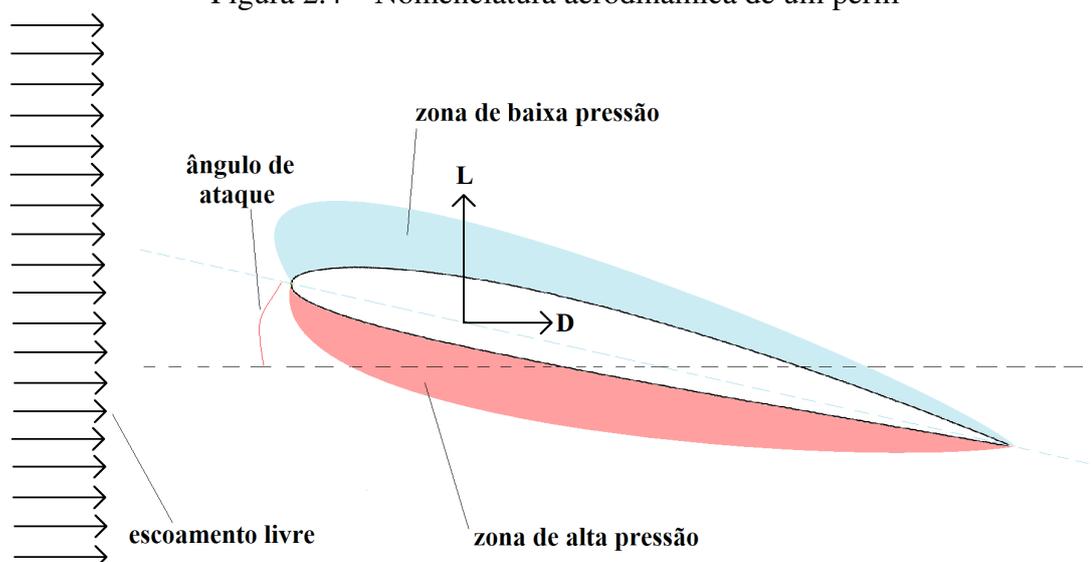
Figura 2.3 – Nomenclatura geométrica de um perfil aerodinâmico



Fonte: Elaborado pelo autor

Outra parte que deve se esclarecida é a nomenclatura referente a passagem do escoamento pelo perfil. O ângulo formado entre o perfil e o escoamento livre é chamado de ângulo de ataque (α). O fluxo do escoamento pelo perfil gera uma zona de alta pressão no intradorso e uma zona de baixa pressão no extradorso do perfil. Essas zonas geram uma reação aerodinâmica que pode ser dividida cartesianamente em sustentação (L) e arrasto de pressão (D). Um esquemático com a nomenclatura aerodinâmica do perfil encontra-se na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Nomenclatura aerodinâmica de um perfil



Fonte: Elaborado pelo autor

Estudos ao longo dos anos mostram que um escoamento pode ser definido por parâmetros adimensionais. De acordo com (WHITE, 2006), o número de Reynolds é o mais importante para caracterização de um escoamento. Ele é definido com a razão entre as forças inerciais e as forças viscosas de um fluido. Sua definição matemática encontra-se na Equação 2.10.

$$Re = \frac{\text{força inercial}}{\text{força viscosa}} = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (2.10)$$

onde ρ denota a densidade do fluido, U denota a velocidade do escoamento livre, D denota um comprimento característico e μ denota a viscosidade do fluido. Outro parâmetro adimensional relevante para caracterização de um escoamento é o número de Mach. Ele é definido pela razão entre a velocidade local do escoamento (u) e a velocidade do som (u_{som}). Sua definição matemática encontra-se na Equação 2.11.

$$Ma = \frac{u}{u_{som}} \quad (2.11)$$

Outros parâmetros relevantes para o estudo da aerodinâmica do perfil são os coeficientes de força do perfil. Eles são função do Re e do Ma e também do ângulo de ataque do perfil. Coeficientes adimensionais podem ser gerados tanto para sustentação quanto arrasto, dividindo a respectiva força pela força gerada pela pressão dinâmica. As definições matemáticas do coeficiente de sustentação e do coeficiente de arrasto são mostradas, respectivamente, nas Equações 2.12 e 2.13.

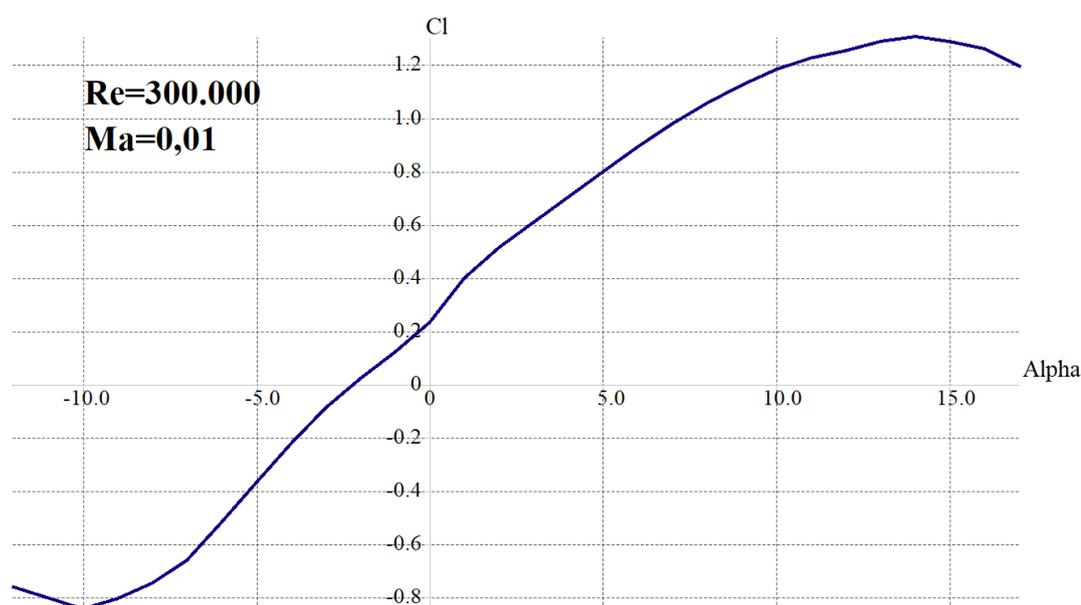
$$C_l = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho U^2 A_{ref}} \quad (2.12)$$

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A_{ref}} \quad (2.13)$$

onde ρ denota a densidade do fluido, U denota a velocidade do escoamento livre e A_{ref} denota a área da projeção ortográfica. Para perfis aerodinâmicos, a área de referência é considerada como o quadrado da corda.

Estabelecidos valores de Re e Ma , a relação entre os coeficientes de força e o ângulo de ataque do perfil podem ser mensuradas. O coeficiente de sustentação apresenta uma zona de variação linear com o ângulo de ataque para Reynolds abaixo de 3 milhões. Essa zona é delimitada por ângulos de ataque de valor absoluto relativamente grande. Para grandes ângulos de ataque, ocorre descolamento da camada limite do perfil e ocorre uma mudança brusca nos valores obtidos de sustentação. Valores de C_l por ângulo de ataque podem ser obtidos de maneira experimental ou utilizando algum modelo teórico. Um exemplo de gráfico de coeficiente de sustentação por ângulo de ataque encontra-se na Figura 2.5.

Figura 2.5 – $C_l \times \alpha$ de um perfil NACA2412



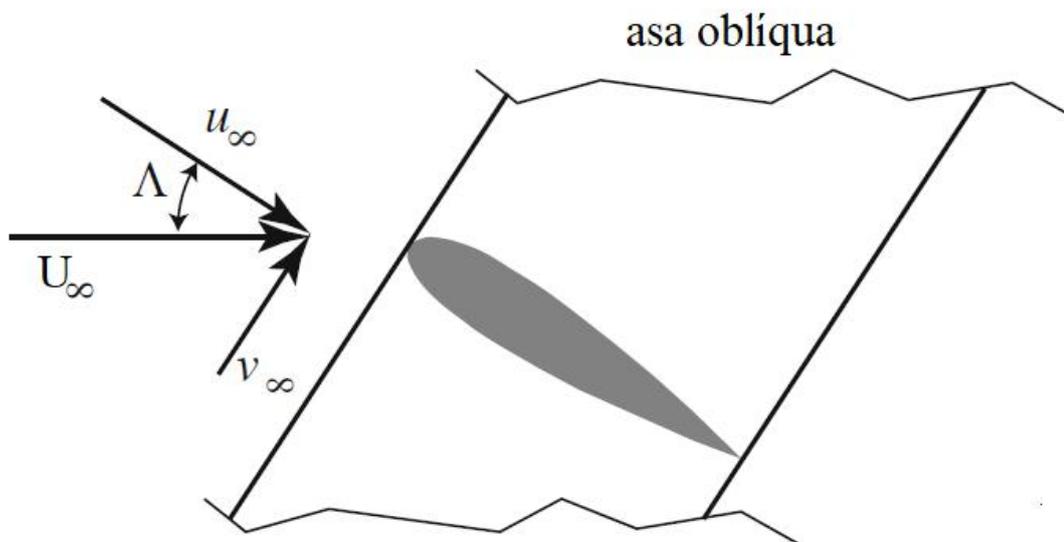
Fonte: Elaborado pelo autor

2.1.3 Correção do Enflexamento

Algumas mudanças ocorrem nos valores de C_l e C_d quando avaliados em um ambiente tridimensional. Uma das correções necessárias está relacionado a presença de enflexamento ao longo da pá. Estudos de enflexamento em pá de turbinas eólicas ainda são escassos.

Quanto maior a velocidade do escoamento, mais significativo é o efeito da compressibilidade do ar e após o escoamento se tornar supersônico, por exemplo, no extradorso há um aumento da parcela de arrasto referente ao surgimento de ondas de choque, conhecido como arrasto de onda. Para reduzir o número de Mach efetivo em um perfil, uma técnica bem comum é a utilização de enflexamento. O ângulo de enflexamento é o ângulo que o escoamento livre faz com o perfil aerodinâmico (VOS; FAROKHI, 2015). A Figura 2.6 ilustra o escoamento oblíquo ao longo de um perfil gerado pelo enflexamento.

Figura 2.6 – Escoamento oblíquo em uma asa



Fonte: Adaptado de (VOS; FAROKHI, 2015)

Esse enflexamento causa adaptações nos valores efetivos do número de Mach e na sustentação atribuída ao perfil. Segundo (OBERT, 2009), o número de Mach efetivo no perfil pode ser calculado pela Equação 2.14.

$$M_{eff} = M_{inf} \cos \Lambda \quad (2.14)$$

onde M_{inf} denota o valor de Mach calculado para escoamento livre e Λ denota o ângulo de enflexamento. O valor de C_l efetivo pode ser obtido de maneira conservadora, (JENKINSON; SIMPKIN; RHODES, 1999), pela Equação 2.15.

$$C_{L,eff} = C_{L,zerosweep} \cos \Lambda \quad (2.15)$$

2.1.4 Perfis NACA

Uma família de geometrias de perfis aerodinâmicos muito utilizada na indústria aeronáutica e em turbinas eólicas é a família de perfis NACA, especialmente a família de NACA de 4 dígitos. Os perfis NACA foram criados pelo Comitê Nacional para Aconselhamento sobre Aeronáutica e sua geometria é definida por equações matemáticas. Segundo (ANDERSON, 2001), a série 4 dígitos define o NACA da seguinte forma:

- O primeiro dígito descreve o valor máximo de câmber em porcentagem de corda
- O segundo dígito descreve a distância do câmber máximo ao bordo de ataque em décimos de corda
- Os últimos dois dígitos descrevem o valor máximo de espessura do perfil em porcentagem de corda

A geometria de um NACA 4 dígitos pode ser gerada calculando as contribuições da espessura e do câmber. O valor da meia espessura, y_t , em função da porcentagem de corda, x , e do valor máximo de espessura, t , é definido pela Equação 2.16.

$$y_t = 5t [0,2969\sqrt{x} - 0,1260x - 0,3516x^2 + 0,2843x^3 - 0,1015x^4] \quad (2.16)$$

onde x denota a porcentagem da corda variando de 0 a 1. A linha média do câmber pode ser calculada pela Equação

$$y_c = \begin{cases} \frac{m_c}{p_c^2}(2px - x^2) & 0 < x < p \\ \frac{m_c}{(1-p_c)^2}((1-2p) + 2px - x^2) & p < x < 1 \end{cases} \quad (2.17)$$

onde m_c denota o valor máximo do câmber em porcentagem de corda e p_c denota a localização do câmber máximo também em porcentagem de corda. As coordenadas do extradorso (x_{extra}, y_{extra}) e do intradorso (x_{intra}, y_{intra}) então podem ser obtidas por

$$x_{extra} = x - y_t \sin\left(\frac{dy_t}{dx}\right) \quad (2.18)$$

$$y_{extra} = y_c + y_t \cos\left(\frac{dy_t}{dx}\right) \quad (2.19)$$

$$x_{intra} = x + y_t \sin\left(\frac{dy_t}{dx}\right) \quad (2.20)$$

$$y_{intra} = y_c - y_t \cos\left(\frac{dy_t}{dx}\right) \quad (2.21)$$

2.1.5 Método de *Momentum* de elemento de pá

O método de *Momentum* de elemento de pá (BEMM) é um modelo utilizado para adquirir, de maneira iterativa, a potência e o desempenho de uma turbina eólica com base em sua geometria e condições do escoamento. O método utilizado nesse trabalho é o descrito por (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2002).

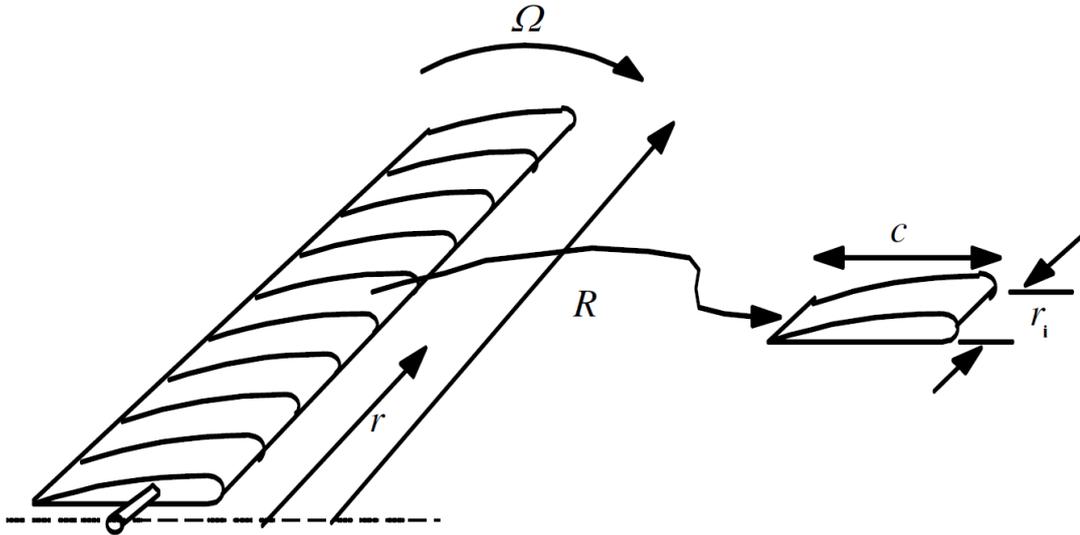
Inicialmente, a equação da potência da turbina eólica é adaptada para uma turbina real com pá de comprimento R .

$$P = \frac{1}{2}\eta\rho\pi R^2 U^3 C_P \quad (2.22)$$

onde η denota a eficiência mecânica da turbina. Para questão de projeto, partindo de uma estimativa de potência desejada de turbina e fazendo uma estimativa de valores de η e C_P pode-se determinar o comprimento de pá esperado.

A pá é, então, dividida em N elementos assim como ilustrado na Figura 2.7.

Figura 2.7 – Ilustração dos elementos de pá



Fonte: Adaptado de (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2002)

Com o número de elementos, o raio médio de uma seção qualquer i pode ser calculado pela Equação abaixo:

$$r_i = (i - 0,5) * \frac{R}{N} \quad (2.23)$$

Em seguida, utilizando-se de um banco de dados de perfis aerodinâmicos é determinado um ângulo de ataque cujo valor da razão entre o coeficiente de sustentação, C_L , e o coeficiente de arrasto, C_D , seja máximo.

Assim, uma primeira estimativa de pá pode ser gerada utilizando a teoria de turbina ideal. Para cada seção i , o valor de razão de velocidades (λ_r), ângulo relativo do vento (ϕ), comprimento de corda (c) e rigidez local (σ') podem ser calculados utilizando as Equações abaixo:

$$\lambda_r = \lambda \frac{r_i}{R} \quad (2.24)$$

$$\phi_i = \frac{2}{3} \tan^{-1}\left(\frac{1}{\lambda_{r,i}}\right) \quad (2.25)$$

$$c_i = \frac{8\pi r_i}{BC_{L,design}} (1 - \cos \phi_i) \quad (2.26)$$

$$\sigma'_i = \frac{Bc_i}{2\pi r_i} \quad (2.27)$$

onde λ denota a razão de velocidade na ponta da pá e B denota o número de pás. Segundo (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2002), para geração de energia é razoável adotar $B = 3$. Além disso, λ pode assumir valores entre 4 e 10. Em um projeto real, o valor de λ é varrido em busca do melhor C_P .

Em seguida, o fator de indução axial e de indução angular (a') podem ser calculados para a primeira iteração pelas Equações abaixo:

$$a_{i,1} = \frac{1}{\left[1 + \frac{4(\sin \phi_{i,1})^2}{\sigma'_{i,1} C_{l,1} \cos \phi_{i,1}}\right]} \quad (2.28)$$

$$a'_{i,1} = \frac{1 - 3a_{i,1}}{4a_{i,1} - 1} \quad (2.29)$$

Determinados o valores dos fatores de indução para primeira iteração, os próximos valores são calculados pelas Equações abaixo e incrementando o valor de j para próxima iteração caso os resultados não tenham convergido ainda por algum critério arbitrário.

$$\phi_{i,j} = \tan^{-1} \left[\frac{1 - a_{i,j}}{(1 + a'_{i,j}) \lambda_{r,i}} \right] \quad (2.30)$$

$$c_{i,j} = \frac{8\pi r_i}{BC_{l,i,j}} (1 - \cos \phi_{i,j}) \quad (2.31)$$

$$\sigma'_{i,j} = \frac{Bc_{i,j}}{2\pi r_i} \quad (2.32)$$

Calcula-se o fator de perda de ponta ($F_{i,j}$):

$$F_{i,j} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[\exp \left(- \left(\frac{\frac{B}{2} [1 - \frac{r_i}{R}]}{\left(\frac{r_i}{R}\right) \sin \phi_{i,j}} \right) \right) \right] \quad (2.33)$$

Calcula-se o novo coeficiente de empuxo local:

$$C_{T,i,j} = \frac{\sigma'_{i,j} (1 - a_{i,j})^2 (C_{l,i,j} \cos \phi_{i,j} + C_{d,i,j} \sin \phi_{i,j})}{(\sin \phi_{i,j})^2} \quad (2.34)$$

O próximo valor do fator de indução axial dependerá do coeficiente de empuxo local. Se $C_{T,i,j} < 0,96$, $a_{i,j+1}$ é calculado por:

$$a_{i,j+1} = \frac{1}{\left[1 + \frac{4F_{i,j}(\sin \phi_{i,j})^2}{\sigma'_{i,j} C_{l,i,j} \cos \phi_{i,j}}\right]} \quad (2.35)$$

Caso contrário, é considerado boa prática utilizar a Equação empírica de Glauert:

$$a_{i,j+1} = \left(\frac{1}{F_{i,j}}\right) \left[0,143 + \sqrt{0,0203 - 0,6427(0,889 - C_{T,i,j})}\right] \quad (2.36)$$

O novo valor do fator de indução angular pode ser calculado por:

$$a_{i,j+1} = \frac{1}{\left[\frac{4F_{i,j} \cos \phi_{i,j}}{\sigma'_{i,j} C_{l,i,j}} - 1\right]} \quad (2.37)$$

Se os valores dos fatores de indução axial e angular estiverem dentro de uma tolerância aceitável, a iteração é encerrada. Depois de determinar a geometria da pá com esse modelo, o coeficiente de potência pode ser calculado por:

$$C_P = \frac{8}{\lambda N} \sum_{i=1}^N F_{i,j} (\sin \phi_{i,j})^2 (\cos \phi_{i,j} - \lambda_{r,i} \sin \phi_{i,j}) (\sin \phi_{i,j} + \lambda_{r,i} \cos \phi_{i,j}) \left[1 - \left(\frac{C_{d,i,j}}{C_{l,i,j}}\right) \cot \phi_{i,j}\right] \lambda_{r,i}^2 \quad (2.38)$$

Finalmente, a potência pode ser calculada utilizando a Equação 2.22.

Ademais, o valor da inclinação local da pá, conhecido como *pitch*, pode ser calculada pela Equação 2.39.

$$p = \alpha - \phi_{i,j} \quad (2.39)$$

2.2 Otimização de perfis aerodinâmicos

Segundo (HAU, 2013), a eficiência da turbina eólica está diretamente ligada a escolha do perfil. Assim, o uso de uma boa geometria de perfil ao longo da pá é essencial para obtenção de uma turbina eficiente. Apesar de já bem estudado ao longo das décadas, (GIANNAKOGLU, 2002), (NEMEC; ZINGG; PULLIAM, 2004), (SHAHROKHI; JAHANGIRIAN, 2007), o foco desses estudos geralmente se dá para área aeronáutica. O perfil utilizado em turbinas eólicas possui objetivos diferentes dos utilizados por aeronaves. Perfis de turbinas eólicas por muitas vezes são submetidos a altos ângulos de ataque e o parâmetro principal de otimização é a razão entre a sustentação e o arrasto para determinado ângulo (BURTON et al., 2001).

Devido a natureza complexa de previsão de resultados de um perfil sujeito a um escoamento, métodos convencionais de otimização são difíceis de serem aplicados. Por isso, estudos encontrados sobre o tema geralmente focam no uso de métodos heurísticos de otimização.

Segundo (PEARL, 1984), heurística são critérios, métodos ou princípios usados para decidir, dentro de um grupo de ações, qual promete ser a mais eficiente para realização de

algum objetivo. Eles apresentam a conciliação entre serem simples e saber discriminar resultados bons e ruins. Um método heurístico com vasta literatura (SHAHROKHI; JAHANGIRIAN, 2007),(PEIGIN; EPSTEIN, 2004), no uso de otimização de perfis é o método de algoritmo genético (GA).

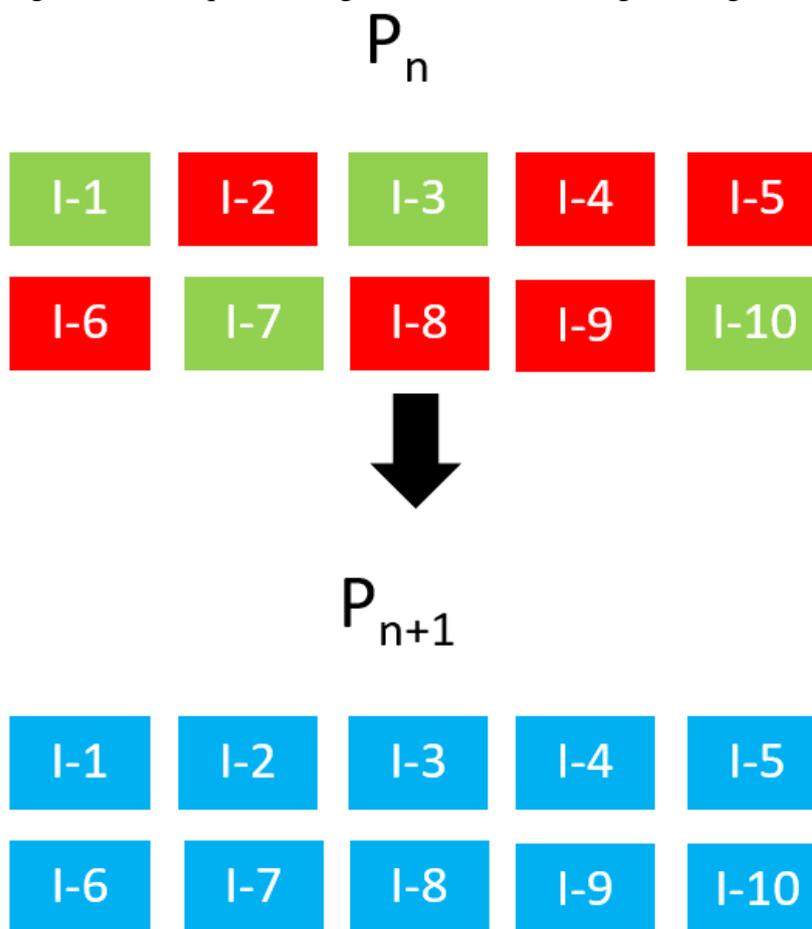
2.2.1 Algoritmo Genético

Inicialmente apresentado por (HOLLAND, 1992), o algoritmo genético, abreviação GA, é um método de otimização fortemente inspirado na teoria evolutiva de Darwin. Ele pode ser dividido em duas subcategorias: SOGA e MOGA. SOGA, ou Algoritmo Genético de Objtvo Único, é um método onde se tem várias entradas e apenas uma saída. Já MOGA, ou Algoritmo Genético de Múltiplo Objtivo, utiliza várias entradas e possui mais de uma saída.

Em ambos os casos, seu princípio se baseia na criação de "indivíduos", cada qual com seu devido pacote de informações, sendo avaliados por algum critério de avaliação. Os indivíduos dessa população que apresentarem as melhores respostas são utilizados para geração da população futura. Os indivíduos da próxima população são gerados por uma mistura das informações de seus "pais"provenientes da geração anterior.

A taxa dessa mistura entre os pais é chamado de *cross-over* . Ademais, cada indivíduo da nova geração está sujeito a mutações que podem alterar parte de suas informações. A chance de uma mutação ocorrer na criação de um novo indivíduo é chamada de taxa de mutação. Esse processo é iterado até ocorrer convergência de resultados ou número de iterações atingir valor predefinido. O tamanho da população, a taxa de *cross-over*, a taxa de mutação e o número de pais em cada geração são parâmetros de decisão do usuário. A Figura 2.8 ilustra o processo do algoritmo genético.

Figura 2.8 – Esquemática geral do método de algoritmo genético



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

2.2.2 Curvas de Bézier

Parte do problema de aplicação de um algoritmo heurístico é a criação de indivíduos para avaliação. No estudo de perfis aerodinâmicos, é comum utilizar curvas de Bézier (PEIGIN; EPSTEIN, 2004). Elas são curvas paramétricas, relacionadas ao polinômio de Bernstein, definidas pela Equação 2.40

$$B(t) = \sum_{i=1}^n \binom{n}{i} (1-t)^{n-i} t^i P_i \quad (2.40)$$

onde $n + 1$ denota o número de pontos, n denota o grau da curva e P_i denota os pontos utilizados. Assim, utilizando-se o método descrito em (FAZIL; JAYAKUMAR, 2011) é possível transformar um perfil NACA em curvas de Bézier. Desta forma, para um determinado perfil haverá um conjunto de pontos P_i associados ao extradorso e intradorso. Segundo (FAZIL; JAYAKUMAR, 2011), cada curva pode ser descrita utilizando 6 pontos. Com isso, para o perfil como um todo, são utilizados 10 pontos, pois o primeiro e último ponto do conjunto são idênticos para o extradorso e intradorso.

2.3 CFD

O uso de fluidodinâmica computacional, CFD, é de extremo valor para área de energia eólica. Com o aumento do desempenho computacional nos últimos anos, resultados de simulações de turbinas eólicas com alta fidelidade são possíveis (BANGGA, 2018).

Entretanto, para confiabilidade de resultados, cuidados devem ser tomados no processo de refinamento de malha.

O protocolo usual para determinação do erro atribuído ao refinamento da malha é conhecido com Índice de Refinamento de Malha (GRI).

2.3.1 Índice de Refinamento de Malha - GRI

Segundo as normas da ASME (CELIK et al., 2018) o procedimento para cálculo do erro devido à discretização é desenvolvido pelos seguintes passos:

Passo 1. Definir o tamanho representativo da malha, h . Para problemas tridimensionais o valor de h pode ser calculado pela Equação 2.41.

$$h = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta V_i) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.41)$$

onde ΔV_i denota o volume da i -ésima célula e N denota o número total de células.

Passo 2. Selecionar três malhas significativamente diferentes e, após simulações, determinar o valor de um parâmetro relevante para o estudo, ψ . O fator de refinamento de malha, r , é determinado pela razão entre o h da malha mais grosseira pelo h da malha mais refinada. É recomendável que seu valor seja de pelo menos 1,3.

Passo 3. Sendo $h_1 < h_2 < h_3$ e $r_{21} = h_2/h_1$ e $r_{32} = h_3/h_2$, calcular a ordem aparente do método, p , utilizando as Equações 2.42, 2.43 e 2.44.

$$p = \frac{1}{\ln r_{21}} \left| \ln \left| \epsilon_{32}/\epsilon_{21} \right| + q(p) \right| \quad (2.42)$$

$$q(p) = \ln \frac{r_{21}^p - s}{r_{32}^p - s} \quad (2.43)$$

$$s = \text{sinal}(\epsilon_{32}/\epsilon_{21}) \quad (2.44)$$

onde $\epsilon_{32} = \psi_3 - \psi_2$, $\epsilon_{21} = \psi_2 - \psi_1$. Esse conjunto de equações é resolvido de forma iterativa com uma estimativa inicial para p na Equação 2.42.

Passo 4. Calcular valores extrapolados de solução:

$$\psi_{ext}^{21} = (r_{21}^p \psi_1 - \psi_2)/(r_{21}^p - 1) \quad (2.45)$$

$$\psi_{ext}^{32} = (r_{32}^p \psi_2 - \psi_3)/(r_{32}^p - 1) \quad (2.46)$$

Passo 5. Com os valores das malhas mais finas, calcular os valores de erro relativo aproximado e extrapolado, Equações 2.47 e 2.48. Finalmente, calcular o GCI comparativo das malhas, Equação 2.49.

$$e_a^{21} = \left| \frac{\psi_1 - \psi_2}{\psi_1} \right| \quad (2.47)$$

$$e_{ext}^{21} = \left| \frac{\psi_{ext}^{21} - \psi_1}{\psi_{ext}^{21}} \right| \quad (2.48)$$

$$GCI_{fine}^{21} = \frac{1,25e_a^{21}}{r_{21}^p - 1} \quad (2.49)$$

3 METODOLOGIA

O processo de desenvolvimento da geometria da pá passa por diversas etapas devido ao grande número de processos diferentes empregados. Inicialmente, uma turbina eólica já existente deve ser escolhida para determinar condições de operação e ter um comparativo final.

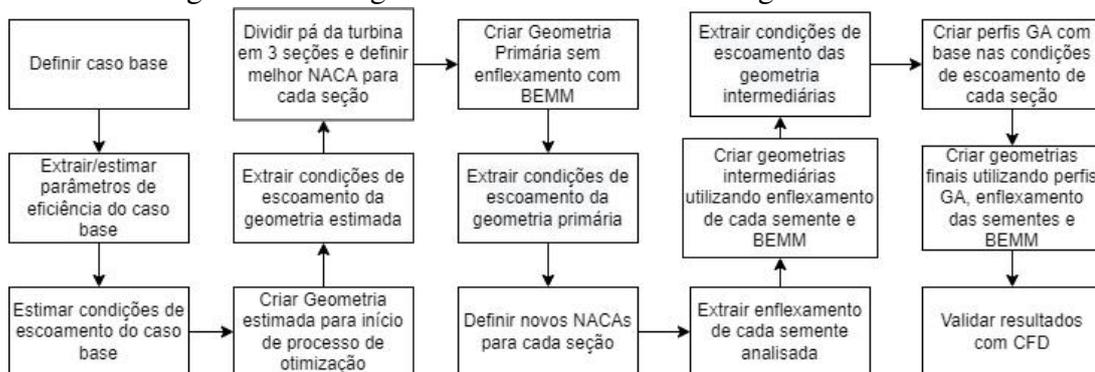
Definidas as condições de operação, uma geometria inicial gerada pelo método do elemento de pá e perfis NACAs genéricos é criada. Essa primeira geometria não possui enflexamento e serve para determinar parâmetros de escoamento utilizados no futuro. Em paralelo, algumas sementes são selecionadas e parâmetros geométricos são levantados visando um futuro aproveitamento durante o desenvolvimento da geometria bio-inspirada. .

Em seguida, uma segunda geometria é gerada com perfis NACA ótimos selecionados com base nos valores de números de Reynolds e Mach obtidos na geometria anterior. Ademais, a partir dessa geometria já se faz uso das informações obtidas com as sementes.

Determinados os NACAs ótimos e novos valores de Reynolds e Mach, é utilizado o método do algoritmo genético para determinar geometrias de perfil para cada seção da pá. Com as novas geometrias de perfil e utilizando as informações das sementes, uma última geometria de pá é gerada pelo método BEMM. Com isso, os valores de eficiência são comparados com os valores obtidos da turbina real utilizada como base de caso.

Finalmente, as geometrias bio-inspiradas são recriadas utilizando o software SolidWorks® (Dassault Systemes, 2019) e posteriormente uma análise será feita utilizando o software de CFD Ansys CFX® (ANSYS, Inc., 2021) com o intuito de corroborar os resultados de eficiência teórica obtidos pelo BEMM. Esse passo é fundamental, uma vez que, com a introdução das informações da semente, utiliza-se uma adaptação do BEMM, o qual deve ser validado. A Figura 3.1 resume de maneira geral a metodologia do trabalho.

Figura 3.1 – Diagrama de resumo da metodologia do trabalho



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

3.1 Estudo de Caso

O primeiro passo do trabalho foi definir um caso de estudo para aplicação do método. Devido ao fato de utilizar em etapas futuras o software XFOIL (DRELA, 2013), dá-se preferência

às turbinas que não operem em altas velocidades. Se os valores de velocidade do escoamento forem muito elevados, algumas partes da turbina começam a operar em regime transônico e introduzem problemas de convergência no software. Um bom candidato ao estudo de caso é a turbina AWP 3.7 da empresa sul-africana African Windpower. Os dados dessa turbina foram retirados de (ARAUJO, 2016) e encontram-se na Tabela 3.1.

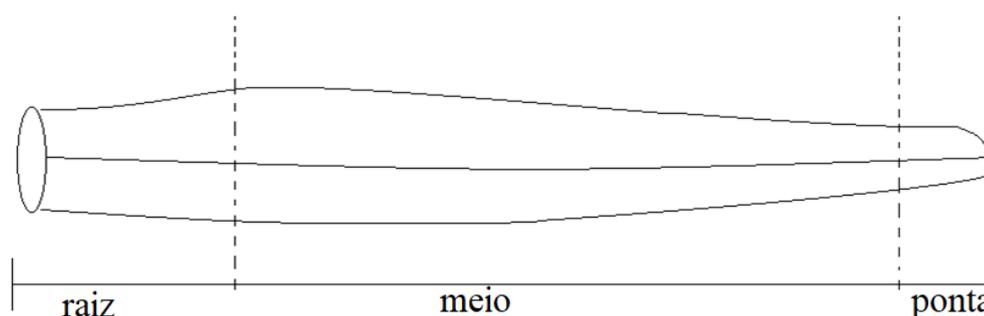
Tabela 3.1 – Turbina eólica AWP 3.7 - African Windpower

Tipo de eixo	Horizontal
Diâmetro do rotor	3,7 m
Número de pás	3
Velocidade nominal do vento	12 m/s
Potência nominal	2 kW

3.2 Geometria Primária

Com os valores de diâmetro do rotor, número de pás da turbina e velocidade nominal do vento, e fazendo uma estimativa do valor de λ , pode-se utilizar o método do elemento de pá que tem início na Equação 2.23. Para a Equação 2.26, é feita uma estimativa de valor de C_l utilizando um perfil NACA 2412 com α de 6° , por exemplo. O valor de C_l é obtido pelo programa XFOIL para Reynolds estimado de comprimento característico arbitrário de 5% do valor de comprimento de pá e número de Mach desprezível. Essa estimativa inicial é completamente arbitrária e serve apenas para dar início ao processo iterativo. A partir da segunda iteração, a pá da turbina é dividida em 3 seções: raiz, meio e ponta ilustrado na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Divisão da pá em seções



Fonte: Adaptado de (NETO, 2021)

Com os valores locais de Reynolds e Mach médio para cada seção, é encontrado o melhor perfil NACA 4 dígitos por meio de varredura utilizando o software XFOIL. Terminado o processo, ele é repetido para novo valor de λ . Esse valor será variado segundo recomendação de (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2002). Ao final dessa primeira parte do processo, obtém-se uma geometria de pá utilizando NACAs melhores locais e sem enflexamento. Ademais, obtém-se valores de Reynolds e Mach locais médios para cada seção da pá.

3.3 Informações das Sementes

Outra parte fundamental do estudo é a extração de informações promissoras da geometria de sementes. (HOLDEN; CALEY; TURNER, 2015) mostra que existe grande potencial na geometria de algumas sementes. Entretanto, vale ressaltar que seu estudo é baseado na autorotação da semente e, esta, fica sujeita a valores bem reduzidos de Reynolds. Mesmo assim, como o estudo de caso utilizado possui baixa velocidade nominal do vento, talvez exista potencial de um aproveitamento de geometria.

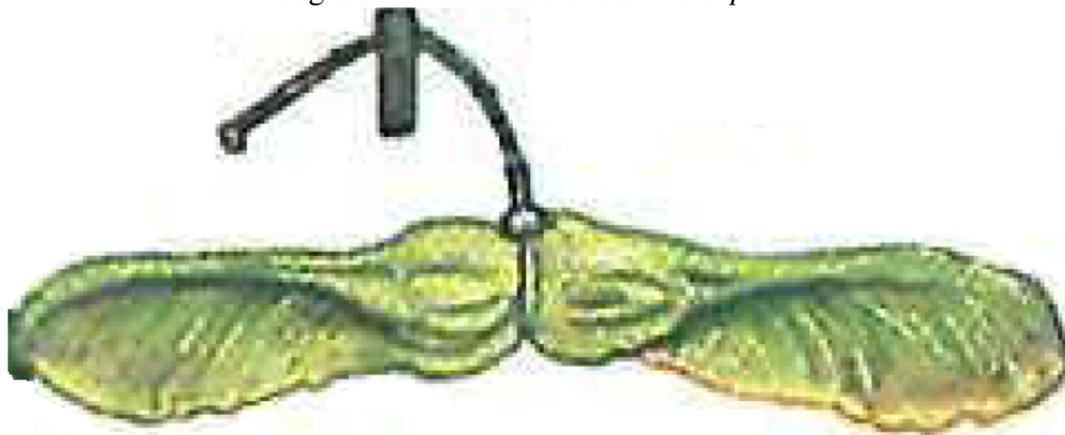
Segundo (MINAMI; AZUMA, 2003), existem dois tipos de sementes que voam com o vento: sementes papiformes e sementes aladas. As sementes papiformes, também conhecidas como sementes paraquedas, possuem forma de voo aproveitando o arrasto gerado pelas papi. As sementes aladas tem forma de voo mais distinta podendo ser planando, flutuações do centro de gravidade ou auto-rotação.

Para esse estudo o interesse é maior em sementes do tipo aladas, em especial sementes que voam por planeio. Isso se dá, pois, segundo (BURTON et al., 2001), turbinas de alta eficiência operam com alta taxa de sustentação por arrasto, semelhante ao caso do planador.

Assim, para esse estudo três espécies de árvore e suas respectivas sementes foram selecionadas: *Acer Campestre*, *Acer Platanoides* e *Acer pseudoplatanus*.

A *Acer Campestre*, chamada no Brasil de acer silvestre, é uma árvore decídua com altura variando entre 15 a 25 metros (RUSHFORTH, 1999). Sua semente é uma samara com asas alinhadas em 180° e com envergadura de 4 centímetros. Um desenho representativo da *Acer Campestre* é apresentado na Figura 3.3.

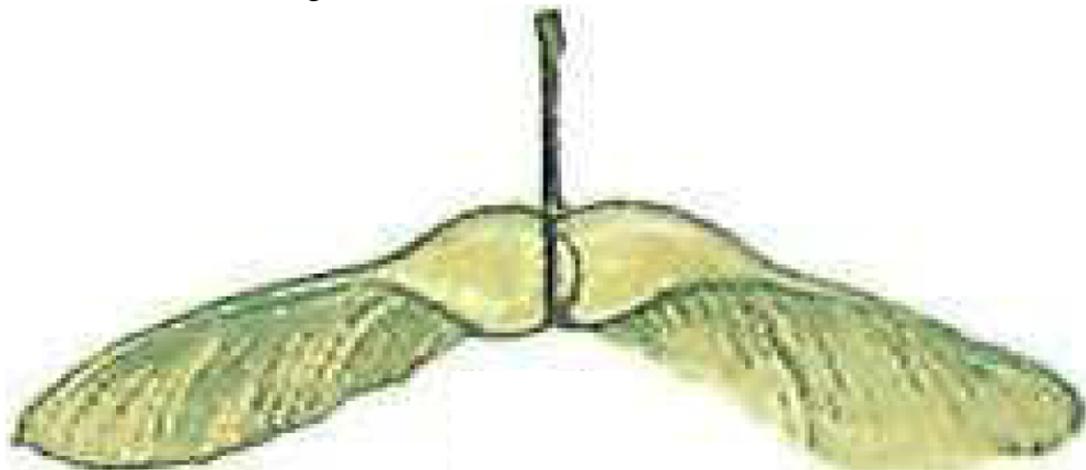
Figura 3.3 – Semente da *Acer Campestre*



Fonte: Adaptado de (MITCHELL; MORE, 1997)

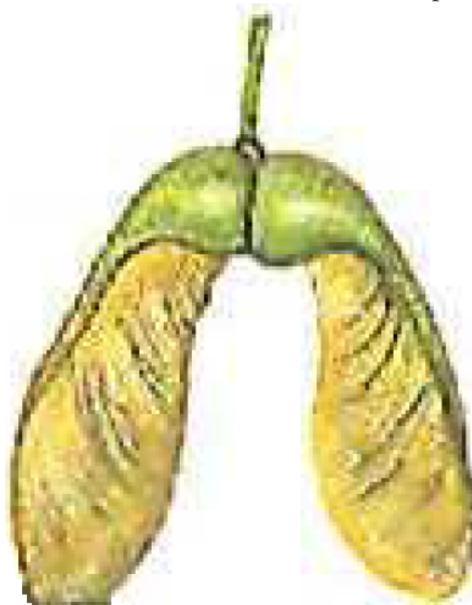
A *Acer Platanoides*, conhecida no Brasil como Bordo-da-Noruega, é uma árvore alta de quase 30 metros de altura (RUSHFORTH, 1999). É muito semelhante ao padreiro, *Acer Pseudoplatanus*, diferindo apenas nas folhas e sementes. Um desenho representativo da *Acer Platanoides* é apresentado na Figura 3.4.

Por fim, a *Acer Pseudoplatanus*, conhecida no Brasil como padreiro, pode chegar a uma altura de 35 metros e seus galhos formam uma coroa aberta (CLAPHAM; TUTIN; WARBURG,

Figura 3.4 – Semente da *Acer Platanoides*

Fonte: Adaptado de (MITCHELL; MORE, 1997)

1989). Um desenho representativo da semente encontra-se na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Semente da *Acer Pseudoplatanus*

Fonte: Adaptado de (MITCHELL; MORE, 1997)

Com as geometrias de referência de cada semente, é utilizada as ferramentas de desenho 2D do software SolidWorks® para fazer o *tracing* das geometrias. Como o BEMM já proporciona valores ótimos de corda para a pá, a característica geométrica que será aproveitada das sementes será o enflexamento.

3.4 Geometria Secundária e Final

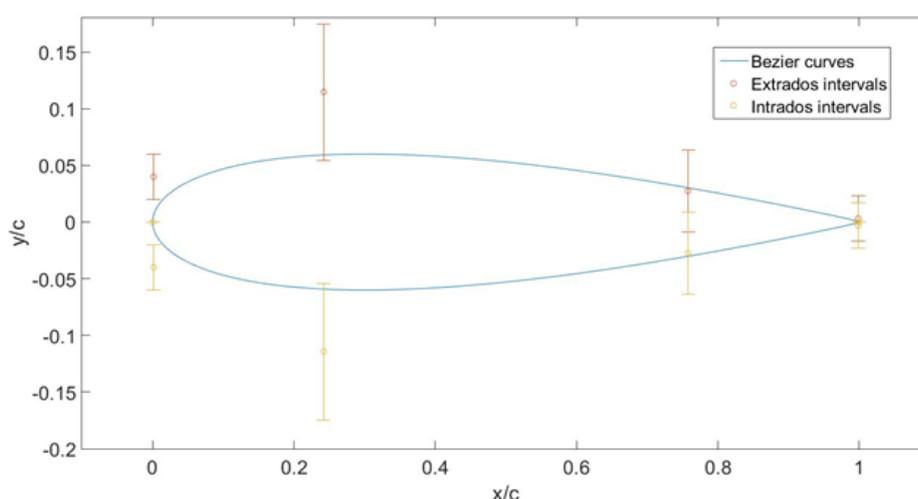
Com o enflexamento obtido das sementes e as condições de escoamento obtidas da primeira geometria, realiza-se uma varredura na segunda geometria para definir a partir de que ponto o enflexamento deve ser empregado. Lembrando que apesar de reduzir o arrasto de

onda (Eq. 2.14), o enflexamento também reduz a sustentação efetiva do perfil (Eq. 2.15). Se o valor de Mach local não for suficientemente grande, pode não compensar a implantação de um enflexamento naquela região.

Definida a segunda geometria, com a implantação do enflexamento, baseado na semente escolhida, obtém-se, portanto, as condições locais de escoamento para cada seção da nova pá eólica. Desta forma, em seguida, é realizada a implementação do método de algoritmo genético para obtenção do perfil ótimo para cada seção. Cabe salientar a importância da geometria intermediária secundária, pois ela define um regime de escoamento mais próximo do esperado para a geometria de pá final. Por fim, cabe observar também que quanto melhor for a definição do regime de escoamento, melhor estarão definidas as entradas no algoritmo genético e, conseqüentemente, melhor será o aproveitamento efetivo dos perfis finais.

Assim, a implementação do algoritmo genético se inicia a partir dos perfis NACA modificados para cada seção, conforme explicado anteriormente. Assim, a partir desta geometria inicial modificada, como explicado anteriormente, bem como utilizando o método desenvolvido por (FAZIL; JAYAKUMAR, 2011), os perfis são, desta forma, convertidos em curvas de Bézier. Os pontos dessas curvas são utilizados como base para geração de perfis individuais que farão parte da primeira população. Cada indivíduo inicial será gerado a partir de uma pequena variação dos pontos de controle das curvas. Um exemplo desses intervalos em ocorreram as variações é mostrado na Figura 3.6 para o NACA 0012. As curvas azuis representam o perfil aerodinâmico. Os pontos em amarelo e vermelho representam os pontos de controle iniciais para desenho do perfil NACA. As linhas verticais partindo de cada ponto representam os intervalos de variação utilizados dentro do algoritmo de otimização.

Figura 3.6 – Intervalos de variação dos pontos de controle do perfil NACA 0012



Fonte: Obtido de (NETO, 2021)

3.4.1 Implementação do Algoritmo Genético

Dados os pontos de controle e os intervalos de variação é gerada uma população de perfis. Os intervalos de variação dos pontos de controle são definidos de maneira arbitrária tomando-se o cuidado com seu tamanho. Se o intervalo for muito grande, gerar a população fica mais custoso. Mas se o intervalo for muito pequeno, o ganho da geometria final é menor pois o perfil não distoará muito do progenitor original.

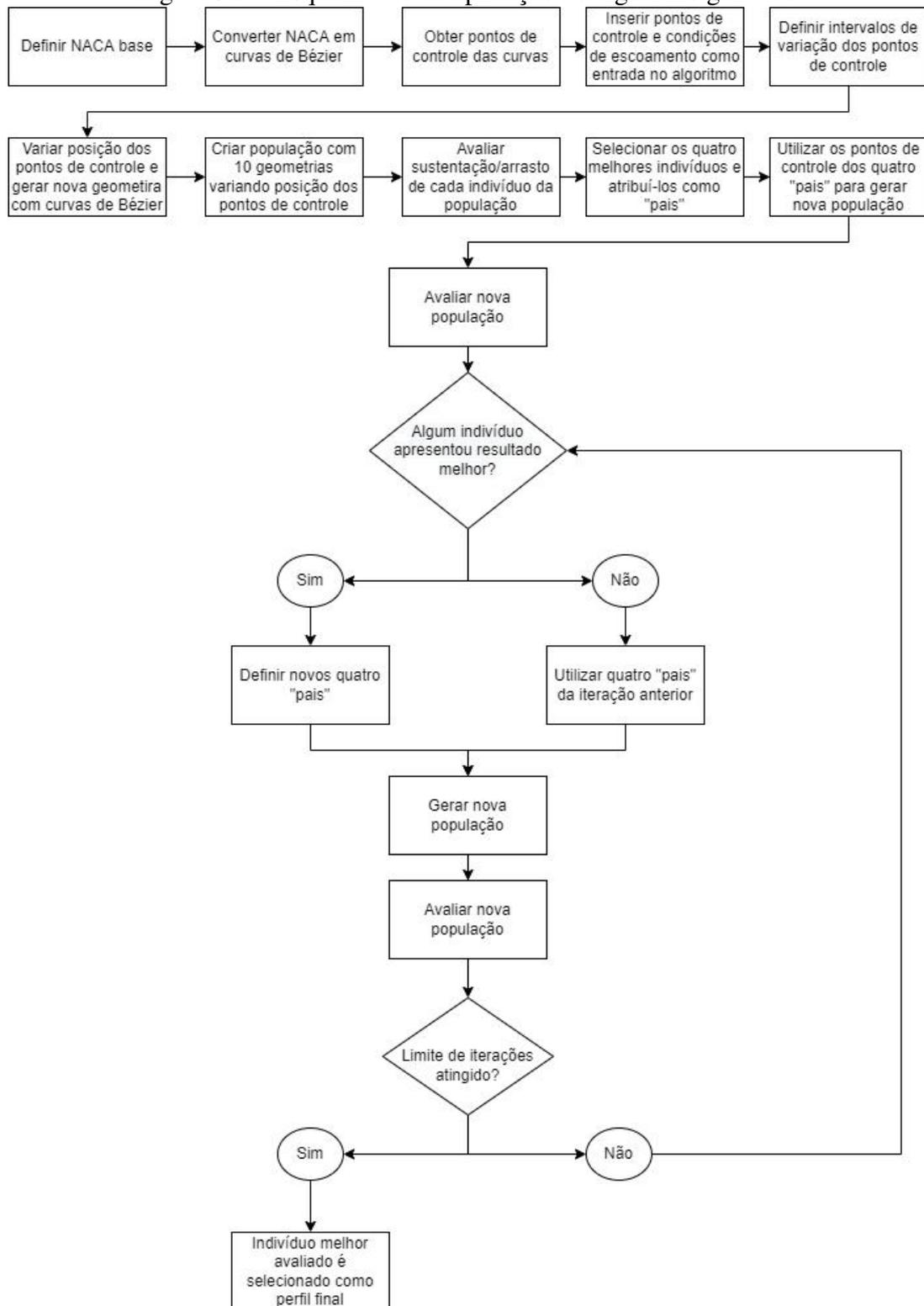
Além disso, cada indivíduo gerado deve passar por um crivo para validar sua geometria. As regras que cada indivíduo deve seguir são listadas abaixo:

- A curva do extradorso não pode passar pela curva do intradorso e vice-versa;
- Espessura mínima em qualquer parte do perfil antes dos 90% de corda de 0,04;
- Espessura mínima a partir dos 90% de corda de 0,025;
- Espessura máxima não ultrapassando 0,35;
- Checar extradorso e intradorso para curvas "onduladas";

Criada a primeira população de 10 indivíduos, cada um é avaliado utilizando-se o software XFOIL, obtendo os respectivos valores dos coeficientes de sustentação e arrasto. Assim, pode-se obter razão sustentação/arrasto para cada geometria. Os 4 melhores perfis são selecionados para cruzamento para geração da população seguinte. A taxa de crossover utilizada é de 50% e a taxa de mutação é de 30%. Devido o fato do XFOIL poder devolver resultados não convergidos para um perfil, os perfis-pais seguem para a próxima geração para não haver perda de informação no processo. Atingido o valor máximo de iterações, o perfil ótimo para seção da pá é obtido.

A Figura 3.7 ilustra os passos lógicos na implementação do algoritmo genético para obtenção da nova geometria de perfil.

Figura 3.7 – Esquemático de aplicação do algoritmo genético



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

3.4.2 Geometria final e Comparações

Após obter as geometrias de perfil aerodinâmico pelo método de algoritmo genético para cada seção da pá, é efetuada uma última implementação do BEMM. Assim como na geometria

intermediária secundária, essa implementação é feita com uma adaptação para considerar os efeitos aerodinâmicos do enflexamento. Esse processo é repetido para cada semente. Ao fim do processo é obtida uma geometria final e seus respectivos coeficientes de potência. Esses valores podem então ser comparados entre o caso base, as geometrias intermediárias e as geometrias finais entre as sementes.

3.5 Comparações e CFD

Como última etapa, as geometrias de pá serão avaliadas dentro do software de CFD Ansys CFX[®]. Para tanto, primeiramente, os dados geométricos das pás serão traduzidos para modelos tridimensionais dentro do software SolidWorks. Alguns cuidados devem ser tomados na confecção dos modelos.

A linha de enflexamento deve estar sobreposta a linha de 1/4 de corda dos painéis. Esse procedimento é semelhante ao adotado na indústria aeronáutica na elaboração de asas de aeronave. Ademais, para evitar problemas futuros na malha, a geometria da pá será criada pelo método de *lofting* dentro do SolidWorks para evitar conflitos de geometria. O uso de *lofting* contínuo entre os painéis evita a formação de arestas entre as faces e elimina um futuro problema na hora de criar a malha.

Para os perfis com enflexamento, o *lofting* contínuo traz um problema. Ao longo da curva de enflexamento, o volume se torna muito afiado e ocorre formação de "lascas" ao longo do bordo de fuga. Essas lascas deverão ser corrigidos dentro do Design Modeler do software Ansys. Ademais, para os perfis com enflexamento, o último painel deverá ser substituído por uma ponta. A geometria desse painel é muito pequena em relação a dimensão da pá como um todo e a "lasca" gerada inviabiliza a geometria final no processo de criação de malha.

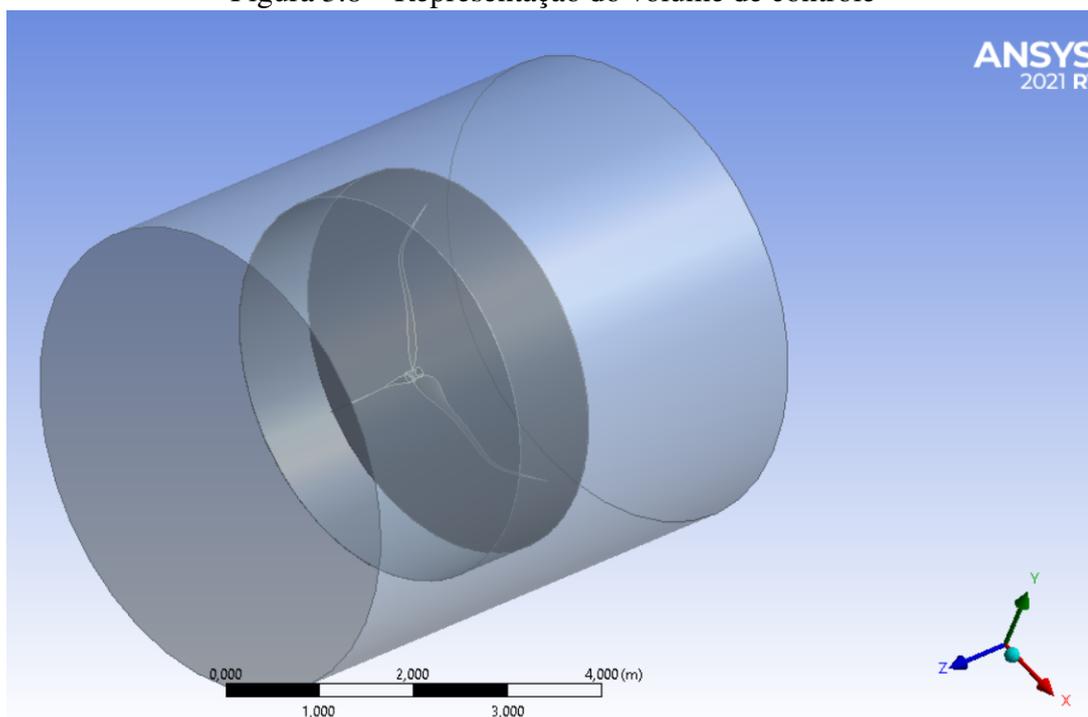
Feitos os modelos tridimensionais, eles são introduzidos no Design Modeler do Ansys para a criação dos domínios dos volumes de controle. O procedimento de análise adotado é a separação do volume de controle em dois domínios: um externo e um interno mostrados na Figura 3.8.

O domínio externo é considerado estacionário. O domínio interno terá uma malha mais refinada. Ademais, ele será considerado um domínio rotativo em que no centro haverá um vazio gerado pelo modelo da turbina em análise. Essa análise, utilizando a subtração do modelo, é pertinente pois nesse estudo há apenas interesse nas reações aerodinâmicas. Não há interesse na análise estrutural da pá. A junção desses dois domínios será feita utilizando a interface de rotor congelado do pré-processamento do CFX. Algumas perdas são esperadas pela utilização desse método, mas devido ao caráter complicado da geometria, uma modelagem mais simplificada possibilita economia computacional e que possa ser feitos estudos subsequentes de refinamentos.

Duas dimensões serão analisadas nessas avaliações.

A primeira delas é o comprimento da esteira. Lembrando da modelagem do método de momentum de elemento de pá, o rotacional da esteira influencia nos fatores de indução axial, a , e angular, a' .

Figura 3.8 – Representação do volume de controle



Fonte: Elaborado pelo autor

A outra dimensão de análise é o refinamento da malha. Nessa pode ser utilizado o método GRI de avaliação. Cabe ressaltar que o refinamento da malha se dará apenas no domínio interno. E, além disso, para evitar problemas na criação da malha, a superfície representativa da turbina terá um refinamento de malha explícito. Esse refinamento a parte tem dois propósitos. O primeiro é simular a criação de uma camada de inflação mais refinada próximo a superfície a qual ocorrerá os efeitos aerodinâmicos. Esse processo já é de uso comum em análise de asas de aeronaves. O segundo propósito é, devido a geometria complexa da turbina, existe uma diferença dimensional de duas ordens de grandeza entre o volume interno e as regiões mais finas da turbina. Assim, sem utilizar um refinamento de malha na superfície, a malha do volume interno deveria ser muito refinada para não perder a superfície da turbina. A malha interna sendo muito refinada impossibilita a análise por limitações de máquina.

Após a malha ser aplicada no solver do CFX, os valores de velocidade angular e torque são obtidos. É feita então uma varredura de velocidades angulares para encontrar dois pontos: o valor de velocidade angular que devolve torque nulo e o valor do torque para quando a velocidade angular é nula. A multiplicação da velocidade angular pelo torque da turbina oferece o valor de potência. Esse valor deve ser corrigido considerando a eficiência mecânica também considerada nos valores de potência obtidos pelos métodos teóricos. Assim, pode-se realizar comparação entre os métodos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a metodologia detalhada na seção anterior, nessa seção serão apresentados os resultados obtidos para cada parte do processo do projeto, assim como os resultados finais. Concomitantemente aos resultados obtidos, são realizadas as observações mais importantes sobre os mesmos.

4.1 Primeira Geometria

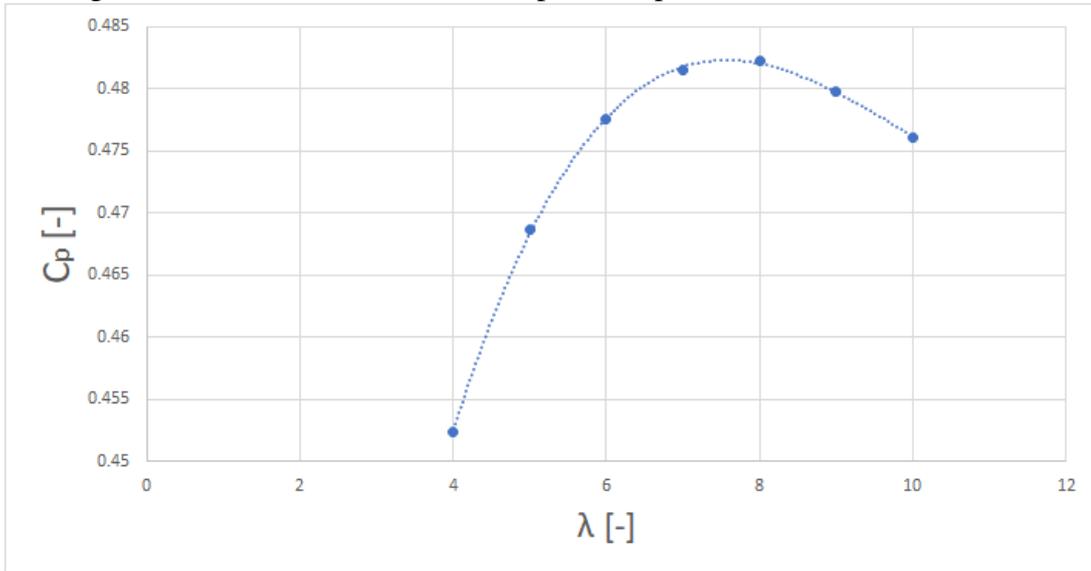
Com os dados da Tabela 3.1, valores de estimativa inicial de números de Reynolds e Mach podem ser calculados utilizando as equações 2.10 e 2.11 respectivamente e considerando, por hora, dimensão característica de 5% do valor do comprimento da pá. Com essa estimativa inicial de Reynolds e Mach, foi realizada uma varredura utilizando-se o XFOil visando a determinação do perfil NACA mais adequado, tendo em vista a razão C_l/C_d . Os valores dessas estimativas iniciais, com base em atmosfera padrão, para início da confecção da primeira geometria encontram-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Estimativas iniciais para início da primeira geometria

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Comprimento característico	c_{guess}	9,25e-02	[m]
Densidade do ar	ρ	1,22	[kg/m ³]
Viscosidade do ar	μ	1,82e-05	[Pa · s]
Número de Reynolds	Re_{guess}	7,43e+04	[—]
Número de Mach	Ma_{guess}	3,53e-02	[—]
Melhor NACA	$foil_{guess}$	NACA 2413	[—]
Ângulo de ataque	α	6	[o]
Coefficiente de sustentação	$C_{l,guess}$	0,895	[—]
Coefficiente de arrasto	$C_{d,guess}$	0,0221	[—]

Com o valor de uma estimativa inicial de coeficiente de sustentação, seu valor pode ser empregado na Equação 2.26 dando início a primeira iteração. Ademais, deve-se lembrar que o NACA utilizado é apenas para a primeira iteração. A partir da segunda iteração, a pá é dividida em seções conforme a Figura 3.2. Cada seção terá um NACA selecionado para as condições locais da seção. Valores de λ serão varridos e seus respectivos valores de coeficiente de potência catalogados. Esses valores estão representados no gráfico da Figura 4.1.

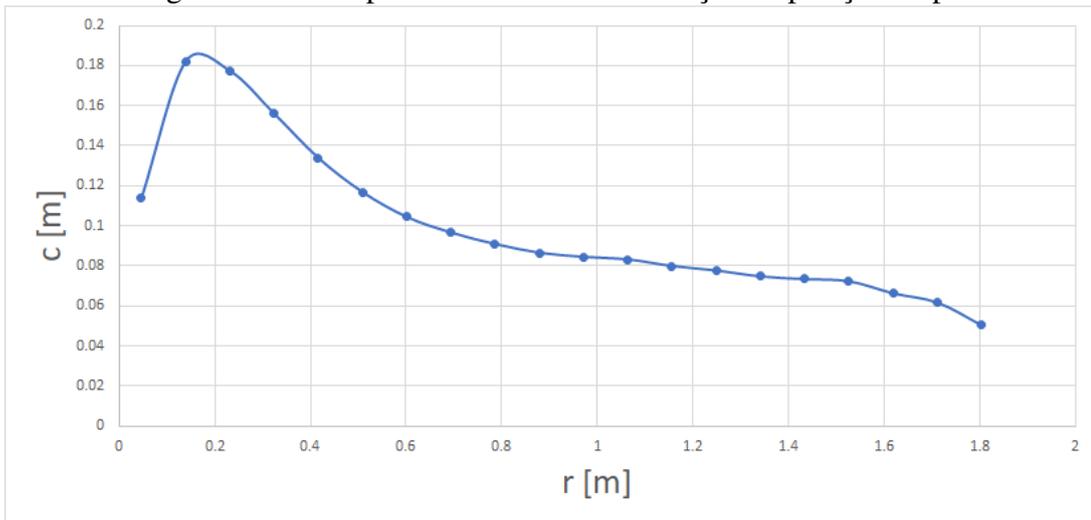
Figura 4.1 – Razão de velocidade na ponta da pá vs. Coeficiente de Potência



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

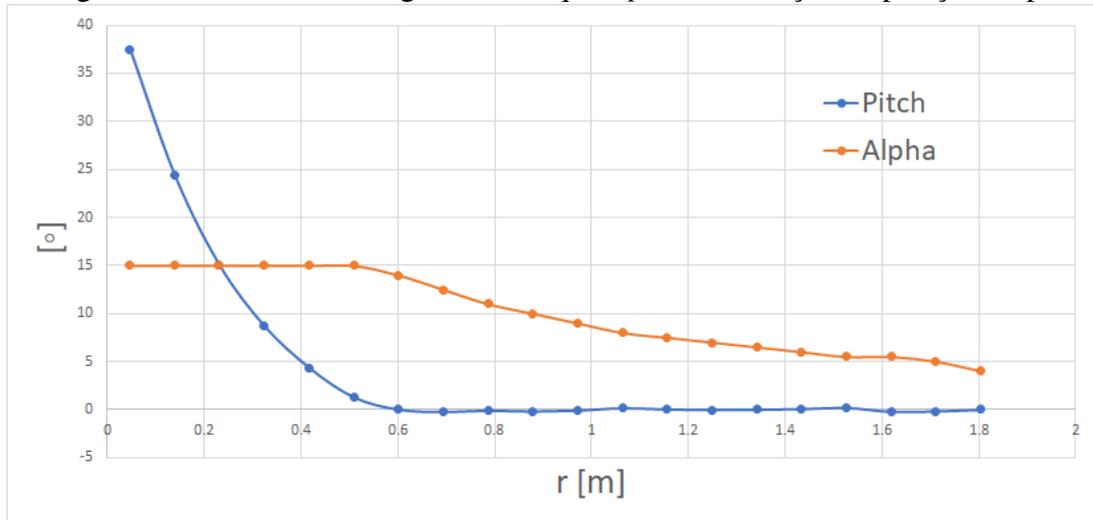
Como observado na Figura 4.1, o valor máximo de coeficiente de potência de 0,4822 obtido ocorre para λ igual a 8. Para construção tri-dimensional da pá são necessários os valores de corda e pitch local. Os valores de corda em função da posição da pá encontram-se no gráfico da Figura 4.2. Os valores de pitch e α encontram-se no gráfico da Figura 4.3. Os valores do número de Reynolds encontram-se no gráfico da Figura 4.4. Os valores do número de Mach encontram-se no gráfico da Figura 4.5.

Figura 4.2 – Comprimento de corda em função da posição da pá



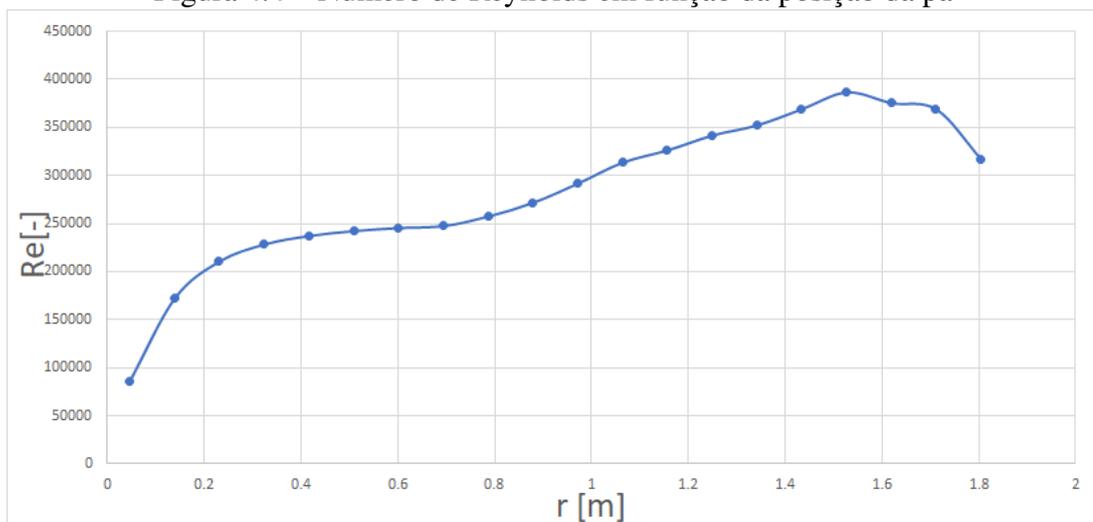
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 4.3 – Valores dos ângulos de ataque e *pitch* em função da posição da pá



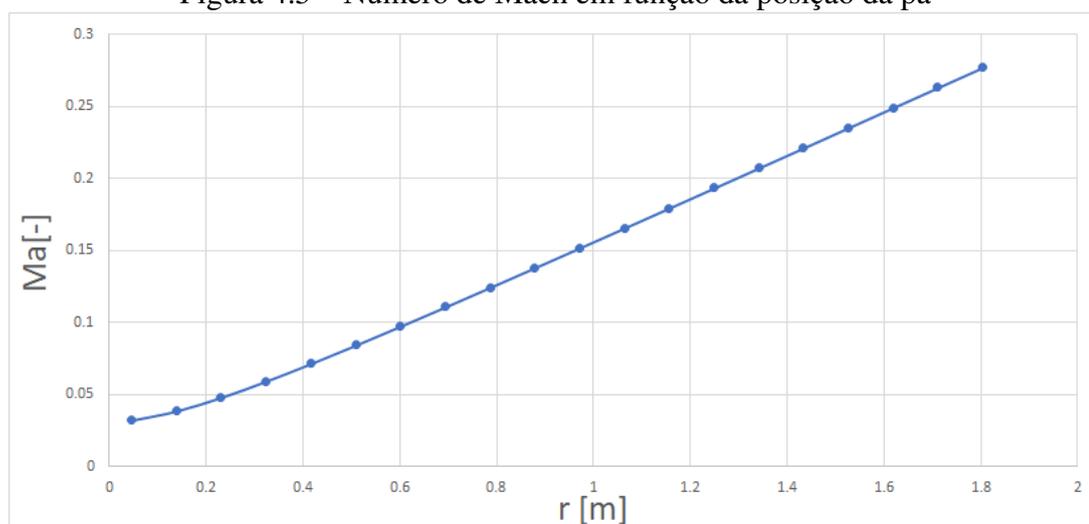
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 4.4 – Número de Reynolds em função da posição da pá



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 4.5 – Número de Mach em função da posição da pá



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

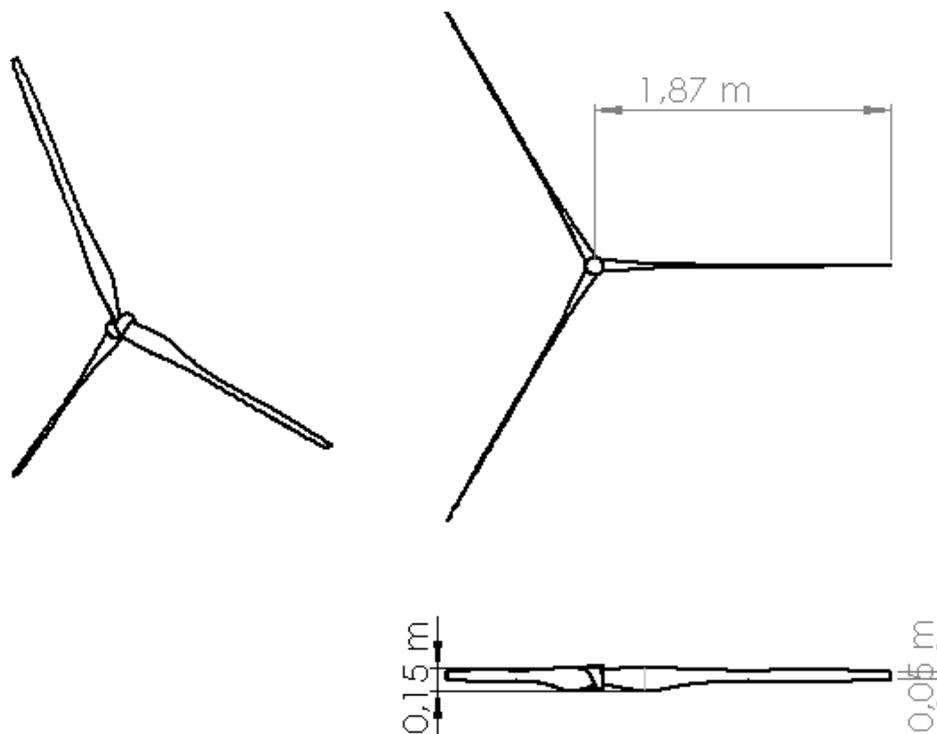
Em seguida, são obtidos os NACAs ótimos de cada seção. Os perfis ótimos definidos e seus dados de C_p , eficiência mecânica e potência da turbina encontram-se descritos na Tabela 4.2, tendo em vista a primeira geometria.

Tabela 4.2 – Dados da primeira geometria de turbina

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Razão de velocidade na ponta da pá	λ	8	[—]
Perfil na raiz	$foil_{1,raiz}$	NACA 2219	[—]
Perfil no meio	$foil_{1,meio}$	NACA 2315	[—]
Perfil na ponta	$foil_{1,ponta}$	NACA 2412	[—]
Coefficiente de potência da turbina	$C_{p,1}$	0,4822	[—]
Eficiência mecânica	η	0,7	[—]
Potência da turbina	P_1	3,82	[kW]

Com as informações geométricas pode-se fazer o modelo tridimensional da turbina eólica no SolidWorks. Duas vistas cotadas do modelo são apresentadas na Figura 4.6.

Figura 4.6 – Vistas da primeira geometria de turbina



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

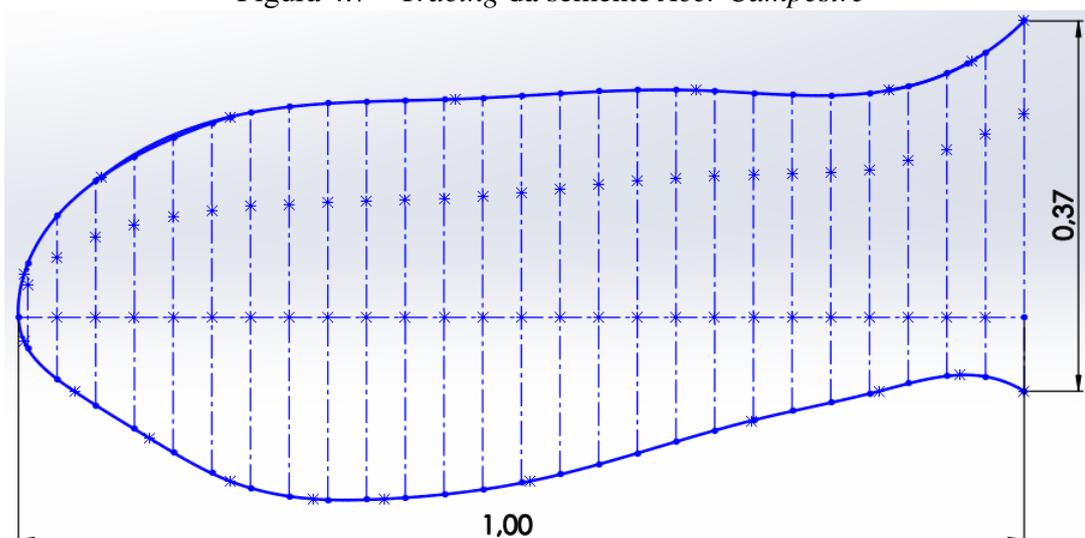
4.2 *Tracing* das sementes

Outra parte fundamental é aproveitar as informações provenientes das sementes. O *tracing* e gráficos para cada semente são apresentados nas subseções a seguir.

4.2.1 *Acer Campestre*

Utilizando as Figuras de (MITCHELL; MORE, 1997), o *tracing* da semente *Acer Campestre* feito no software SolidWorks é apresentado na Figura 4.7.

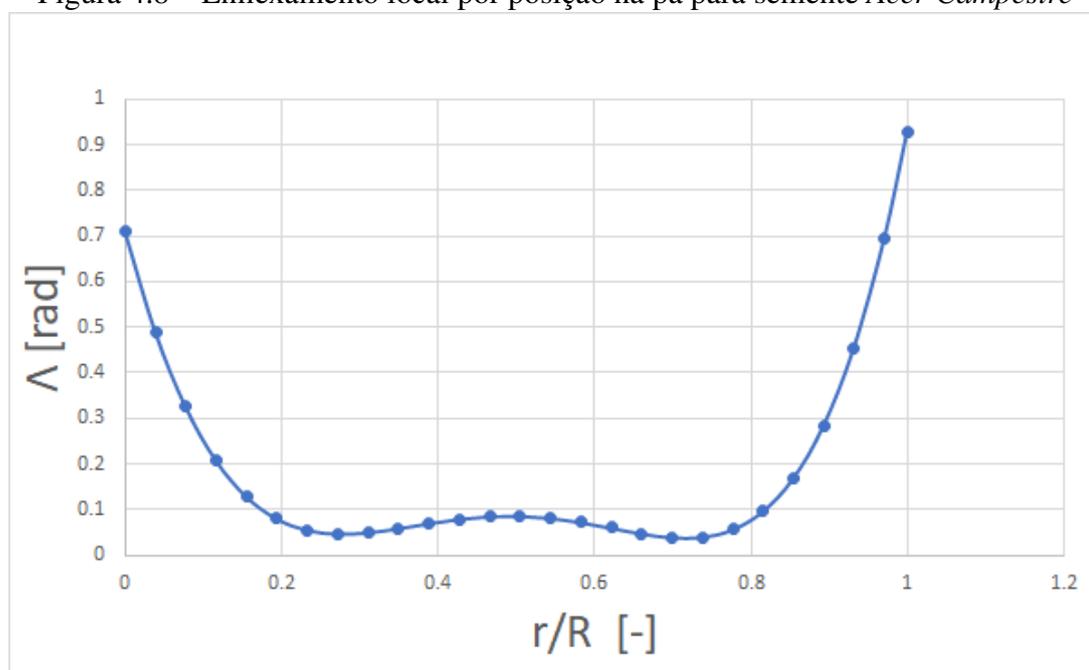
Figura 4.7 – Tracing da semente *Acer Campestre*



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Da Figura 4.7 é obtido o valor de enflexamento local utilizando a posição de 1/4 de corda como referência. Um gráfico com os valores locais de enflexamento por um comprimento adimensionalizado de pá encontra-se na Figura 4.8.

Figura 4.8 – Enflexamento local por posição na pá para semente *Acer Campestre*



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

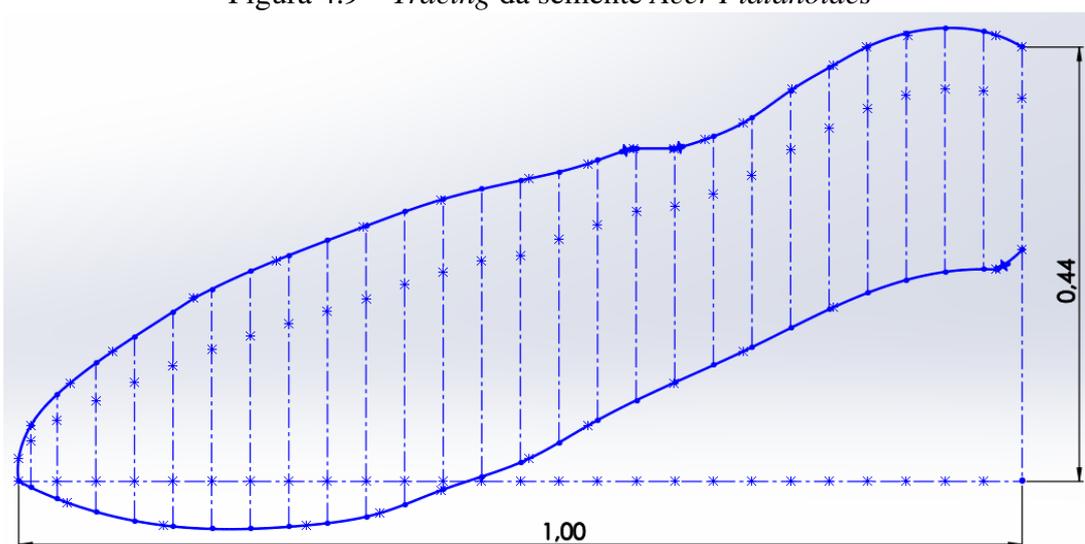
Da Figura 4.8 é traçada uma linha de tendência a fim de equacionar o enflexamento local em função da posição na pá. Esse procedimento é relevante pois em futuras aplicações do BEMM pode-se colocar um número qualquer de painéis e o enflexamento local pode ser prontamente obtido. Para a semente *Acer Campestre* a linha de tendência obtida é polinomial de quinta ordem com valor de R^2 igual a 1, mostrado na Equação 4.1. Por estarem sendo utilizados 24 pontos de dados, não há preocupação de inflação do R^2 pelo polinômio de alta ordem.

$$\Lambda_{campestre} = 3,9558 \left(\frac{r}{R}\right)^5 + 9,1618 \left(\frac{r}{R}\right)^4 - 28,208 \left(\frac{r}{R}\right)^3 + 21,797 \left(\frac{r}{R}\right)^2 - 6,4876 \left(\frac{r}{R}\right) + 0,7102 \quad (4.1)$$

4.2.2 *Acer Platanoides*

Novamente utilizando as Figuras de (MITCHELL; MORE, 1997), o *tracing* da semente *Acer Platanoides* feito no software SolidWorks é apresentado na Figura 4.9.

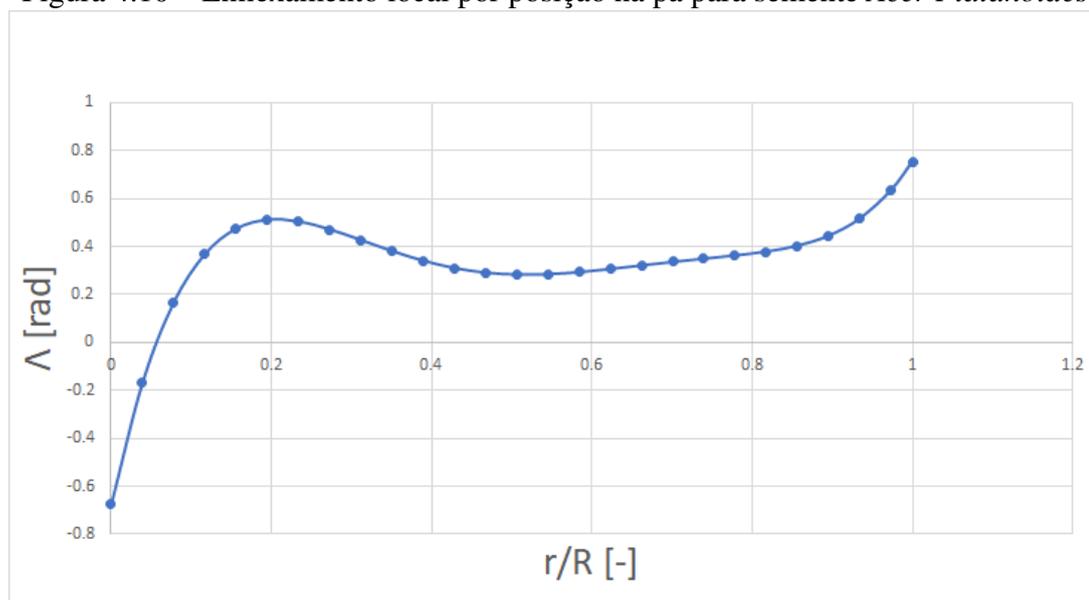
Figura 4.9 – *Tracing* da semente *Acer Platanoides*



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Em procedimento semelhante, da Figura 4.9 é obtido o valor de enflexamento local utilizando a posição de 1/4 de corda como referência. Um gráfico com os valores locais de enflexamento por um comprimento adimensionalizado de pá encontra-se na Figura 4.10.

Figura 4.10 – Enflexamento local por posição na pá para semente *Acer Platanoides*



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

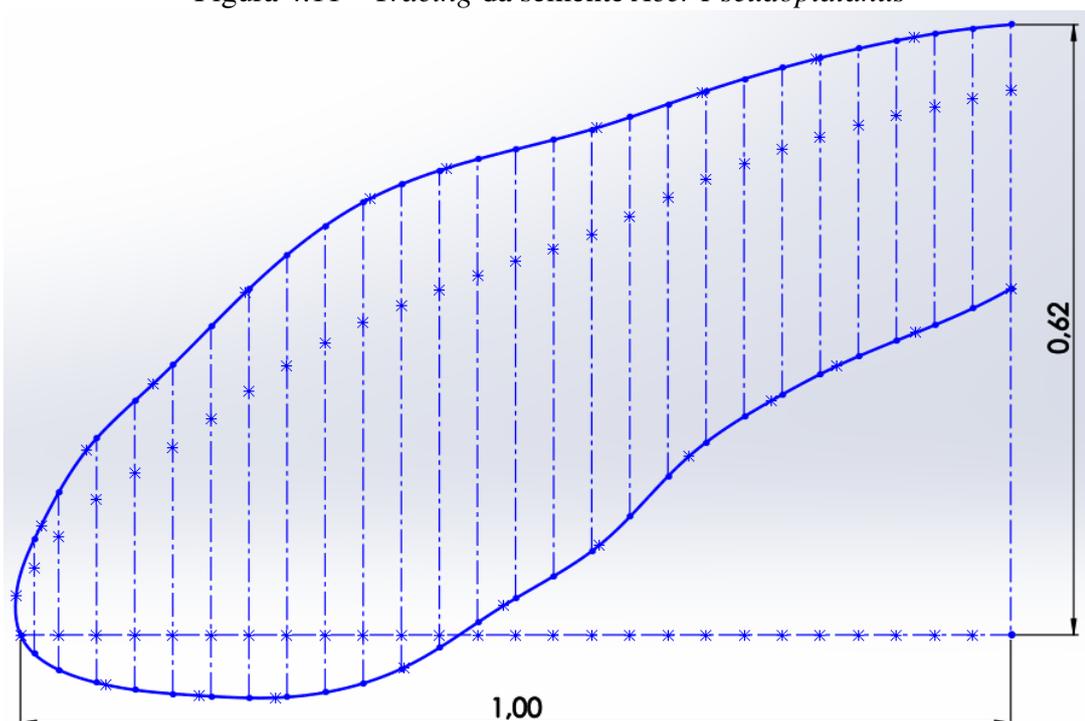
Para a semente *Acer Platanoides* a linha de tendência obtida também é polinomial de quinta ordem com valor de R^2 igual a 1, mostrado na Equação 4.2.

$$\Lambda_{Platanoides} = 46,963 \left(\frac{r}{R}\right)^5 - 134,47 \left(\frac{r}{R}\right)^4 + 145,97 \left(\frac{r}{R}\right)^3 - 72,658 \left(\frac{r}{R}\right)^2 + 15,627 \left(\frac{r}{R}\right) - 0,6747 \quad (4.2)$$

4.2.3 *Acer Pseudoplatanus*

Por fim, também utilizando as Figuras de (MITCHELL; MORE, 1997) como base, o *tracing* da semente *Acer Pseudoplatanus* feito no software SolidWorks é apresentado na Figura 4.11.

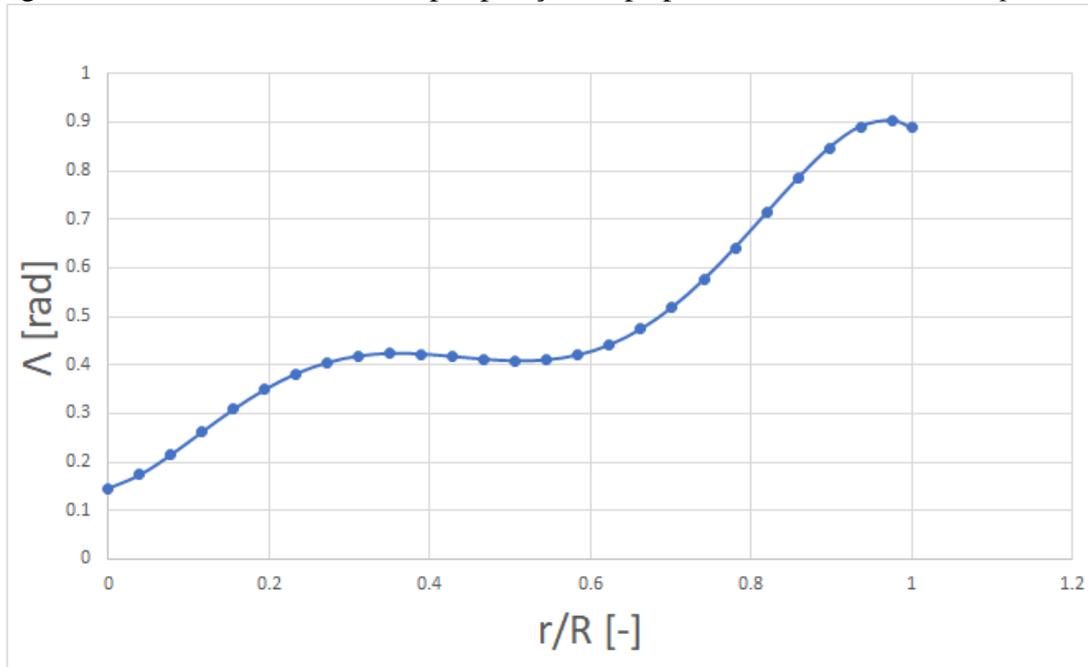
Figura 4.11 – Tracing da semente *Acer Pseudoplatanus*



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

O gráfico com os valores locais de enflexamento por um comprimento adimensionalizado de pá encontra-se na Figura 4.12.

Figura 4.12 – Enflexamento local por posição na pá para semente *Acer Pseudoplatanus*



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Para a semente *Acer Pseudoplatanus* a linha de tendência obtida também é polinomial de quinta ordem com valor de R^2 igual a 1, mostrado na Equação 4.3.

$$\Lambda_{Pseudoplatanus} = -21,234 \left(\frac{r}{R}\right)^5 + 48,336 \left(\frac{r}{R}\right)^4 - 35,102 \left(\frac{r}{R}\right)^3 + 8,3101 \left(\frac{r}{R}\right)^2 + 0,4304 \left(\frac{r}{R}\right) + 0,1459 \quad (4.3)$$

4.3 Segunda Geometria

Determinadas as equações de enflexamento para cada semente, agora pode-se fazer um procedimento similar à primeira geometria. A mudança se dá nos usos da Equação 2.14 corrigindo o valor de Mach localmente na entrada do software XFOIL e da Equação 2.15 corrigindo os valores de saída do XFOIL do coeficiente de sustentação. Como já falado anteriormente, o uso do enflexamento ao longo de todo o comprimento será ineficiente. Assim, o início do uso de enflexamento será um critério de varredura em cada semente.

4.3.1 *Acer Campestre*

Repetindo o BEMM mas com os valores de enflexamento da Equação 4.1, é feito um gráfico analisando o valor de coeficiente de potência final para cada posição de início de enflexamento. Esse gráfico é representado na Figura 4.13.

Figura 4.13 – C_p em função do ponto início do enflexamento da pá para *Acer Campestre*

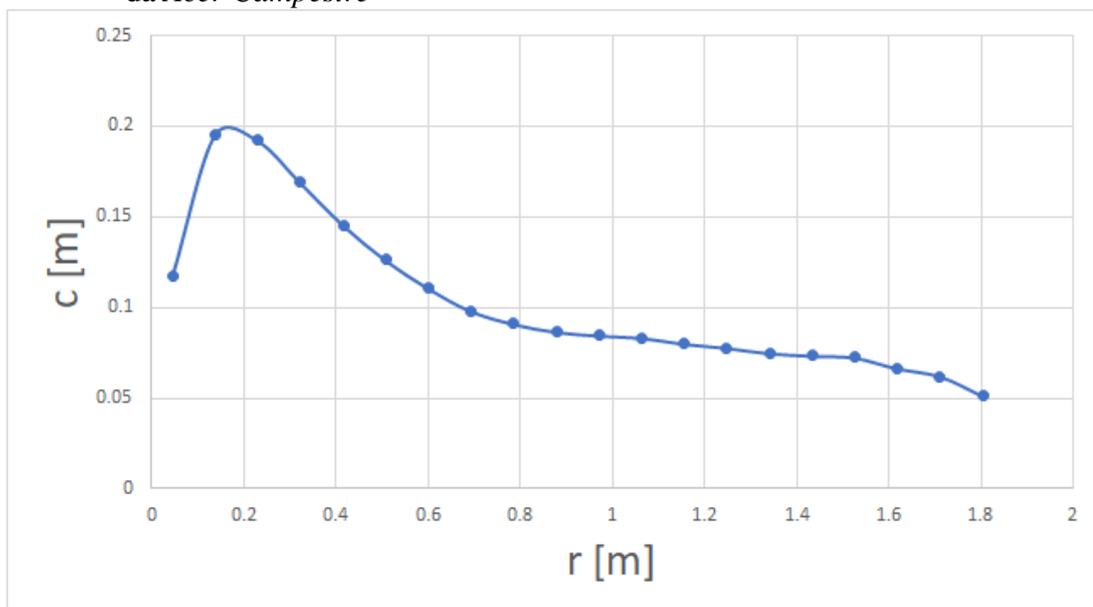


Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Como observado pelo gráfico na Figura 4.13, a introdução do enflexamento na geometria tem o seu maior ganho em, aproximadamente, 85% do comprimento da pá. Colocar o enflexamento desde o início reduz muito a potência da turbina. Colocar muito próximo do final se aproxima do caso sem enflexamento.

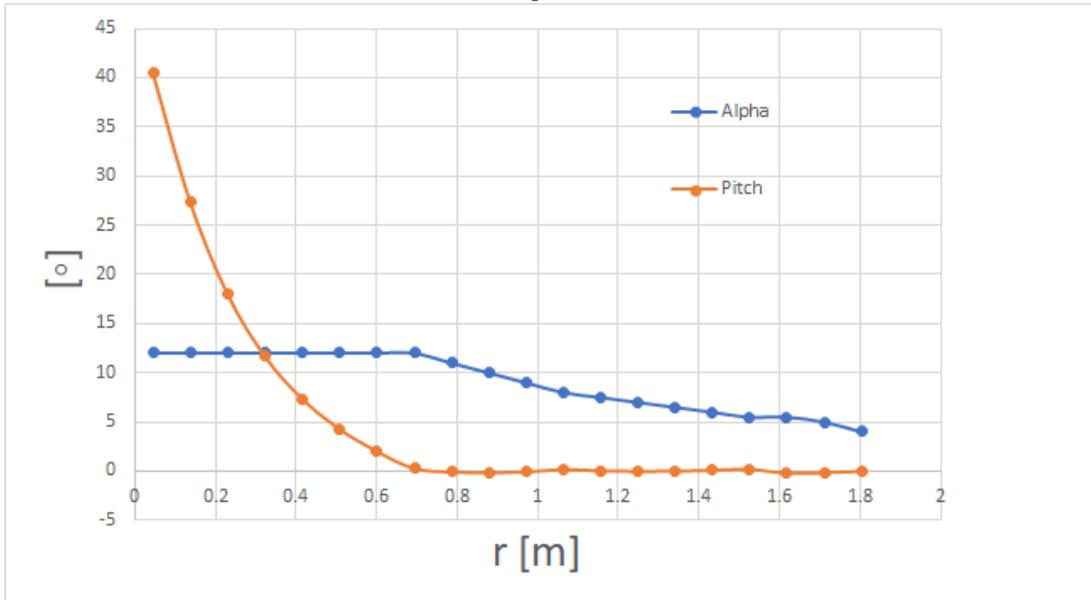
Assim, os dados da geometria da turbina com enflexamento em 85% da corda encontram-se logo abaixo. Os valores de corda em função da posição da pá encontram-se no gráfico da Figura 4.14. Os valores de pitch e α encontram-se no gráfico da Figura 4.15. Os valores do número de Reynolds encontram-se no gráfico da Figura 4.16. Os valores do número de Mach encontram-se no gráfico da Figura 4.17.

Figura 4.14 – Comprimento de corda em função da posição da pá para turbina com enflexamento da *Acer Campestre*



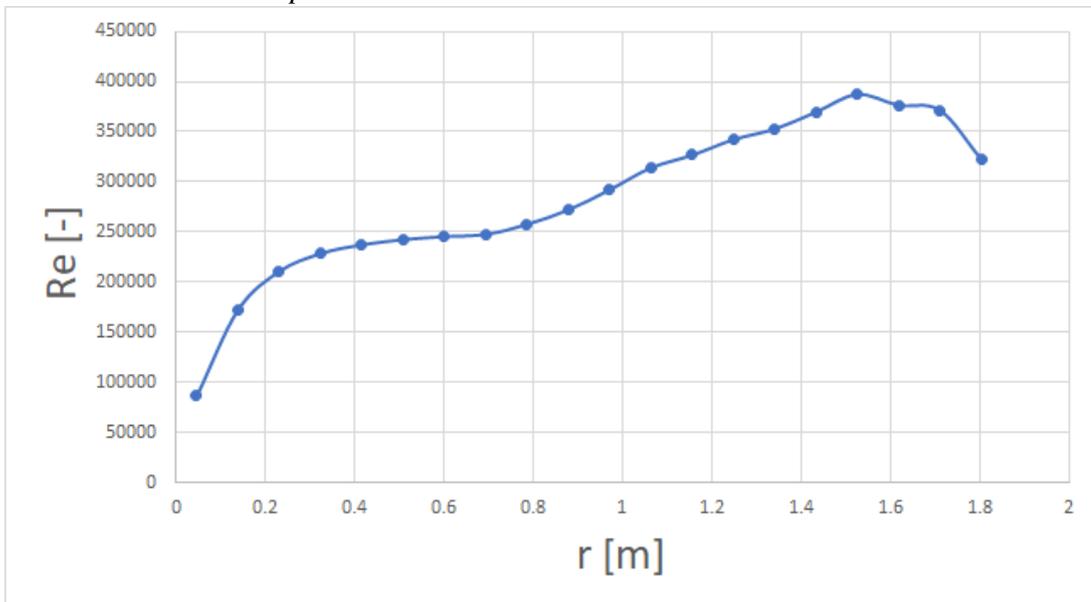
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 4.15 – Valores dos ângulos de ataque e *pitch* em função da posição da pá para turbina com enflexamento da *Acer Campestre*



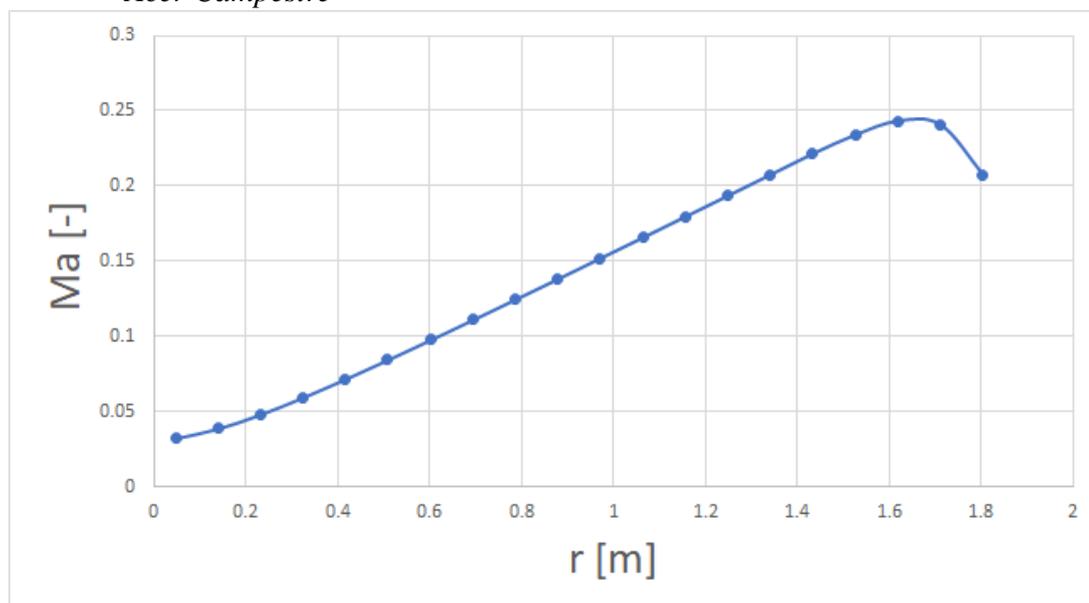
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 4.16 – Número de Reynolds em função da posição da pá para turbina com enflexamento da *Acer Campestre*



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 4.17 – Número de Mach em função da posição da pá para turbina com enflexamento da *Acer Campestre*



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Finalmente, as demais informações geométricas e de desempenho da turbina intermediária com enflexamento da *Acer Campestre* encontram-se na Tabela 4.3.

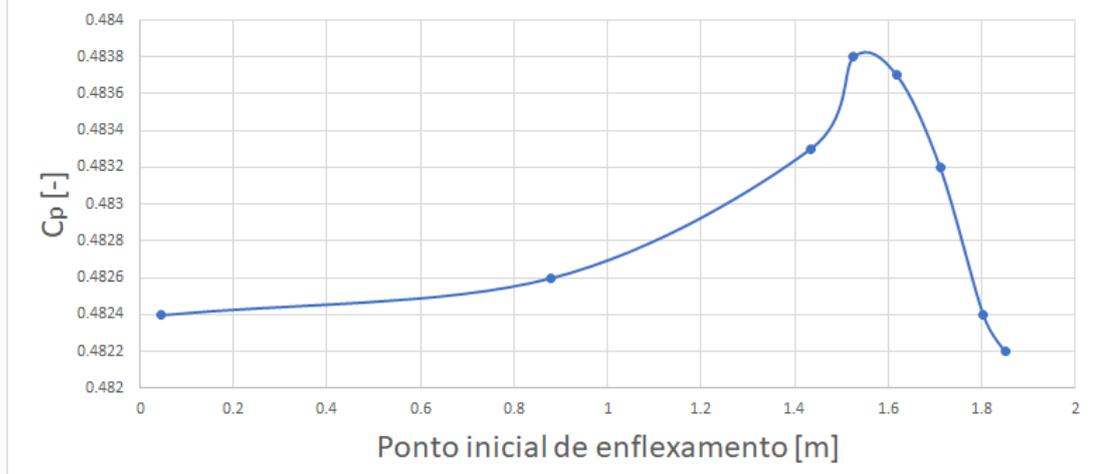
Tabela 4.3 – Dados da segunda geometria de turbina - *Acer Campestre*

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Razão de velocidade na ponta da pá	λ	8	[—]
Perfil na raiz	$foil_{2c,raiz}$	NACA 2214	[—]
Perfil no meio	$foil_{2c,meio}$	NACA 2213	[—]
Perfil na ponta	$foil_{2c,ponta}$	NACA 2313	[—]
Coefficiente de potência da turbina	$C_{p,2c}$	0,4838	[—]
Eficiência mecânica	η	0,7	[—]
Potência da turbina	P_{2c}	3,84	[kW]

4.3.2 *Acer Platanoides*

De forma semelhante, mas utilizando a Equação 4.2, o gráfico de coeficiente de potência final para cada posição de início de enflexamento é representado na Figura 4.18.

Figura 4.18 – C_p em função do ponto início do enflexamento da pá para *Acer Platanoides*

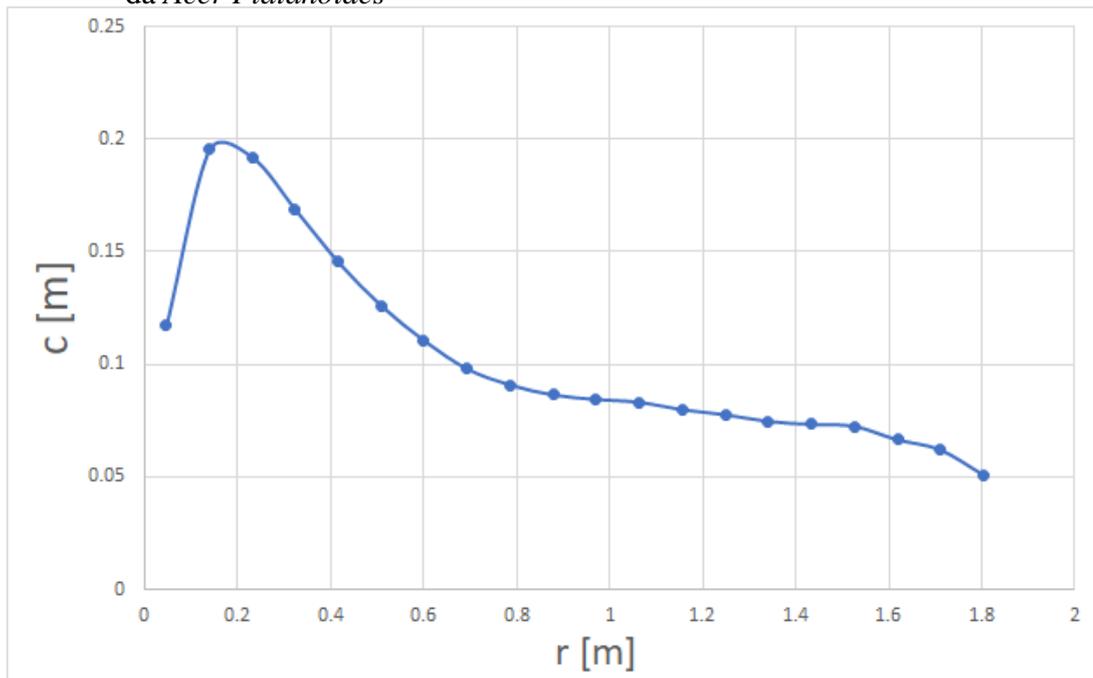


Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Pelo gráfico na Figura 4.18, a introdução do enflexamento na geometria tem o seu maior ganho em, aproximadamente, 84% do comprimento da pá. Esse valor é bem próximo ao já apresentado pela semente *Acer Campestre*.

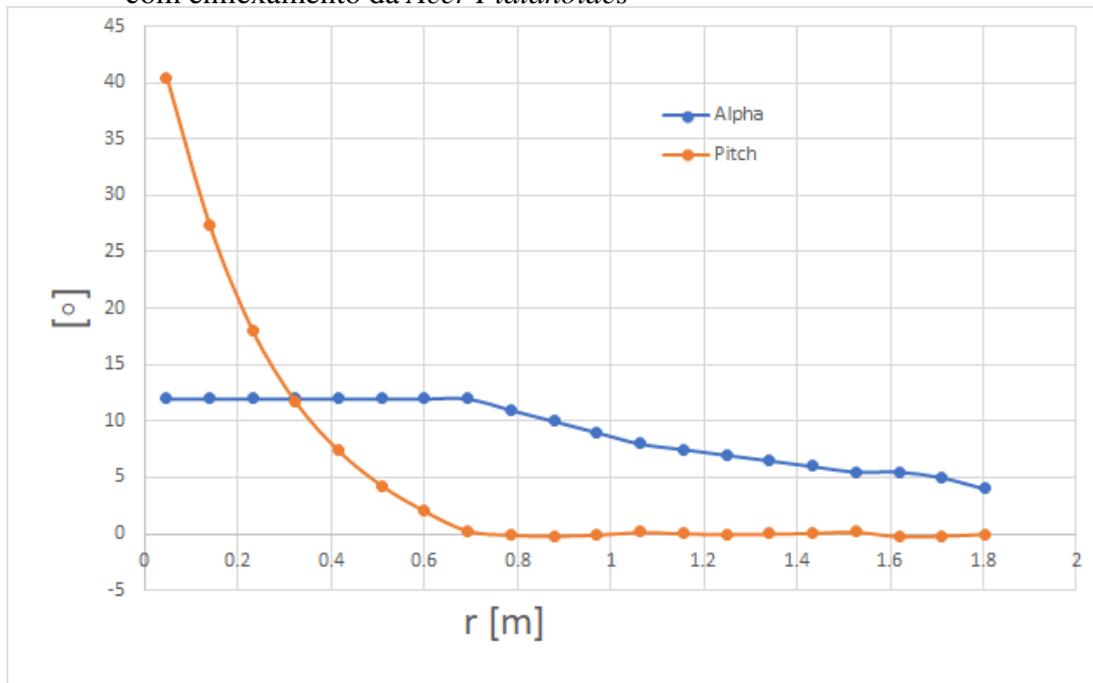
Assim, os dados da geometria da turbina com enflexamento em 83% da corda encontram-se logo abaixo. Os valores de corda em função da posição da pá encontram-se no gráfico da Figura 4.19. Os valores de pitch e α encontram-se no gráfico da Figura 4.20. Os valores do número de Reynolds encontram-se no gráfico da Figura 4.21. Os valores do número de Mach encontram-se no gráfico da Figura 4.22.

Figura 4.19 – Comprimento de corda em função da posição da pá para turbina com enflexamento da *Acer Platanoides*



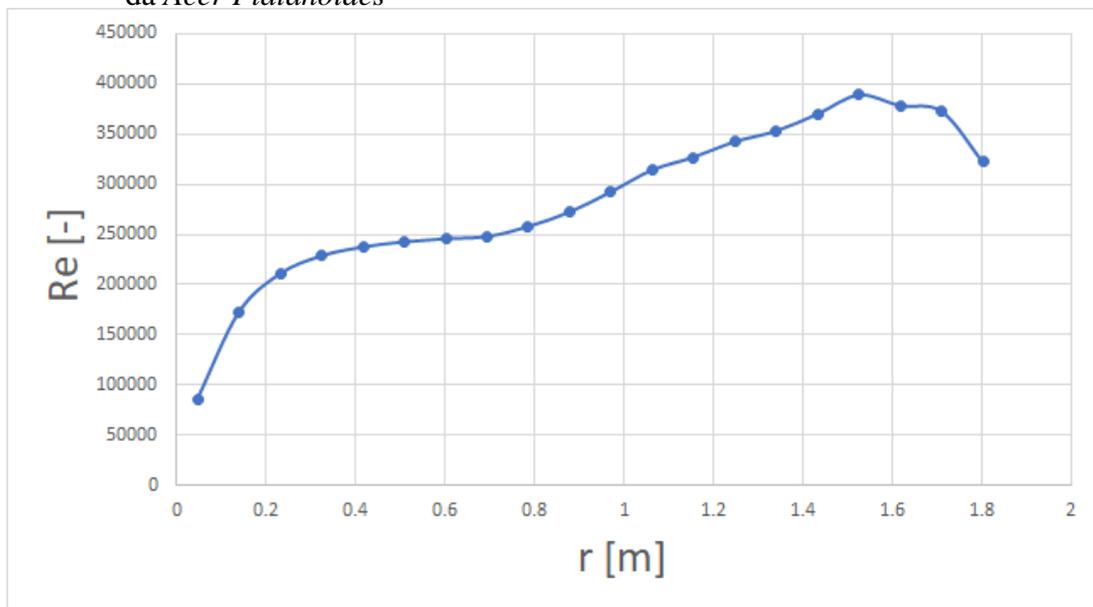
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 4.20 – Valores dos ângulos de ataque e *pitch* em função da posição da pá para turbina com enflexamento da *Acer Platanoides*



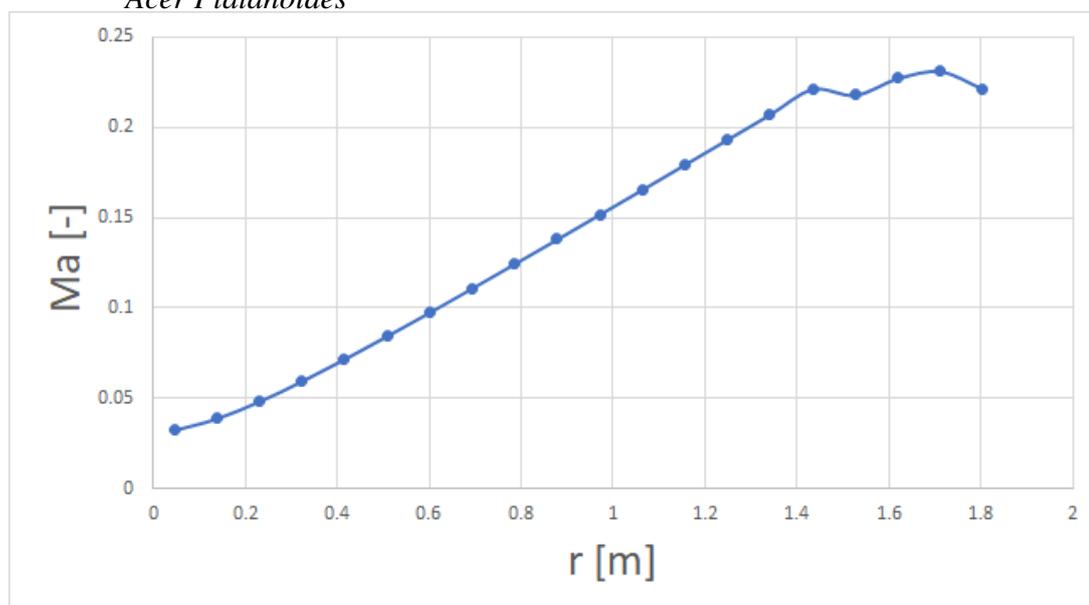
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 4.21 – Número de Reynolds em função da posição da pá para turbina com enflexamento da *Acer Platanoides*



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 4.22 – Número de Mach em função da posição da pá para turbina com enflexamento da *Acer Platanoides*



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Finalmente, as demais informações geométricas e de desempenho da turbina intermediária com enflexamento da *Acer Platanoides* encontram-se na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Dados da segunda geometria de turbina - *Acer Platanoides*

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Razão de velocidade na ponta da pá	λ	8	[—]
Perfil na raiz	$foil_{2p,raiz}$	NACA 2214	[—]
Perfil no meio	$foil_{2p,meio}$	NACA 2313	[—]
Perfil na ponta	$foil_{2p,ponta}$	NACA 2412	[—]
Coefficiente de potência da turbina	$C_{p,2p}$	0,4838	[—]
Eficiência mecânica	η	0,7	[—]
Potência da turbina	P_{2p}	3,84	[kW]

4.3.3 *Acer Pseudoplatanus*

Por fim, a última das geometrias secundárias a serem criadas é referente a semente *Acer Pseudoplatanus*. Utilizando a Equação 4.3, o gráfico de coeficiente de potência final para cada posição de início de enflexamento é representado na Figura 4.23.

Figura 4.23 – C_p em função do ponto início do enflexamento da pá para *Acer Pseudoplatanus*

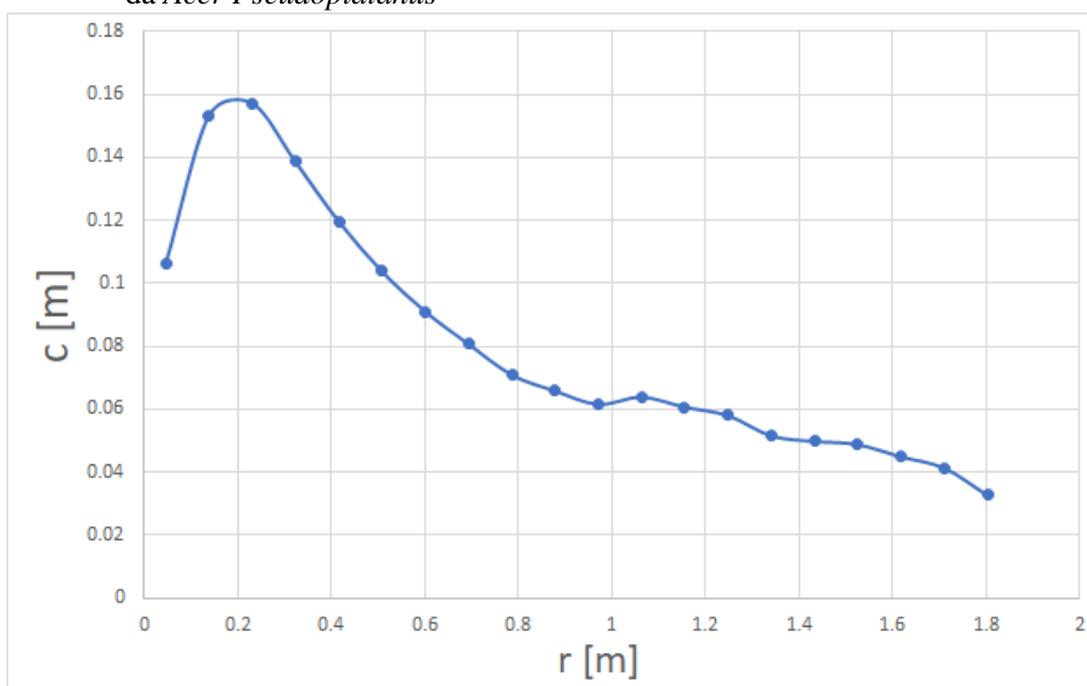


Fonte: Elaborado pelo próprio autor

A introdução do enflexamento na geometria tem o seu maior ganho em, aproximadamente, 82% do comprimento da pá. Esse valor já é um pouco mais afastado quando comparado as outras sementes.

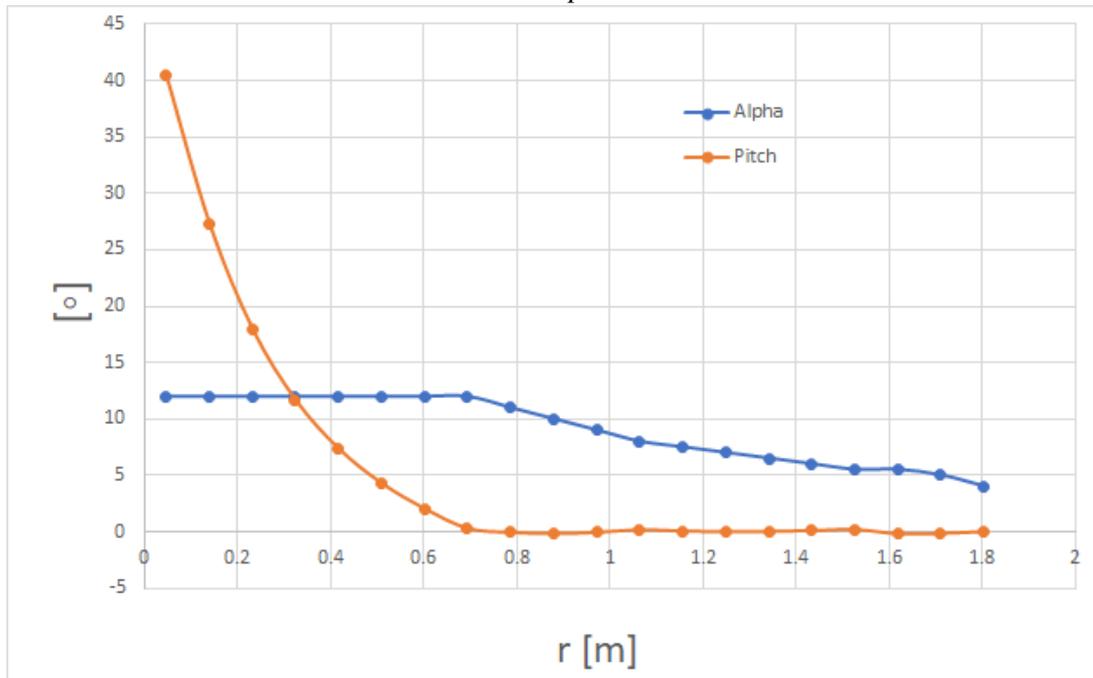
Os valores de corda em função da posição da pá encontram-se no gráfico da Figura 4.24. Os valores de pitch e α encontram-se no gráfico da Figura 4.25. Os valores do número de Reynolds encontram-se no gráfico da Figura 4.26. Os valores do número de Mach encontram-se no gráfico da Figura 4.27.

Figura 4.24 – Comprimento de corda em função da posição da pá para turbina com enflexamento da *Acer Pseudoplatanus*



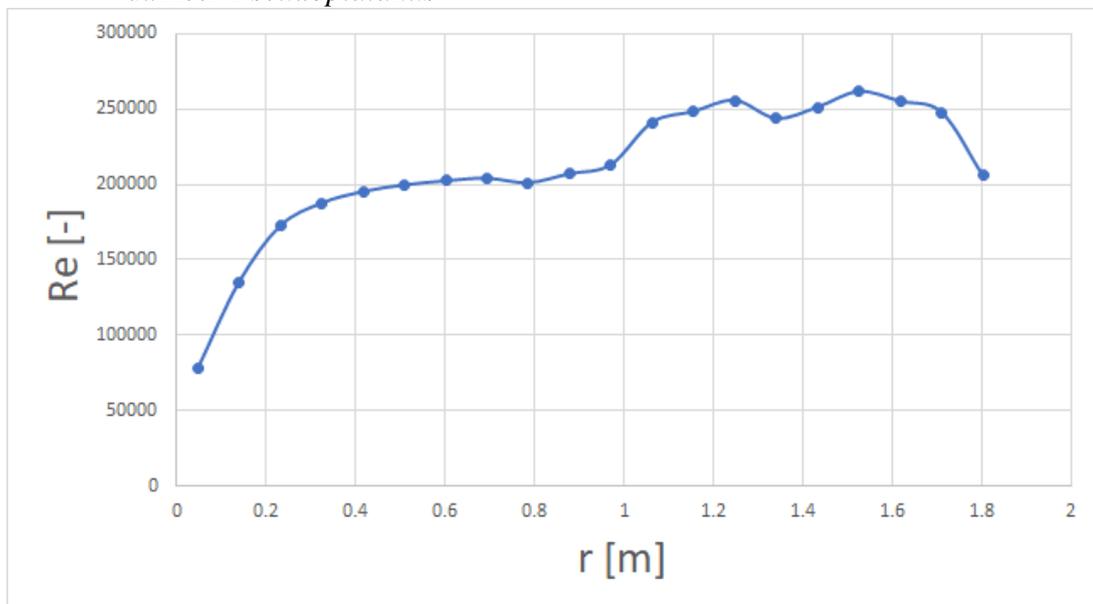
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 4.25 – Valores dos ângulos de ataque e *pitch* em função da posição da pá para turbina com enflexamento da *Acer Pseudoplatanus*



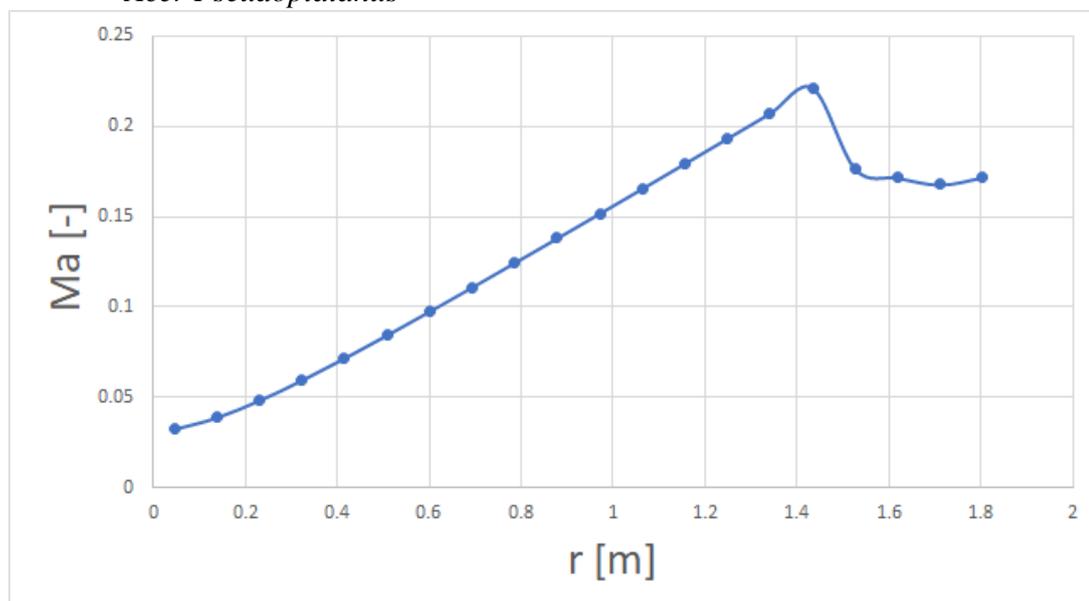
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 4.26 – Número de Reynolds em função da posição da pá para turbina com enflexamento da *Acer Pseudoplatanus*



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 4.27 – Número de Mach em função da posição da pá para turbina com enflexamento da *Acer Pseudoplatanus*



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Por último, as demais informações geométricas e de desempenho da turbina intermediária com enflexamento da *Acer Pseudoplatanus* encontram-se na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Dados da segunda geometria de turbina - *Acer Pseudoplatanus*

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Razão de velocidade na ponta da pá	λ	8	[—]
Perfil na raiz	$foil_{2pp,raiz}$	NACA 6414	[—]
Perfil no meio	$foil_{2pp,meio}$	NACA 6412	[—]
Perfil na ponta	$foil_{2pp,ponta}$	NACA 6412	[—]
Coefficiente de potência da turbina	$C_{p,2pp}$	0,4882	[—]
Eficiência mecânica	η	0,7	[—]
Potência da turbina	P_{2pp}	3,87	[kW]

4.4 Geometria Final

Com os dados geométricos e de escoamento das três turbinas, pode-se começar o processo final de confecção da geometria. O passo seguinte é, utilizando como entrada os perfis detalhados nas Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 e os valores de Re e Ma dos escoamentos, criar perfis aerodinâmicos pelo método de algoritmo genético.

4.4.1 Algoritmo genético

4.4.1.1 *Acer Campestre*

Inicialmente, são definidos os valores médios de Reynolds e Mach para cada seção. Utilizando também as informações contidas na Tabela 4.3 é feita uma coletânea de informações para cada seção da pá da turbina bio-inspirada na semente *Acer Campestre*. Essas informações estão organizadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Dados da segunda geometria de turbina por seção - *Acer Campestre*

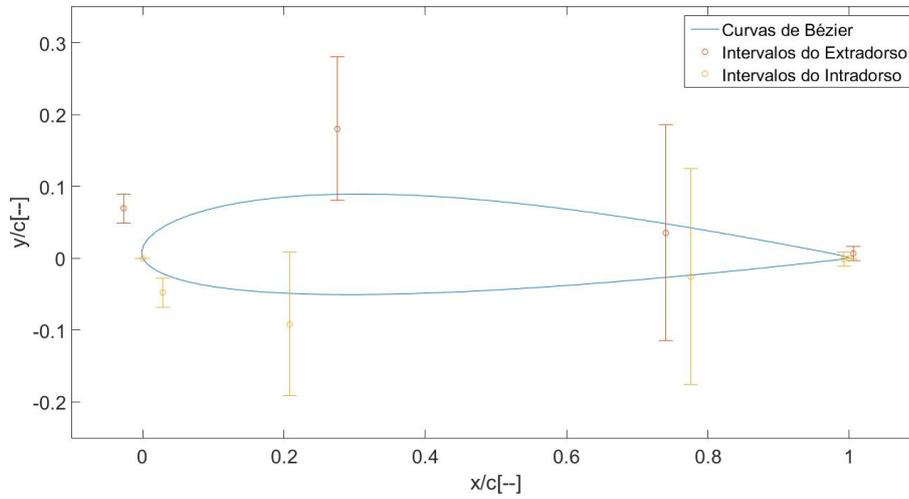
Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Raiz			
Perfil na raiz	$foil_{2c,raiz}$	NACA 2214	[—]
Reynolds médio	$Re_{2c,raiz}$	1,87e+05	[—]
Mach médio	$Ma_{2c,raiz}$	0,05	[—]
Meio			
Perfil no meio	$foil_{2c,meio}$	NACA 2213	[—]
Reynolds médio	$Re_{2c,meio}$	2,97e+05	[—]
Mach médio	$Ma_{2c,meio}$	0,15	[—]
Ponta			
Perfil na ponta	$foil_{2c,ponta}$	NACA 2313	[—]
Reynolds médio	$Re_{2c,ponta}$	3,64e+05	[—]
Mach médio	$Ma_{2c,ponta}$	0,23	[—]

Utilizando (FAZIL; JAYAKUMAR, 2011), cada perfil NACA é convertido em pontos de controle de curvas de Bézier. Ademais, cada pontos de controle é definido um intervalo de variação. Um exemplo para o perfil na raiz da pá é apresentado na Tabela 4.7 e na Figura 4.28.

Tabela 4.7 – Pontos de Controle - NACA 2214

Extradorso		Intradorso	
x/c	y/c	x/c	y/c
0	0	0	0
-0.027	0.069	0.029	-0.048
0.275	0.180	0.208	-0.091
0.741	0.035	0.775	-0.025
1,005	0.007	0.992	-0.001
1	0	1	0

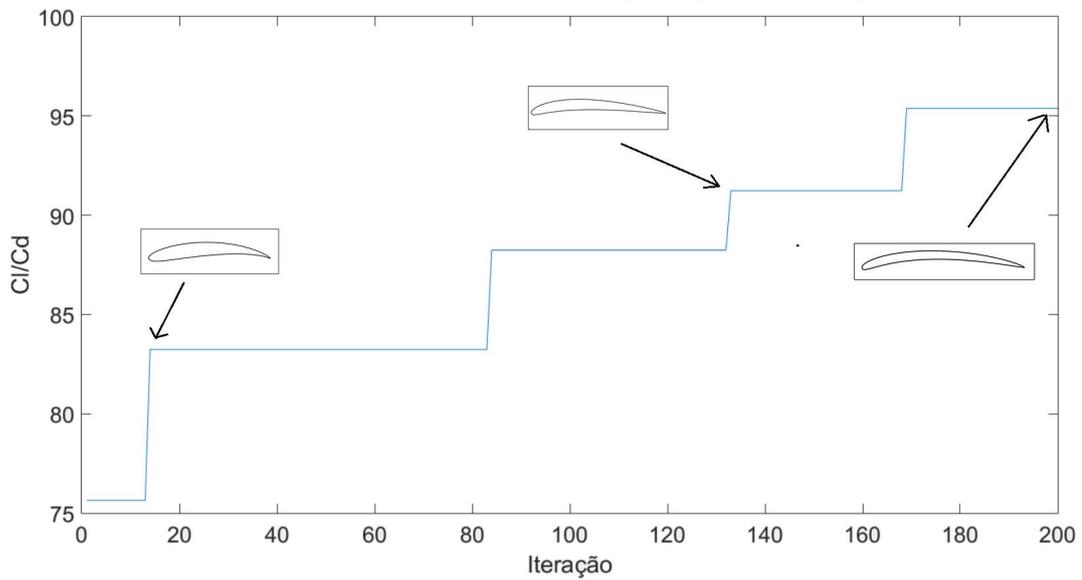
Figura 4.28 – Curvas de Bézier e intervalos de variação de pontos para NACA 2214



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

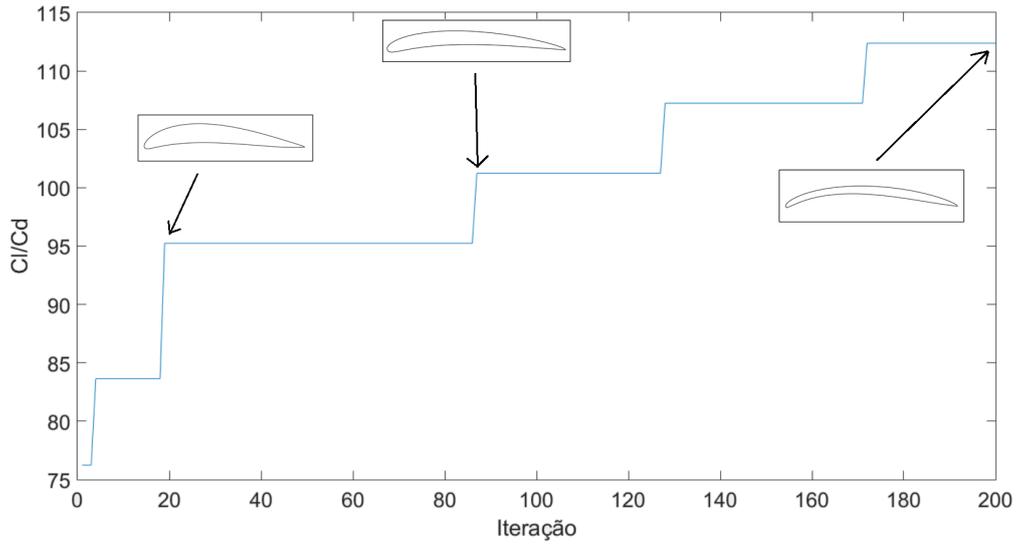
Feito isso para cada um dos perfis da pá, pode-se iniciar o processo do algoritmo genético. A evolução da geometria dos perfis da raiz, meio e ponta é apresentada, respectivamente nas Figuras 4.29, 4.30 e 4.31.

Figura 4.29 – Histórico evolutivo de geometria do perfil para raiz da pá - *Acer Campestre*



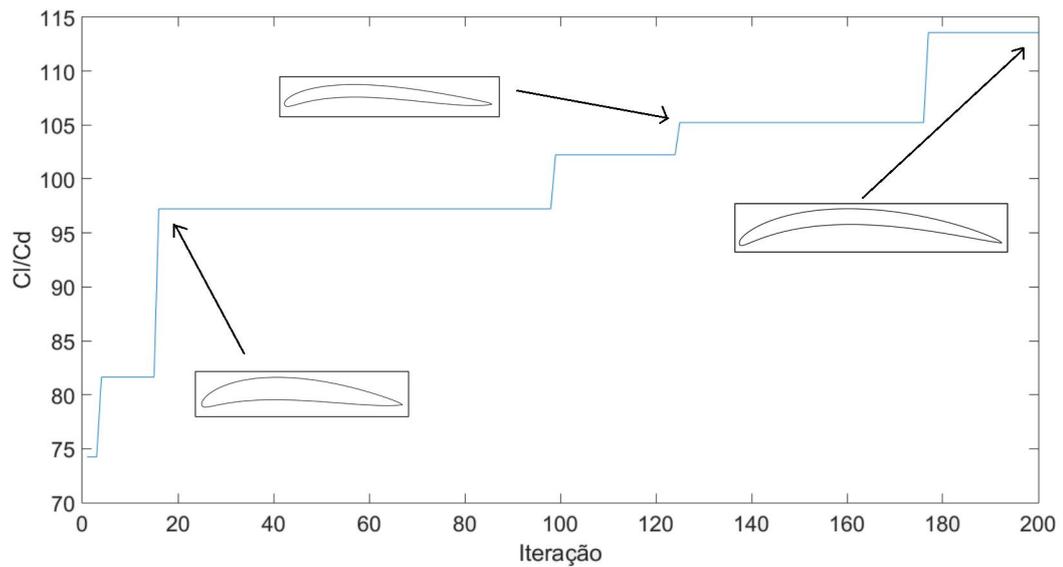
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 4.30 – Histórico evolutivo de geometria do perfil para meio da pá - *Acer Campestre*



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 4.31 – Histórico evolutivo de geometria do perfil para ponta da pá - *Acer Campestre*



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Um resumo das propriedades aerodinâmicas dos perfis finais encontrados para o caso *Acer Campestre* encontra-se na Tabela 4.8

Tabela 4.8 – Dados aerodinâmicos dos perfis GA - *Acer Campestre*

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Raiz			
Reynolds médio	$Re_{2c,raiz}$	1,87e+05	[—]
Mach médio	$Ma_{2c,raiz}$	0,05	[—]
Ângulo de ataque	$\alpha_{c,raiz}$	6,5	[o]
Razão sustentação/arrasto	$(\frac{C_l}{C_d})_{c,raiz}$	94,282	[—]
Meio			
Reynolds médio	$Re_{2c,meio}$	2,97e+05	[—]
Mach médio	$Ma_{2c,meio}$	0,15	[—]
Ângulo de ataque	$\alpha_{c,raiz}$	6	[o]
Razão sustentação/arrasto	$(\frac{C_l}{C_d})_{c,raiz}$	110,876	[—]
Ponta			
Reynolds médio	$Re_{2c,ponta}$	3,64e+05	[—]
Mach médio	$Ma_{2c,ponta}$	0,23	[—]
Ângulo de ataque	$\alpha_{c,raiz}$	6	[o]
Razão sustentação/arrasto	$(\frac{C_l}{C_d})_{c,raiz}$	112,219	[—]

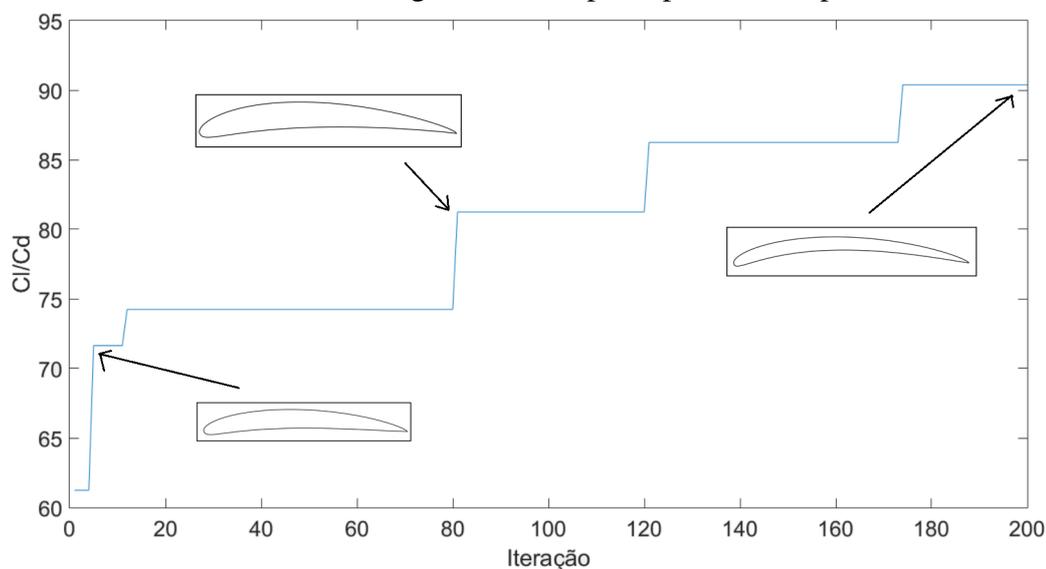
4.4.1.2 *Acer Platanoides*

Semelhante ao feito para a *Acer Campestre*, mas utilizando 4.4 é feita uma coletânea de informações para cada seção da pá da turbina bio-inspirada na semente *Acer Platanoides*. Essas informações estão organizadas na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Dados da segunda geometria de turbina por seção - *Acer Platanoides*

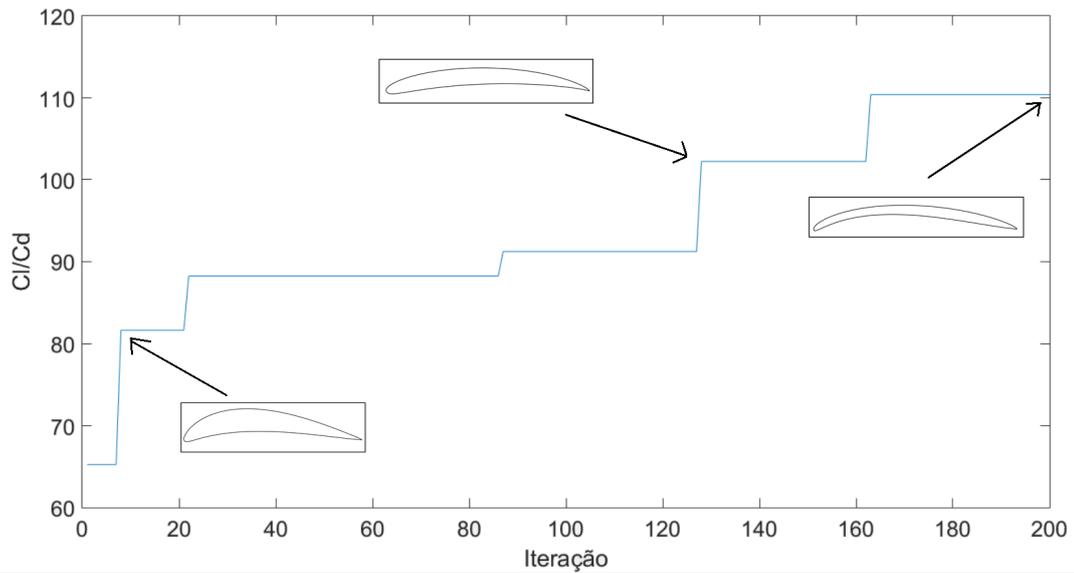
Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Raiz			
Perfil na raiz	$foil_{2p,raiz}$	NACA 2214	[—]
Reynolds médio	$Re_{2p,raiz}$	1,87e+05	[—]
Mach médio	$Ma_{2p,raiz}$	0,05	[—]
Meio			
Perfil no meio	$foil_{2p,meio}$	NACA 2313	[—]
Reynolds médio	$Re_{2p,meio}$	2,96e+05	[—]
Mach médio	$Ma_{2p,meio}$	0,15	[—]
Ponta			
Perfil na ponta	$foil_{2p,ponta}$	NACA 2412	[—]
Reynolds médio	$Re_{2p,ponta}$	3,65e+05	[—]
Mach médio	$Ma_{2p,ponta}$	0,22	[—]

Novamente utilizando (FAZIL; JAYAKUMAR, 2011), cada perfil NACA é convertido em pontos de controle de curvas de Bézier. Logo após, é aplicado o algoritmo genético. A evolução da geometria dos perfis da raiz, meio e ponta é apresentada, respectivamente nas Figuras 4.32, 4.33 e 4.34.

Figura 4.32 – Histórico evolutivo de geometria do perfil para raiz da pá - *Acer Platanoides*

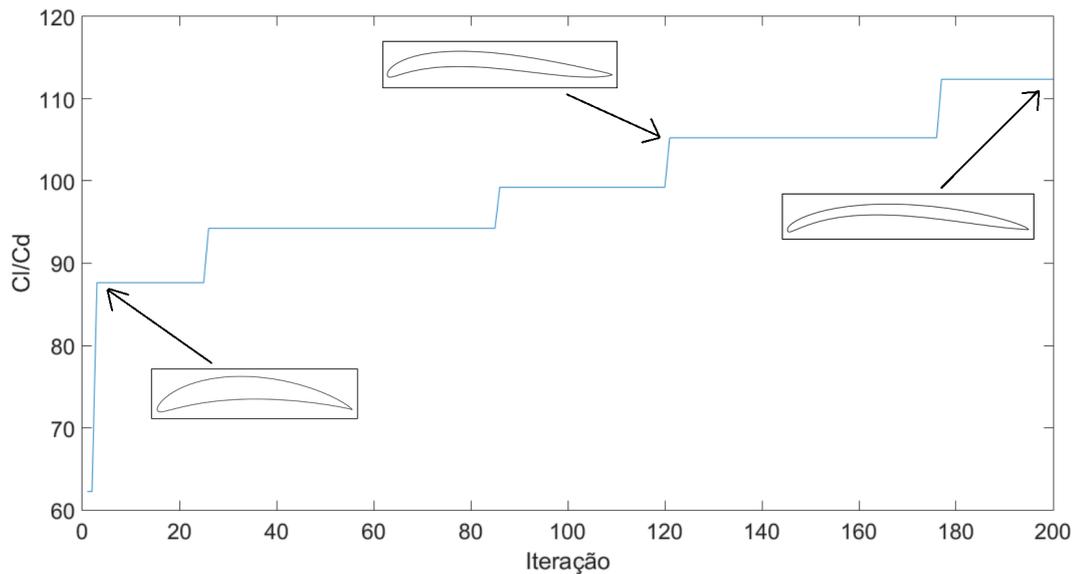
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 4.33 – Histórico evolutivo de geometria do perfil para meio da pá - *Acer Platanoides*



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 4.34 – Histórico evolutivo de geometria do perfil para ponta da pá - *Acer Platanoides*



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Um resumo das propriedades aerodinâmicas dos perfis finais encontrados para o caso *Acer Platanoides* encontra-se na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Dados aerodinâmicos dos perfis GA - *Acer Platanoides*

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Raiz			
Reynolds médio	$Re_{2p,raiz}$	1,87e+05	[—]
Mach médio	$Ma_{2p,raiz}$	0,05	[—]
Ângulo de ataque	$\alpha_{p,raiz}$	6	[°]
Razão sustentação/arrasto	$(\frac{C_l}{C_d})_{p,raiz}$	92,389	[—]
Meio			
Reynolds médio	$Re_{2p,meio}$	2,96e+05	[—]
Mach médio	$Ma_{2p,meio}$	0,15	[—]
Ângulo de ataque	$\alpha_{p,raiz}$	6	[°]
Razão sustentação/arrasto	$(\frac{C_l}{C_d})_{p,raiz}$	111,243	[—]
Ponta			
Reynolds médio	$Re_{2p,ponta}$	3,65e+05	[—]
Mach médio	$Ma_{2p,ponta}$	0,22	[—]
Ângulo de ataque	$\alpha_{p,raiz}$	6	[°]
Razão sustentação/arrasto	$(\frac{C_l}{C_d})_{p,raiz}$	112,532	[—]

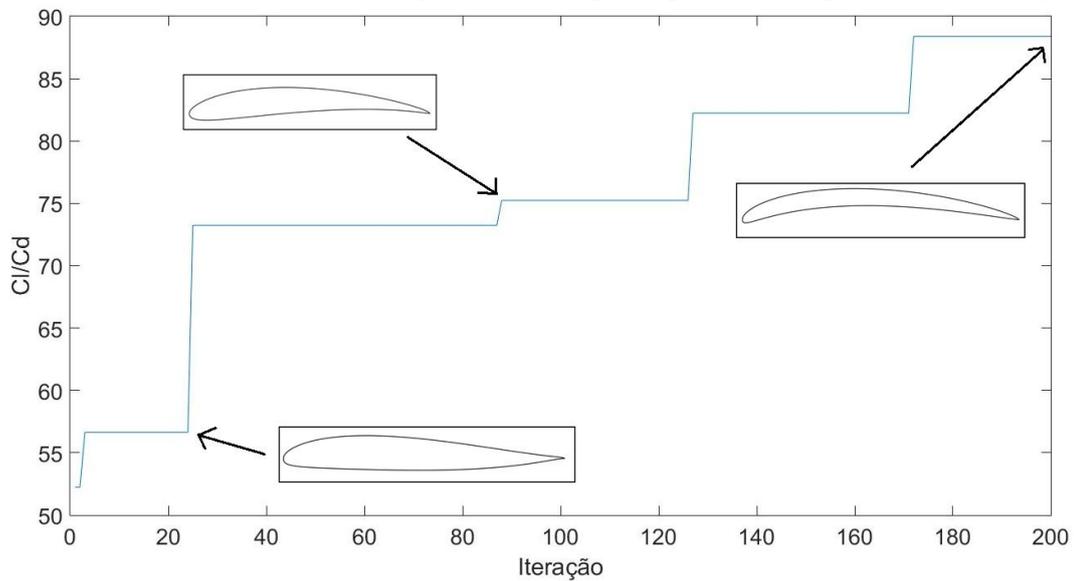
4.4.1.3 *Acer Pseudoplatanus*

Finalmente, utilizando 4.5 é feita uma coletânea de informações para cada seção da pá da turbina bio-inspirada na semente *Acer Pseudoplatanus*. Essas informações estão organizadas na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Dados da segunda geometria de turbina por seção - *Acer Pseudoplatanus*

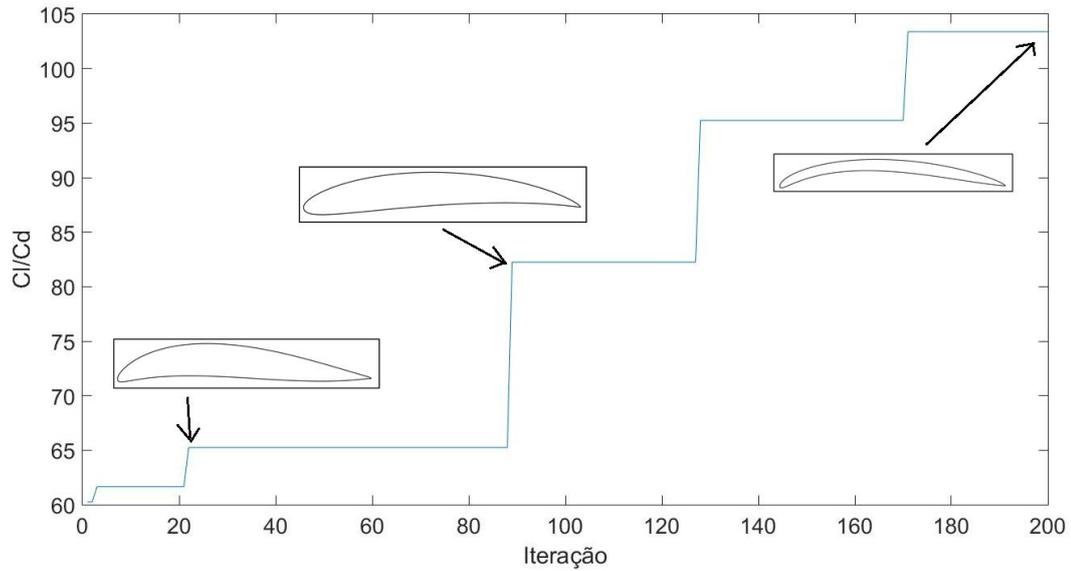
Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Raiz			
Perfil na raiz	$foil_{2pp,raiz}$	NACA 5312	[—]
Reynolds médio	$Re_{2pp,raiz}$	1,53e+05	[—]
Mach médio	$Ma_{2pp,raiz}$	0,05	[—]
Meio			
Perfil no meio	$foil_{2pp,meio}$	NACA 6412	[—]
Reynolds médio	$Re_{2pp,meio}$	2,24e+05	[—]
Mach médio	$Ma_{2pp,meio}$	0,15	[—]
Ponta			
Perfil na ponta	$foil_{2pp,ponta}$	NACA 6412	[—]
Reynolds médio	$Re_{2pp,ponta}$	2,42e+05	[—]
Mach médio	$Ma_{2pp,ponta}$	0,17	[—]

Após converter cada perfil NACA, é aplicado o algoritmo genético. A evolução da geometria dos perfis da raiz, meio e ponta é apresentada, respectivamente nas Figuras 4.35, 4.36 e 4.37.

Figura 4.35 – Histórico evolutivo de geometria do perfil para raiz da pá - *Acer Pseudoplatanus*

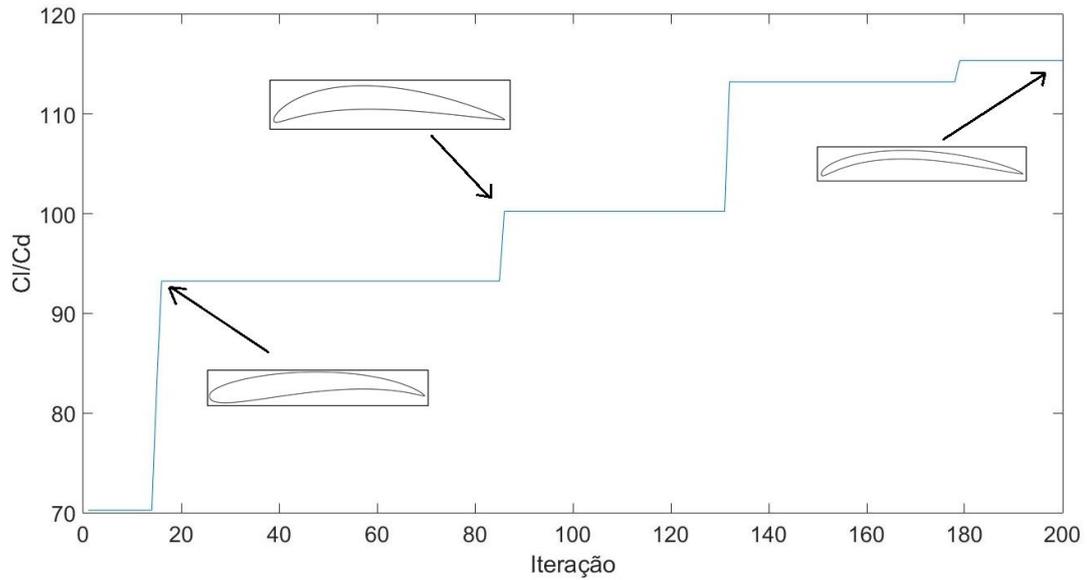
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 4.36 – Histórico evolutivo de geometria do perfil para meio da pá - *Acer Pseudoplatanus*



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 4.37 – Histórico evolutivo de geometria do perfil para ponta da pá - *Acer Pseudoplatanus*



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Um resumo das propriedades aerodinâmicas dos perfis finais encontrados para o caso *Acer Pseudoplatanus* encontra-se na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Dados aerodinâmicos dos perfis GA - *Acer Pseudoplatanus*

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Raiz			
Reynolds médio	$Re_{2pp,raiz}$	1,53e+05	[—]
Mach médio	$Ma_{2pp,raiz}$	0,05	[—]
Ângulo de ataque	$\alpha_{pp,raiz}$	6	[°]
Razão sustentação/arrasto	$(\frac{C_l}{C_d})_{pp,raiz}$	83,724	[—]
Meio			
Reynolds médio	$Re_{2pp,meio}$	2,24e+05	[—]
Mach médio	$Ma_{2pp,meio}$	0,15	[—]
Ângulo de ataque	$\alpha_{pp,raiz}$	6	[°]
Razão sustentação/arrasto	$(\frac{C_l}{C_d})_{pp,raiz}$	99,709	[—]
Ponta			
Reynolds médio	$Re_{2pp,ponta}$	2,42e+05	[—]
Mach médio	$Ma_{2pp,ponta}$	0,17	[—]
Ângulo de ataque	$\alpha_{pp,raiz}$	6	[°]
Razão sustentação/arrasto	$(\frac{C_l}{C_d})_{pp,raiz}$	114,354	[—]

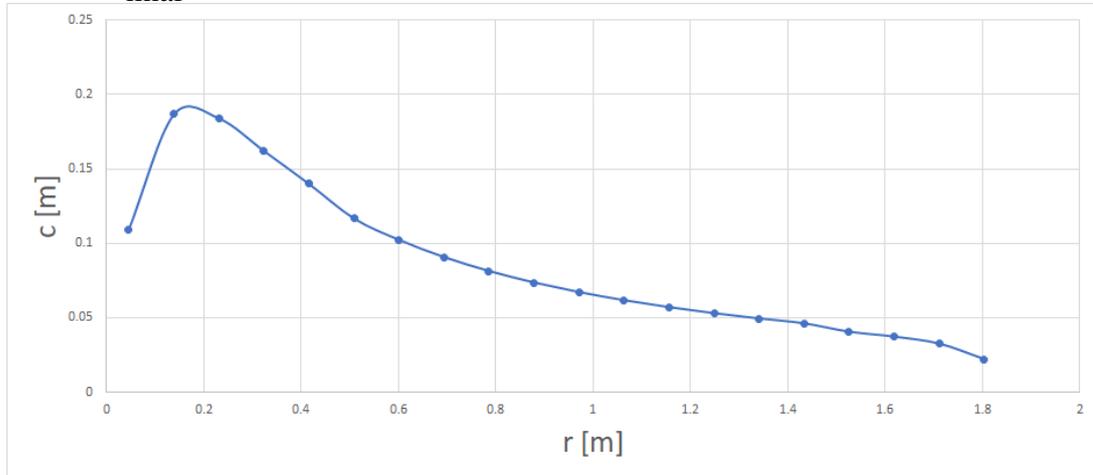
4.4.2 BEMM

Com as geometrias finais dos perfis de cada seção é utilizado uma última vez o método do *momentum* de elemento de pá. Os resultados para cada semente encontram-se a seguir.

4.4.2.1 *Acer Campestre*

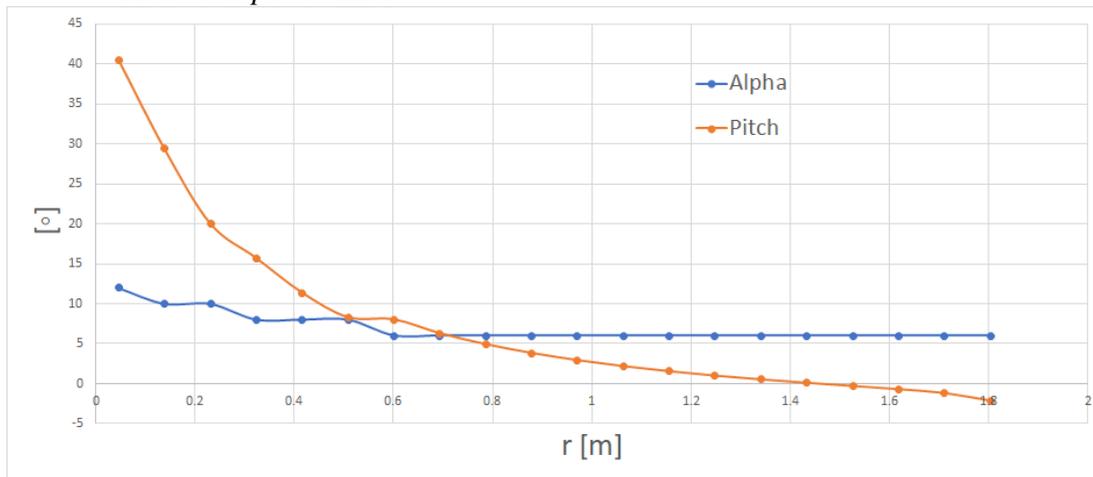
Os valores de corda em função da posição da pá encontram-se no gráfico da Figura 4.38. Os valores de pitch e α encontram-se no gráfico da Figura 4.39. Os valores do número de Reynolds encontram-se no gráfico da Figura 4.40. Os valores do número de Mach encontram-se no gráfico da Figura 4.41.

Figura 4.38 – Comprimento de corda em função da posição da pá para turbina *Acer Campestre* final



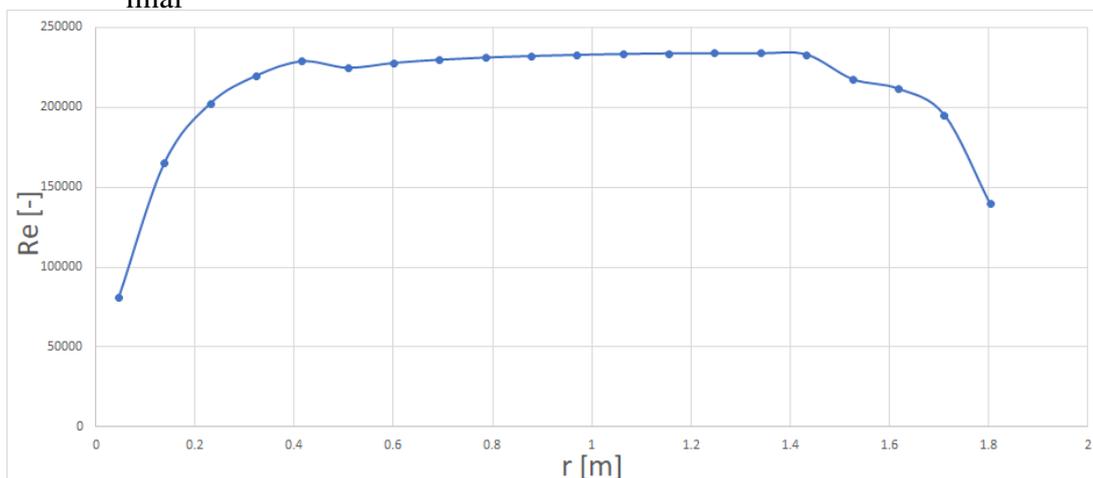
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 4.39 – Valores dos ângulos de ataque e *pitch* em função da posição da pá para turbina *Acer Campestre* final



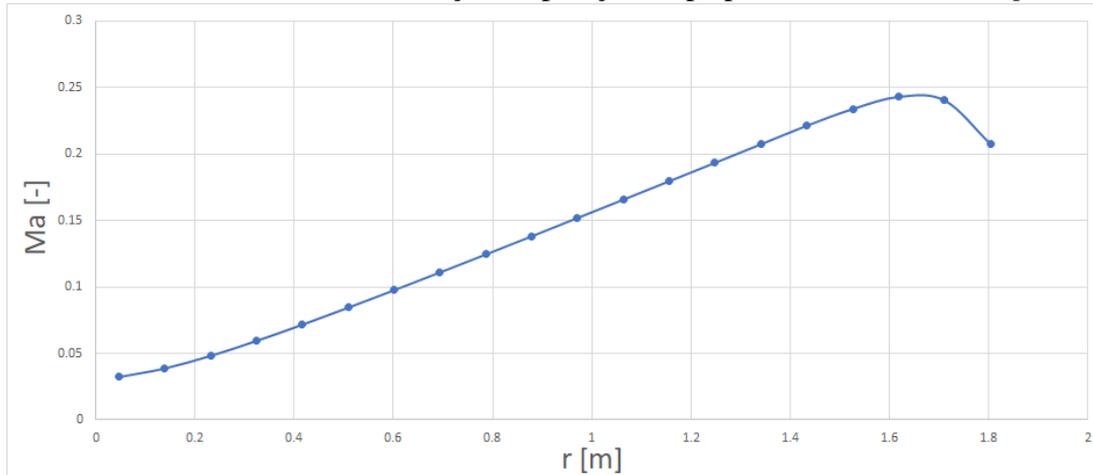
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 4.40 – Número de Reynolds em função da posição da pá para turbina *Acer Campestre* final



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 4.41 – Número de Mach em função da posição da pá para turbina *Acer Campestre* final



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

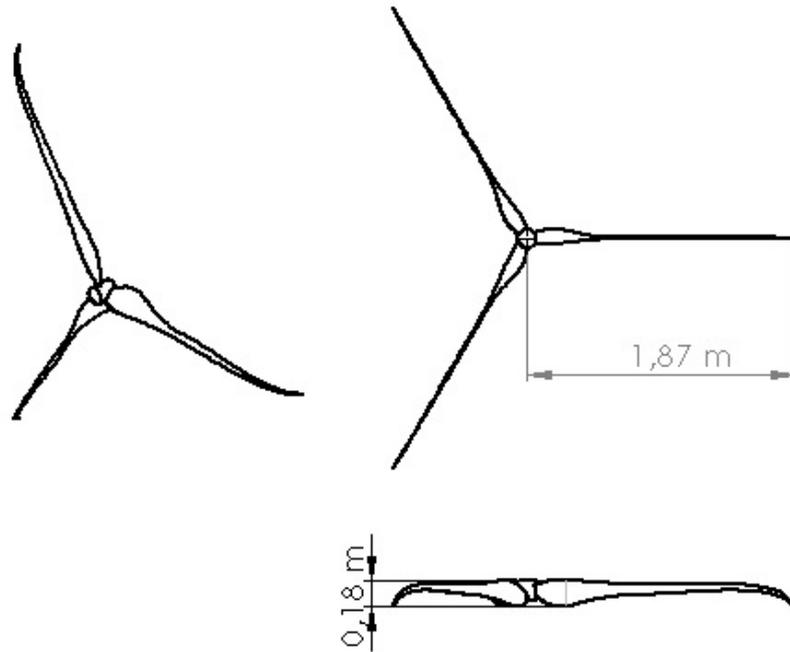
As informações de desempenho da turbina encontram-se na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Dados de desempenho da turbina - *Acer Campestre*

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Razão de velocidade na ponta da pá	λ	8	[—]
Coefficiente de potência da turbina	$C_{p,3c}$	0,499	[—]
Eficiência mecânica	η	0,7	[—]
Potência da turbina	P_{3c}	3,956	[kW]

O modelo tri-dimensional da turbina baseada na semente *Acer Campestre* é feito no software SolidWorks. Vistas cotadas da turbina são encontradas na Figura 4.42.

Figura 4.42 – Vistas da turbina eólica - *Acer Campestre*

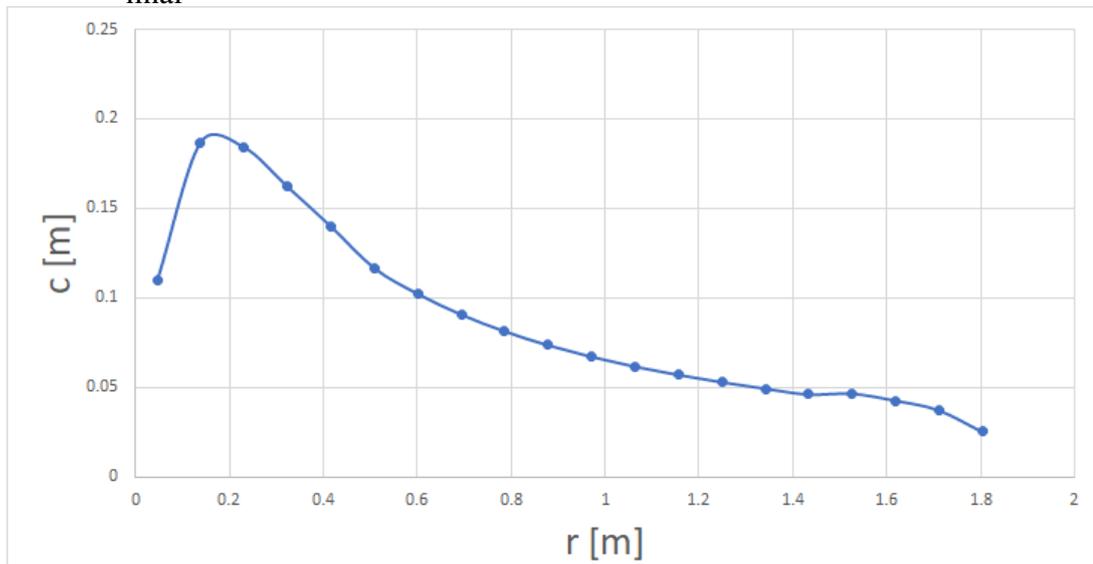


Fonte: Elaborado pelo próprio autor

4.4.2.2 *Acer Platanoides*

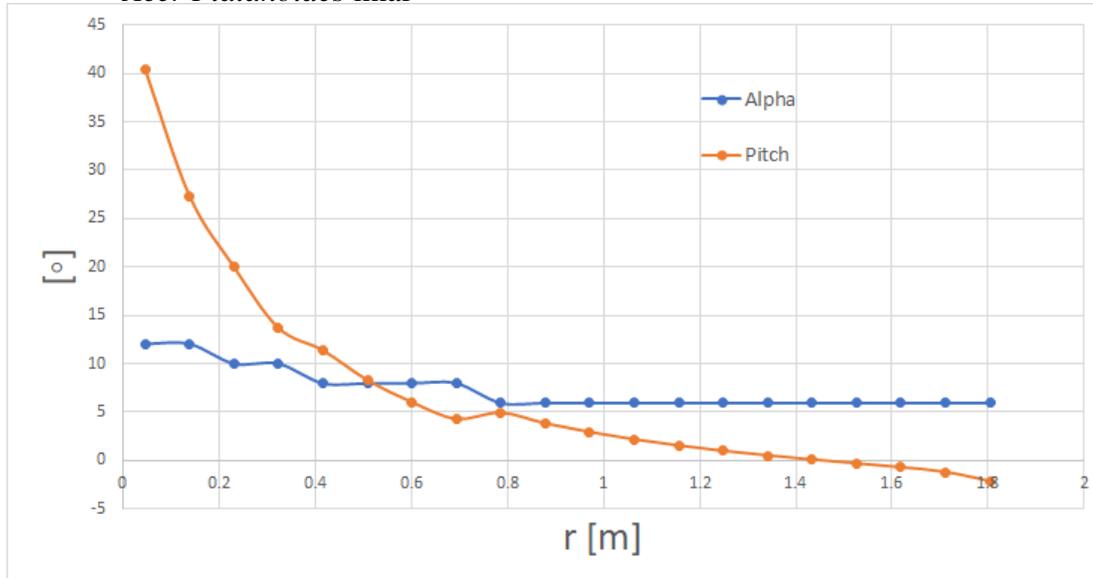
Os valores de corda em função da posição da pá encontram-se no gráfico da Figura 4.43. Os valores de pitch e α encontram-se no gráfico da Figura 4.44. Os valores do número de Reynolds encontram-se no gráfico da Figura 4.45. Os valores do número de Mach encontram-se no gráfico da Figura 4.46.

Figura 4.43 – Comprimento de corda em função da posição da pá para turbina *Acer Platanoides* final



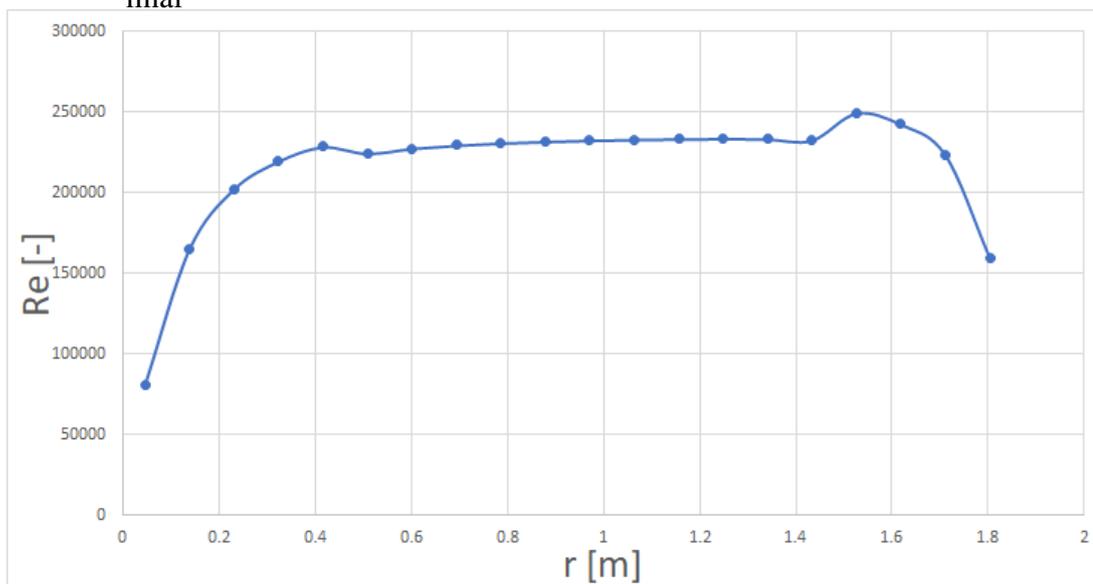
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 4.44 – Valores dos ângulos de ataque e *pitch* em função da posição da pá para turbina *Acer Platanoides* final

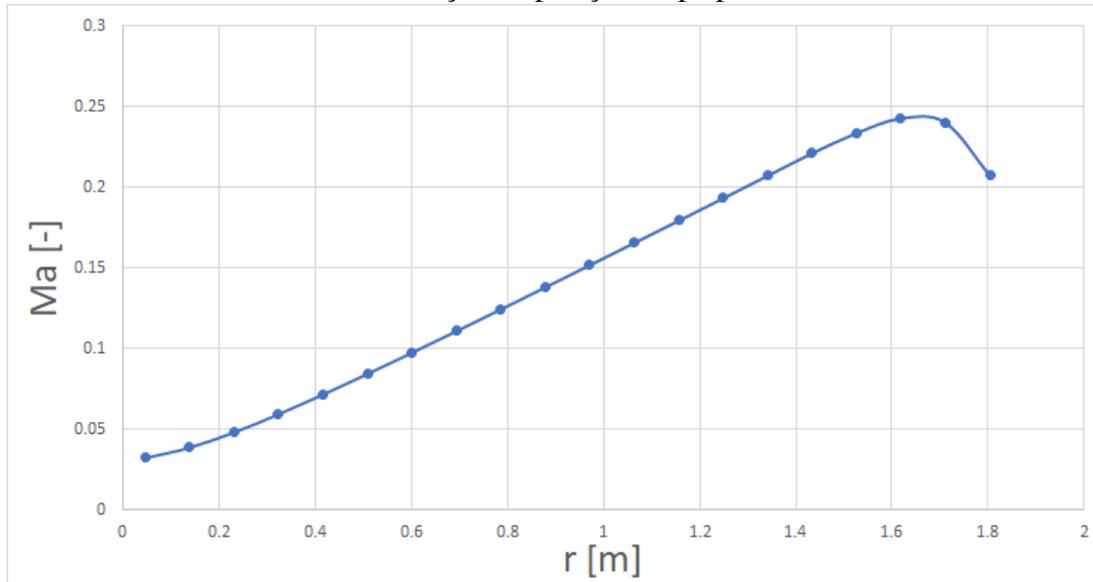


Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 4.45 – Número de Reynolds em função da posição da pá para turbina *Acer Platanoides* final



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 4.46 – Número de Mach em função da posição da pá para turbina *Acer Platanoides* final

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

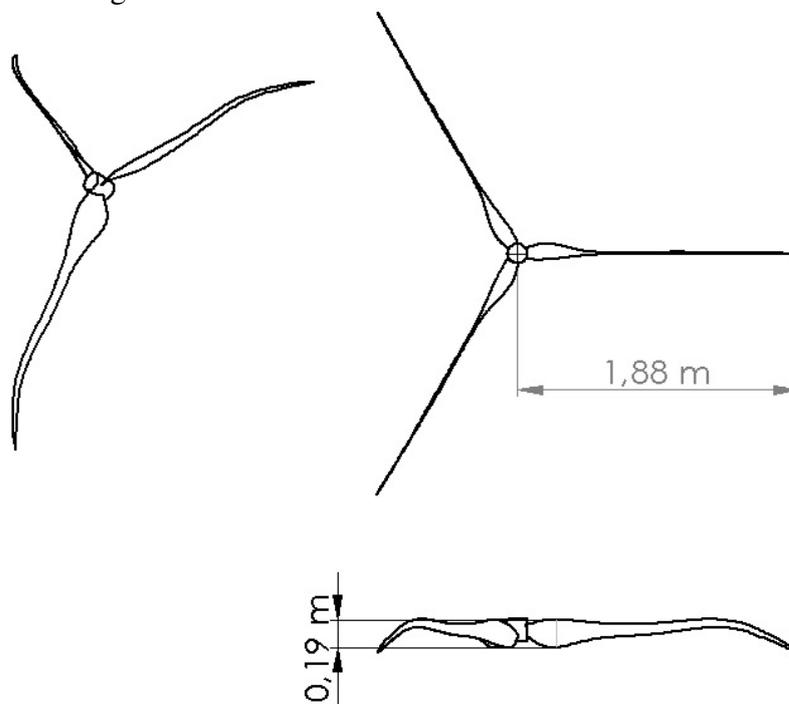
As informações de desempenho da turbina encontram-se na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Dados de desempenho da turbina - *Acer Platanoides*

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Razão de velocidade na ponta da pá	λ	8	[—]
Coefficiente de potência da turbina	$C_{p,3p}$	0,499	[—]
Eficiência mecânica	η	0,7	[—]
Potência da turbina	P_{3p}	3,956	[kW]

O modelo tri-dimensional da turbina baseada na semente *Acer Platanoides* é feito no software SolidWorks. Vistas cotadas da turbina são encontradas na Figura 4.47.

Figura 4.47 – Vistas da turbina - *Acer Platanoides*



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

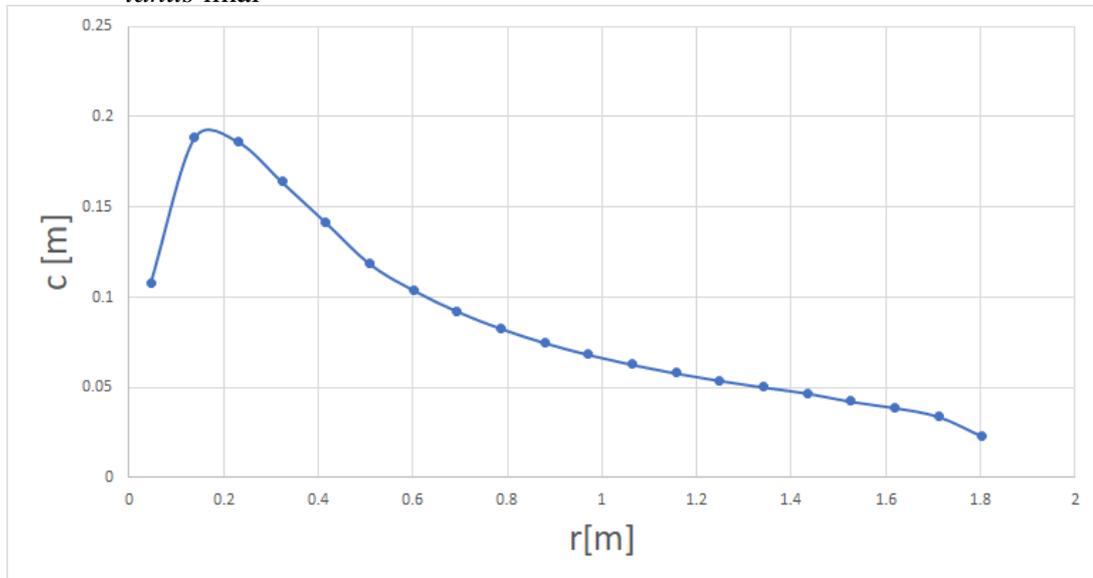
Como pode-se observar, o resultado foi idêntico ao da turbina *Acer Campestre*. Um motivo para essa semelhança é o fato do enflexamento só ser utilizado na ponta da pá. Como as duas sementes tem enflexamento semelhante na região das pontas, o resultado similar tem justificativa. Infelizmente, o uso do enflexamento apenas na ponta acarreta nessa perda de informações das sementes.

4.4.2.3 *Acer Pseudoplatanus*

Os valores de corda em função da posição da pá encontram-se no gráfico da Figura 4.48. Os valores de pitch e α encontram-se no gráfico da Figura 4.49. Os valores do número de

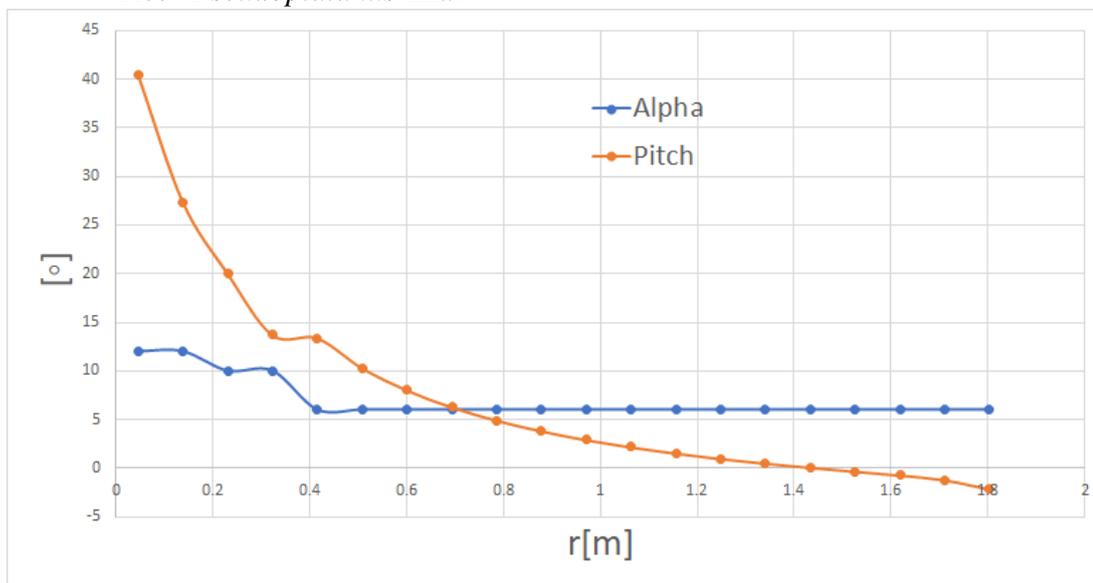
Reynolds encontram-se no gráfico da Figura 4.50. Os valores do número de Mach encontram-se no gráfico da Figura 4.51.

Figura 4.48 – Comprimento de corda em função da posição da pá para turbina *Acer Pseudoplatanus* final



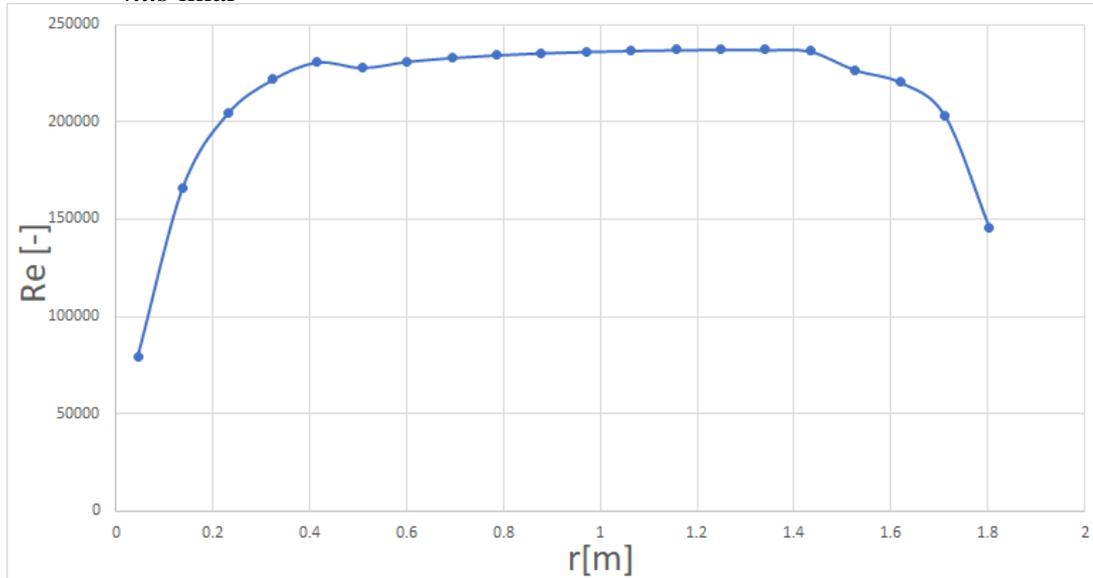
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 4.49 – Valores dos ângulos de ataque e *pitch* em função da posição da pá para turbina *Acer Pseudoplatanus* final



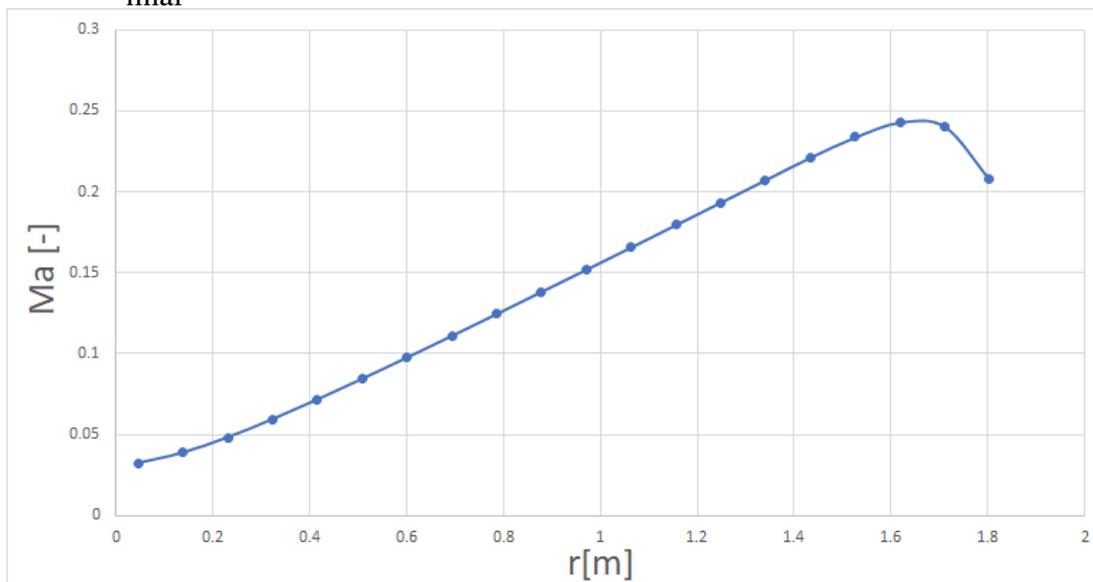
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 4.50 – Número de Reynolds em função da posição da pá para turbina *Acer Pseudoplatanus* final



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 4.51 – Número de Mach em função da posição da pá para turbina *Acer Pseudoplatanus* final



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

As informações de desempenho da turbina encontram-se na Tabela 4.15.

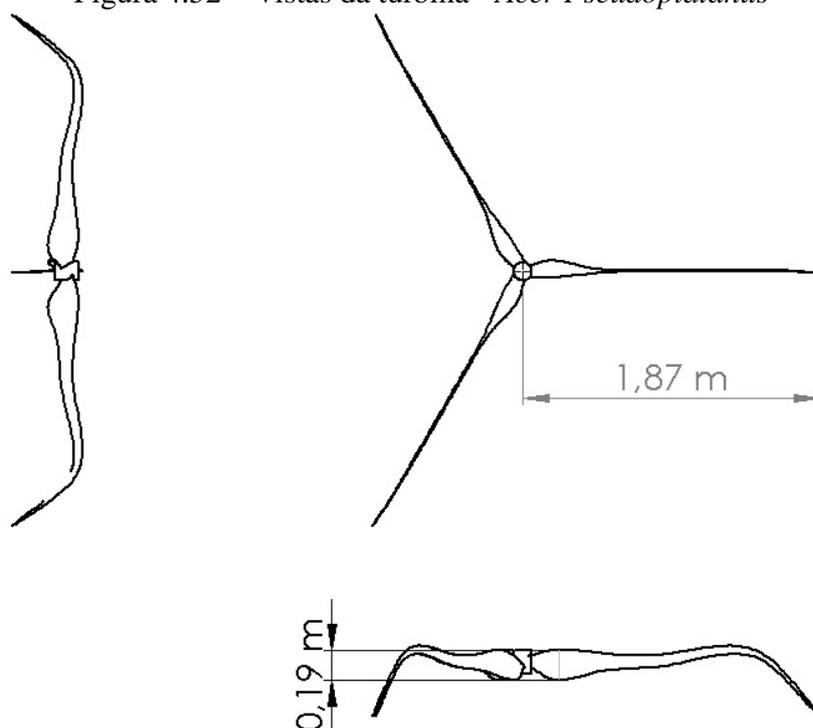
Tabela 4.15 – Dados de desempenho da turbina - *Acer Pseudoplatanus*

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Razão de velocidade na ponta da pá	λ	8	[—]
Coefficiente de potência da turbina	$C_{p,3pp}$	0,4999	[—]
Eficiência mecânica	η	0,7	[—]
Potência da turbina	P_{3pp}	3,963	[kW]

A turbina *Acer Pseudoplatanus* já apresentou uma diferença maior. Isso se deve ao fato de seu enflexamento na ponta ser diferente em relação as outras sementes.

O modelo tri-dimensional da turbina baseada na semente *Acer Pseudoplatanus* é feito no software SolidWorks. Vistas cotadas da turbina são encontradas na Figura 4.52.

Figura 4.52 – Vistas da turbina - *Acer Pseudoplatanus*



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

4.4.2.4 Comparações

Por fim, pode-se fazer um comparativo entre todas as partes do processo. Os valores de desempenho e suas comparações entre todas as geometrias encontram-se na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 – Resumo de desempenho das turbinas

	Potência (kW)	Melhora total (%)
Primeira geometria	3,82	—
Segunda geometria - <i>Acer Campestre</i>	3,84	0,52
Segunda geometria - <i>Acer Platanoides</i>	3,84	0,52
Segunda geometria - <i>Acer Pseudoplatanus</i>	3,87	1,31
Geometria final - <i>Acer Campestre</i>	3,956	3,56
Geometria final - <i>Acer Platanoides</i>	3,956	3,56
Geometria final - <i>Acer Pseudoplatanus</i>	3,963	3,61

Dessa Tabela final algumas informações valiosas podem ser retiradas. Primeiramente, dentro das condições de escoamento definidas pelo uso comercial da turbina AWP 3.7, pode-se notar que há muito espaço para otimização. Apenas o fato de utilizar perfis NACA ótimos para cada seção da pá já trouxe uma potência relativamente elevada.

Além disso, o uso do enflexamento conseguiu trazer uma melhora para uma geometria tecnicamente já otimizada. Dentre elas, o enflexamento de maior sucesso foi o da semente *Acer Pseudoplatanus*.

Finalmente, O uso de perfis GA associados ao enflexamento das sementes conseguiu trazer mais um salto de desempenho. Cabe notar que essa já é a terceira iteração de otimização diferente.

Assim, o uso associado desses diferentes caminhos de otimização conseguiu, em seu melhor dos casos, aumentar em quase 4% a produção de energia com base em uma turbina já otimizada.

Esses resultados são todos em base do método de *momentum* de elemento de pá. Para dar mais um grau de confiança a esses resultados, será também feita análise utilizando CFD.

4.5 CFD

Como já mencionado em outras seções será feita uma análise em CFD pelo software CFX da ANSYS para poder validar os resultados obtidos pelo BEMM. O procedimento de análise já foi detalhado na seção 3.5 desse trabalho. Com as informações provenientes da Tabela 4.16, pode-se planejar quais geometrias serão analisadas. Pelos resultados foram definidas 2 geometrias para análise: as referentes às turbinas *Acer Campestre* e *Acer Pseudoplatanus*. Não será feita análise da geometria *Acer Platanoides* pois seus resultados foram muito similares aos da *Acer Campestre*.

4.5.1 Acer Campestre

Como mencionado em seções anteriores, serão duas dimensões de análise: tamanho da esteira e refinamento da malha.

4.5.1.1 Tamanho da esteira

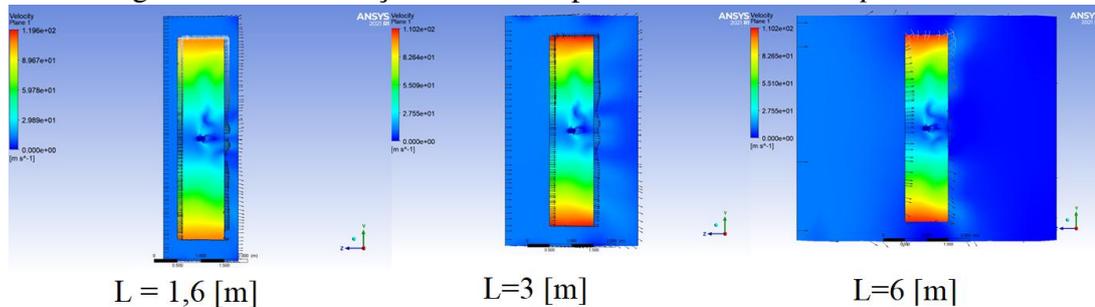
Foram feitas três simulações de comprimento de esteira. A Tabela 4.17 mostra os parâmetros fixos entre simulações.

Tabela 4.17 – Parâmetros fixos - Simulações de Esteira - *Acer Campestre*

Parâmetro	Valor	Unidade
Raio do domínio externo	2,5	[m]
Raio do domínio interno	2,0	[m]
Tamanho máximo de elemento no domínio interno	5e-02	[m]

As simulações estão agrupadas na Figura 4.53.

Figura 4.53 – Simulações de esteira para turbina *Acer Campestre* final



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Os resultados das simulações encontram-se na Tabela 4.18.

Tabela 4.18 – Resultados - Simulações de Esteira - *Acer Campestre*

Comprimento externo	1,6 m	3 m	6 m
Tempo (s)	1,63e+03	1,87e+03	2,23e+03
Número de elementos	2266414	2473595	2276822
Potência estimada (kW)	2,64	3,18	3,58
Diferença BEMM	33,40%	19,72%	9,42%

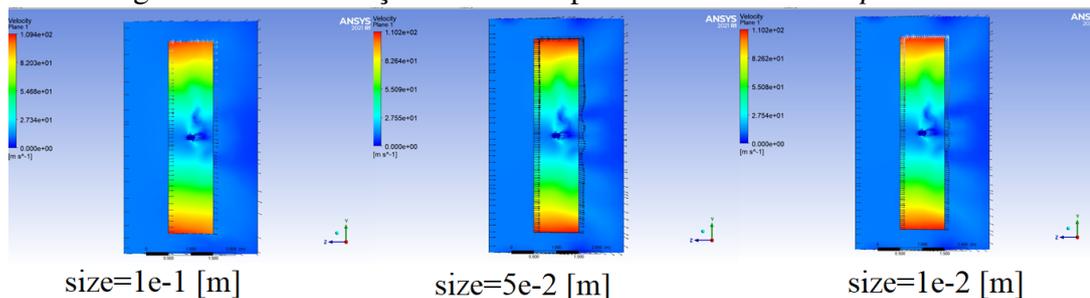
Pode-se notar que a diferença comparativa entre o CFD e o BEMM reduz de maneira significativa aumentando o tamanho disponível da esteira. Infelizmente, por limitações de máquina, o maior valor de esteira simulado é para um domínio externo de comprimento de 6 metros.

4.5.1.2 Refinamento de Malha

Foram feitas três simulações de refinamento de malha. A Tabela 4.19 mostra os parâmetros fixos entre simulações.

Tabela 4.19 – Parâmetros fixos - Simulações de Refinamento de Malha - *Acer Campestre*

Parâmetro	Valor	Unidade
Raio do domínio externo	2,5	[m]
Raio do domínio interno	2.0	[m]
Comprimento do domínio externo	3,0	[m]

Figura 4.54 – Simulações de Malha para turbina *Acer Campestre* final

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

As simulações estão agrupadas na Figura 4.54.

Os resultados das simulações encontram-se na Tabela 4.20.

Tabela 4.20 – Resultados - Simulações de Malha - *Acer Campestre*

Tamanho máximo interno	1e-01 m	5e-02 m	1e-02 m
Tempo (s)	1,67e+03	1,87e+03	2,12e+03
Número de elementos	2269167	2473595	3274060
Potência estimada (kW)	2,82	3,18	3,34
Diferença BEMM	28,84%	19,72%	15,72%

De posse dos valores das Tabelas 4.19 e 4.20 pode-se aplicar o método GRI. Os seus resultados encontram-se na Tabela 4.21.

Tabela 4.21 – Análise GRI - *Acer Campestre*

Parâmetro	Valor	Unidade
Erro aparente	2,07	[%]
Erro extrapolado	3,51	[%]
GRI	6,75	[%]

4.5.2 *Acer Pseudoplatanus*

Assim como feito para *Acer Campestre*, o mesmo processo é feito para *Acer Pseudoplatanus*.

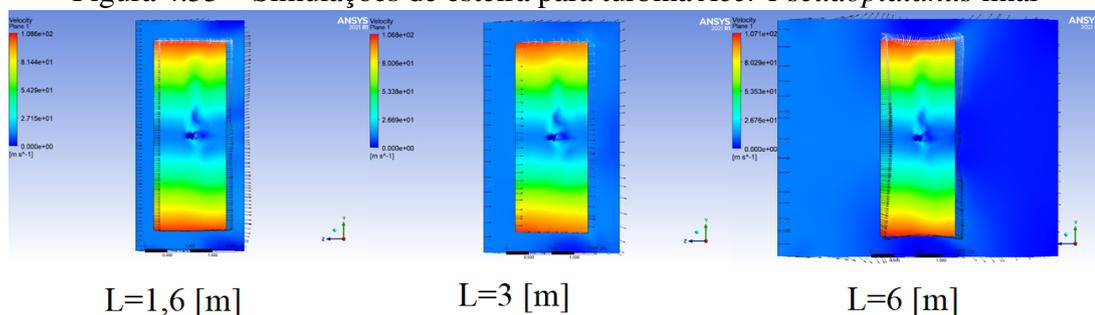
4.5.2.1 Tamanho da esteira

Foram feitas três simulações de comprimento de esteira. A Tabela 4.22 mostra os parâmetros fixos entre simulações.

Tabela 4.22 – Parâmetros fixos - Simulações de Esteira - *Acer Pseudoplatanus*

Parâmetro	Valor	Unidade
Raio do domínio externo	2,5	[m]
Raio do domínio interno	2,0	[m]
Tamanho máximo de elemento no domínio interno	5e-02	[m]

As simulações estão agrupadas na Figura 4.55.

Figura 4.55 – Simulações de esteira para turbina *Acer Pseudoplatanus* final

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Os resultados das simulações encontram-se na Tabela 4.23.

4.5.2.2 Refinamento de Malha

Foram feitas três simulações de refinamento de malha. A Tabela 4.24 mostra os parâmetros fixos entre simulações.

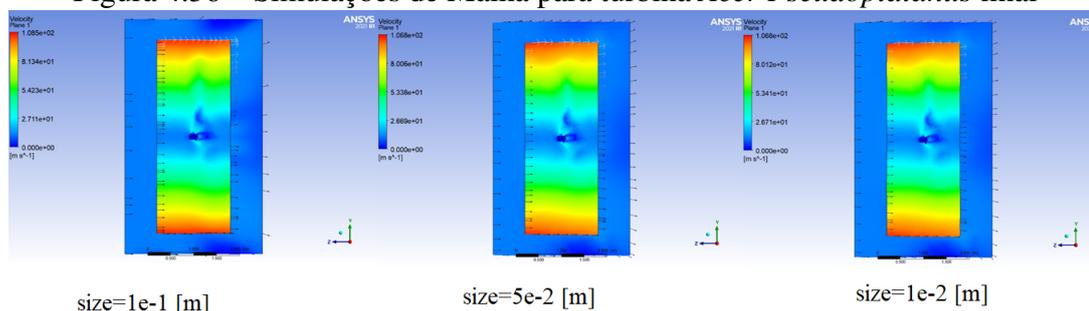
Tabela 4.23 – Resultados - Simulações de Esteira - *Acer Pseudoplatanus*

Comprimento externo	1,6 m	3 m	6 m
Tempo (s)	1,30e+03	1,58e+03	1,98e+03
Número de elementos	1920215	2270300	3389556
Potência estimada (kW)	2,68	3,22	3,59
Diferença BEMM	32,31%	18,69%	9,53%

Tabela 4.24 – Parâmetros fixos - Simulações de Refinamento de Malha - *Acer Pseudoplatanus*

Parâmetro	Valor	Unidade
Raio do domínio externo	2,5	[m]
Raio do domínio interno	2.0	[m]
Comprimento do domínio externo	3,0	[m]

As simulações estão agrupadas na Figura 4.56.

Figura 4.56 – Simulações de Malha para turbina *Acer Pseudoplatanus* final

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Os resultados das simulações encontram-se na Tabela 4.25.

Tabela 4.25 – Resultados - Simulações de Malha - *Acer Pseudoplatanus*

Tamanho máximo interno	1e-01 m	5e-02 m	1e-02 m
Tempo (s)	1,35e+03	1,58e+03	1,87e+03
Número de elementos	1523541	1920215	2268905
Potência estimada (kW)	2,89	3,22	3,37
Diferença BEMM	26,92%	18,70%	14,78%

De posse dos valores das Tabelas 4.24 e 4.25 pode-se aplicar o método GRI. Os seus resultados encontram-se na Tabela 4.26.

Tabela 4.26 – Análise GRI - *Acer Pseudoplatanus*

Parâmetro	Valor	Unidade
Erro aparente	4,51	[%]
Erro extrapolado	6,13	[%]
GRI	8,16	[%]

4.5.3 Discussão das Simulações

Em ambos os casos de semente, pode-se notar uma sensibilidade maior ao aumento do tamanho disponível de esteira. Isso se deve pois as malhas utilizadas já estão suficientemente refinadas como mostradas pelos GRI apresentados nas Tabelas 4.21 e 4.26.

Ademais, pode-se notar que o GRI da *Acer Pseudoplatanus* foi maior do que o da semente *Acer Campestre*. Isso talvez possa ser explicado pois, por possuir enflexamento mais agressivo na região da ponta, o método de compensação de enflexamento no BEMM talvez não seja o mais apropriado.

No geral, os resultados ajudam a corroborar os resultados obtidos pelo BEMM das sementes.

5 CONCLUSÃO

Foi apresentado um estudo de caso para criação de geometria de turbina eólica. Dentro das características de escoamento definidas, foi feita uma geometria inicial dividindo a pá da turbina em seções e aplicando os melhores NACAs. Logo após, foi introduzido o enflexamento proveniente de cada semente para criação de uma geometria secundária. E por fim, foram criados perfis utilizando o método de algoritmo genético, sendo esses utilizados nas geometrias finais das turbinas.

Devido ao uso apenas na ponta de pá do enflexamento, duas sementes obtiveram resultados semelhantes. Infelizmente essa informação foi perdida, mas utilizando-se outro estudo de caso os resultados poderiam vir a ser diferentes.

No geral, o resultado teórico apresentou uma melhoria significativa de ganho de potência quando comparada a turbina comercial. Ao longo da série de processos de otimização aplicados, obteve-se um valor de potência final de quase o dobro da turbina comercial.

Em seguida é feita uma análise em CFD para validar os resultados teóricos. Apesar de haver diferença de aproximadamente 10% entre os resultados do BEMM e do CFD, os resultados se demonstram bem consistentes e essa diferença pode ser atribuída ao método de compensação do enflexamento ou outros fenômenos aerodinâmicos tridimensionais não considerados.

Não se deve, no entanto, criticar a geometria da turbina comercial pois ela já passou por validação comercial. Outras dimensões de análises não consideradas nesse estudo poderiam invalidar a geometria final obtida. Análise estrutural, de aeroelasticidade e custo de fabricação são alguns exemplos de dimensões não consideradas nesse trabalho que podem impactar a geometria final.

Em resumo, o trabalho, limitado ao seu escopo de análise, mostra existir potencial de melhoria das geometrias de turbinas eólicas e a metodologia aplicada produz resultados satisfatórios.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, J. D. **Fundamentals of aerodynamics**. 3rd edition. ed. Boston, Massachusetts: MacGraw-Hill, 2001.
- ANSYS, Inc. Ansys. v. 2021 R1, 2021.
- ARAÚJO, S. R. N. **MICROGERAÇÃO EÓLICA CONECTADA À REDE ELÉTRICA PARA USO RESIDENCIAL**. Fortaleza, Brasil: Tese (Graduação) - Universidade Federal do Ceará, 2016.
- AZEVEDO, D. et al. Airfoil optimization using ant colony technique. In: **Proceedings of the XXXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering**. DF, Brazil: ABMEC, 2016.
- BANGGA, G. Comparison of blade element method and cfd simulations of a 10 mw wind turbine. **Fluids**, v. 103(4), p. 73–94, 2018.
- BURTON, T. et al. **Wind Energy Handbook**. 1st edition. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2001.
- CELIK, I. B. et al. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in cfd applications. **Journal of Fluids Engineering**, v. 130(7), 2018.
- CHOI, J. et al. Biomimetics: forecasting the future of science, engineering, and medicine. **International Journal of Nanomedicine**, p. 5701, 2015.
- CHU, Y.; CHONG, W. A biomimetic wind turbine inspired by dryobalanops aromatica seed: Numerical prediction of rigid rotor blade performance with openfoam®. **Computers & Fluids**, v. 159, p. 295–315, 2017.
- CHU, Y.; LAM, H. Comparative study of the performances of a bio-inspired flexible-bladed wind turbine and a rigid-bladed wind turbine in centimeter-scale. **Energy**, v. 213, 2020.
- CLAPHAM, A. R.; TUTIN, T. G.; WARBURG, E. F. **Excursion flora of the British Isles**. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1989.
- DALAMAGKIDIS, K. Aviation history and unmanned flight. **Handbook of Unmanned Aerial Vehicles**, Springer-Netherlands, p. 57–81, 2014.
- Dassault Systemes. Solidworks. v. 2019 SP5, 2019.
- DOGAN, K.; MARTINOPOULOS, G. Blade element momentum theory and cfd modeling as a tool for optimizing wind turbine blade design. **Renewable Energy in the Service of Mankind Vol I**, p. 837–844, 2015.
- DRELA, M. **XFOIL v. 6.99**. 2013. MIT. Disponível em: <<https://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/>>. Acesso em: 25 janeiro 2022.
- DREW, D. R.; BARLOW, J. F.; COCKERILL, T. T. Estimating the potential yield of small wind turbines in urban areas: A case study for greater london. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 115, p. 104–111, 2013.
- EPE. **Balanco Energético Nacional, Relatório Final**. Rio de Janeiro: EPE, 2021.

FAZIL, J.; JAYAKUMAR, V. Investigation of airfoil profile design using reverse engineering bezier curve. **Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 6(7), 2011.

GIANNAKOGLOU, K. C. Design of optimal aerodynamic shapes using stochastic optimization methods and computational intelligence. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 38(1), p. 43–76, 2002.

GWEC. **Global Wind Report**. 2019. Disponível em: <<https://gwec.net/global-wind-report-2019/>>.

HAU, E. **Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics**. 3rd edition. ed. Munich, Germany: Springer, 2013.

HOLDEN, J.; CALEY, T.; TURNER, M. Maple seed performance as a wind turbine. **53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting**, 2015.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems**. Cambridge, Mass: MIT Press, 1992.

IEA. **Electricity Market Report, July**. 2021. Disponível em: <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/01e1e998-8611-45d7-acab-5564bc22575a/ElectricityMarketReportJuly2021.pdf>>.

IKEDA, T. et al. A robust biomimetic blade design for micro wind turbines. **Renewable Energy**, v. 125, p. 155–165, 2018.

JANG, H. et al. Analysis of archimedes spiral wind turbine performance by simulation and field test. **Energies**, v. 12(24), p. 4624, 2019.

JENKINSON, L. R.; SIMPKIN, P.; RHODES, D. **Civil jet aircraft design**. Reston, VA, EUA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1999.

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. **Wind energy explained**. 1st edition. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2002.

MINAMI, S.; AZUMA, A. Various flying modes of wind-dispersal seeds. **Journal of Theoretical Biology**, v. 225(1), p. 1–14, 2003.

MITCHELL, A. F.; MORE, D. **The pocket guide to trees of Britain and northern Europe**. Londres: Parkgate Books, 1997.

NEMEC, M.; ZINGG, D. W.; PULLIAM, T. H. Multipoint and multi-objective aerodynamic shape optimization. **AIAA Journal**, v. 42(6), p. 1057–1065, 2004.

NETO, C. P. Improving hawt blade design with multiphase bem application and ga-based airfoils for low reynolds conditions. In: **Proceedings of the the 42nd Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering and 3rd Pan American Congress on Computational Mechanics**. Rio de Janeiro, Brasil: [s.n.], 2021.

OBERT, E. **Aerodynamic design of transport aircraft**. Amsterdam, Netherlands: Ios Press, 2009.

PEARL, J. **Heuristics**. Reading, Mass. [u.a.]: Addison-Wesley Publ. Co, 1984.

PEIGIN, S.; EPSTEIN, B. Robust optimization of 2d airfoils driven by full navier–stokes computations. **Computers & Fluids**, v. 33(9), p. 1175–1200, 2004.

RIBEIRO, A.; AWRUCH, A.; GOMES, H. An airfoil optimization technique for wind turbines. **Applied Mathematical Modelling**, v. 36(10), p. 4898–4907, 2012.

RUSHFORTH, K. D. **Trees of Britain & Europe**. Londres: HarperCollins, 1999.

SHAHROKHI, A.; JAHANGIRIAN, A. Airfoil shape parameterization for optimum navier–stokes design with genetic algorithm. **Aerospace Science and Technology**, v. 11(6), p. 443–450, 2007.

VOS, R.; FAROKHI, S. **Introduction to Transonic Aerodynamics**. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2015.

WHITE, F. M. **Viscous fluid flow**. 3rd edition. ed. New York: MacGraw-Hill, 2006.