



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

EM919 – Trabalho de Graduação II

Relatório Final

**Desenho de uma Turbina de Baixa
Potência Empregando um Perfil Baseado
nas Equações de Kutta Joukowski**

Orientador: **Prof. Dr. Kamal Abdel Radi Ismail**

Autor: **Gonzalo Ciérvide Ojer**

R.A.: **161308**

Agradecimientos

Pelo presente projeto de conclusão das atividades desenvolvidas ao longo de este ano, deixo meus agradecimentos à minha família e as personas mais especiais para mim, per sempre me apoiar, nos momentos de duvidas, ao professor Kamal pela oportunidade de trabalhar com ele, aos bons professores que tive durante a minha educação, incluindo o primeiro de todos, meu pai.

INDICE

Lista de figuras	iv
Lista de Tabelas	vi
Letras Gregas.....	vii
1. Objetivos	1
2. Introdução	2
2.1. Pás de uma turbina de vento	2
2.2. Perfis NACA	3
2.2.1. Série NACA quatro dígitos	3
2.2.2. Série NACA cinco dígitos	5
2.2.3. Série NACA 1 (série 16)	6
2.2.4. Série NACA 6.....	7
3. Fundamento Teórico. Perfil <i>Kutta-Joukowski</i>	7
3.1. A transformada do <i>Kutta-Joukowski</i>	7
3.1.1. Explicação da evolução das linhas de corrente em torno ao perfil	9
3.2. A Condição de <i>Kutta</i>	9
3.3. Transformação do círculo para aerofólio simétrico	10
3.4. Transformação de círculo para aerofólio com arqueamento	13
3.5. Coeficiente de sustentação C_L	15
4. Programa de Matlab: Perfis <i>Kutta-Joukowski</i>	16
4.1. Parâmetros de controle	16
4.2. Manual para o usuario	17
5. Área de Trabalho e Parâmetros de Desenho	18
▪ Velocidades do vento em que se vai trabalhar	18
▪ Ângulo de ataque em que se vai trabalhar	19
▪ Alto valor do coeficiente de sustentação C_L.....	19
▪ Baixo valor do coeficiente de empuxo C_D.	20
▪ Relação CL/CD.....	20
▪ Coeficiente C_m	20
▪ Coeficiente C_p	20
▪ Número de Reynolds.....	21

5.1.	Aproximações dos coeficientes de sustentação e de arraste	21
6.	Desenvolvimento e Seleção do Perfil	24
6.1.	Eleição dos Parâmetros de Desenho.....	24
6.1.1.	Influência do Arqueamento	25
6.1.2.	Influencia da espessura.....	31
7.	Geração da Turbina	37
7.1.	Tipo de eixo. Eixo Horizontal.....	37
7.2.	Tipo de Gerador. Gerador de Indução de velocidade fixa	38
7.3.	Perfil selecionado: Arqueamento 6% e Espessura 12%.....	39
7.4.	Número de Pás.....	40
7.5.	Dimensionamento da pá	41
7.5.1.	Torção ao longo da pá.....	42
8.	Comportamento da Turbina Gerada.....	46
8.1.	Resultados. Potência gerada.....	48
9.	Desenho Modificado. Segundo Protótipo.....	50
9.1.	Variação dos Parâmetros	50
9.2.	Resultados.....	52
10.	Conclusões.....	54
10.1.	Desenvolvimento do Perfil.....	54
10.2.	Desenvolvimento da Turbina	54
11.	Resume da Metodologia de Cálculo	55
12.	Anexos.....	56
12.1.	Anexo1. Perfis empregados para baixos números de Reynolds	56
12.2.	Anexo2. Polares NACA 6512. Número de Reynolds de 150000.....	61
12.3.	Anexo3. Polares NACA 6512. Número de Reynolds de 100000.....	62
	Bibliografia.....	63

Lista de figuras

Figura 2.1: Partes do perfil.....	2
Figura 2.2: Perfil NACA 2412. Serie 4 dígitos.....	4
Figura 2.3: Perfil NACA 23012. Serie 4 dígitos.....	5
Figura 3.1: Representação das linhas de fluxo. a) Sem circulação b) Com circulação.....	10
Figura 3.3: Relação trigonométrica. Transformação do círculo para aerofólio simétrico. Perfil Simétrico.....	11
Figura 3.4: Representação da transformadas dos círculos ao plano ζ . Perfil Assimétrico.....	13
Figura 3.5: Relação trigonométrica. Transformação do círculo para aerofólio simétrico. Perfil Assimétrico.....	13
Figura 4.1: Interface inicial programa de Matlab: Perfis <i>Kutta Joukowski</i>	17
Figura 4.2: Interface resultados do programa Perfis <i>Kutta Joukowski</i>	18
Figura 5.1: Componentes das velocidades na base e na ponta da pá 1.....	19
Figura 5.2: Coeficiente C_p ao longo da corda. Perfil NACA 4410.....	22
Figura 5.3: Evolução do coeficiente C_d em função do ângulo de ataque para diferentes Números de Reynolds. Perfil NACA 4410	23
Figura 6.1: Calculo dos coeficientes C_L a traves do programa Perfis <i>Kutta Joukowski</i>	25
Figura 6.2: Comparativa entre Perfil gerado por Matlab, Perfil 1, e o perfil NACA 2510. Programa XFLR5.....	26
Figura 6.3: Perfil 1. Coeficiente C_D em função de α . Número de Reynolds igual a 1×10^7	27
Figura 6.4: Influencia da curvatura. Representação do coeficiente C_L em função de α para os diferentes perfis. Número de Reynolds igual a 1×10^7	27
Figura 6.5: Influência do arqueamento. Representação do coeficiente C_L em função de α para os diferentes perfis. Ampliação. Número de Reynolds igual a 1×10^7	28
Figura 6.6: Representação dos perfis NACA “semelhantes” aos perfis 1-8 gerados por Matlab levados a estudo.....	28

Figura 6.7: Representação dos coeficientes C_D em função do ângulo de ataque α para os perfis NACA “semelhantes” aos perfis 1-8 gerados por Matlab. Número de Reynolds igual a 1×10^7	29
Figura 6.8: Representação do coeficiente C_L/C_D em função de α para os perfis 1-8 gerados por Matlab. Número de Reynolds igual a 1×10^7	29
Figura 6.9: Comparativa entre Perfil gerado por Matlab, Perfil 9, e o perfil NACA 6506. Programa XFLR5.....	32
Figura 6.10: Influencia da espessura. Representação do coeficiente C_L em função de α para os diferentes perfis. Número de Reynolds igual a 1×10^7	33
Figura 6.11: Representação dos perfis NACA “semelhantes” aos perfis 9-19 gerados por Matlab levados a estudo.....	33
Figura 6.12: Representação dos coeficientes C_D em função do ângulo de ataque α para os perfis NACA “semelhantes” aos perfis 9-19 gerados por Matlab.....	34
Figura 6.13: Representação dos coeficientes C_D em função do ângulo de ataque α para os perfis NACA “semelhantes” aos perfis 9-19 gerados por Matlab. Ampliada. Número de Reynolds igual a 1×10^7	34
Figura 6.13: Representação dos coeficientes C_L/C_D em função do ângulo de ataque α para os perfis NACA “semelhantes” aos perfis 9-19 gerados por Matlab. Número de Reynolds igual a 1×10^7	35
Figura 7.1: Representação do coeficiente C_L em função do ângulo de ataque α	39
Figura 7.2: Representação do coeficiente C_D em função do ângulo de ataque α . Numero de Reynolds = 150000.....	40
Figura 7.3: Variação do coeficiente C_p em função do coeficiente λ	41
Figura 7.4: Representação da pá empregada no desenho da turbina.....	42
Figura 7.5: Representação C_L em função de α . Perfil NACA 6512. Numero de Reynolds de 150.000.....	42
Figura 7.6: Representação das velocidades, ângulos e forças que intervierem ao redor do perfil.....	43
Figura 8.1: Evolução do coeficiente C_p frente a λ para diferentes valores da relação $(C_L/C_D)_{max}$	46
Figura 8.2: Representação do coeficiente de sustentação C_L em função do ângulo de ataque para valores do numero de Reynolds de 100.000 e 150.000. Perfil NACA 6512.	47
Figura 8.3: Perfil 15. Valores dos coeficientes de sustentação e arraste em função do ângulo de ataque. Números de Reynolds de 150.000 e 100.000. 49	

Figura 8.4: Geometria da pá.....	49
Figura 8.5: Resultados da potencia e empuxo em função da velocidade do vento livre. Velocidade de rotação de 150 r.p.m.....	50
Figura 9.1: Geometria das pás. Interface Prop Calc.....	52
Figura 9.2: Resultados da potencia e empuxo em função da velocidade do vento livre. Velocidade de rotação de 200 r.p.m.....	53

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Perfil NACA 2412. Serie 4 dígitos.....	5
Tabela 6.1: Tabela resume dos valores dos coeficientes C_L e C_D para os perfis 1-8. Número de Reynolds igual a 1×10^7	30
Tabela 6.2: Tabela resume dos valores dos coeficientes C_L e C_D para os perfis 9-19.....	35
Tabela 7.1: Tabela resume dos valores dos coeficientes C_L e C_D do Perfil.....	40
Tabela 7.2: Tabela comprovação da velocidade na ponta da pá.....	44
Tabela 7.3: Torção da pá.....	45
Tabela 8.1: Tabela resume dos valores dos coeficientes C_L e C_D do Perfil.....	48
Tabela 9.1: Tabela comprovação da velocidade na ponta da pá.....	51
Tabela 9.2: Torção da pá.....	52
Tabela 8.2: Resultados numéricos da potencia e empuxo em função da velocidade do vento livre. Velocidade de rotação de 200 r.p.m.....	53

Siglas

$C_{L_{max}}$: coeficiente de sustentação máximo

C_L : coeficiente de sustentação

C_D : coeficiente de arraste

C_m : coeficiente de momento

C_p : coeficiente de potência

$C_{p_{max}}$: coeficiente de potência máximo

Γ : circulação

C_L : componente coeficiente de empuxe

V : velocidade de rotação

U : velocidade de vento livre

W : Velocidade resultante

M : Mach

J : coeficiente de avanceEscriba aquí la ecuación.

F_{ax} : força axial

F_{tag} : força tangencial

ω : velocidade de rotação

Letras Gregas

θ : ângulo de pitch

α : ângulo de ataque

φ : ângulo de inclinação

1. Objetivos

Atualmente a sustentabilidade energética e o aquecimento global são dos assuntos de maior importância para a humanidade. Conseqüentemente, a procura de novas fontes de energia especialmente renovável para garantir disponibilidade de energia limpa com menor impactos ambientais representa uma tarefa fundamental para atuais e futuras gerações.

Um dos principais problemas no sistemas energético são as perdas de energias tais como as perdas das máquinas, no transporte, distribuição do energia...

Devido a estas perdas, atualmente, as civilizações tendem novamente ao geração de energia perto dos pontos de consumo. Nestes casos de autogeração de energia, a energia eólica pode ser uma alternativa mais que eficiente e rentável para o consumidor.

A finalidade do estudo seguinte é, em primeiro lugar, a geração de um perfil mediante a teoria de *Kutta Joukowski*, pesquisando os parâmetros de desenho que gerem a geometria ótima, e em segundo lugar, o desenho de uma turbina de baixa potência para a instalação em áreas isoladas distantes da rede elétrica.

A população brasileira é de cerca de 201 milhões de habitantes, 80 % concentrados em centros urbanos e 20% dispersos no meio rural. Existem regiões de baixa densidade demográfica, e exemplo de Amazônia onde este tipo de tecnologia pode ter muito sucesso.

Além disso, no Brasil, onde a maioria (entorno de 70%) de consumo total de energia é suprido por usinas hidrelétricas, os principais centro de geração ficam a uma distancia media de 500km a 1.000km. E ainda zonas reconhecidamente fortes para o aproveitamento do potencial eólico no Brasil como por exemplo Nordeste e Sul encontra-se longo dos principais centros de geração e elétrica. Assim é importante investir neste tipo de tecnologia visto que o mercado mundial necessita este tipo de equipamento mesmo nos países desenvolvidos.

O projeto inicia-se com a apresentação das partes do perfil e uma pesquisa dos principais perfis existentes, os perfis NACA. Posteriormente, se apresenta a teoria dos perfis de *Kutta Joukowski*, a partir de la qual se desenha um programa de Matlab para a geração de estes tipos de perfis. Finalmente, se seleciona o tipo de perfil a empregar e se procede ao desenho da turbina de baixa potência.

No *capitulo 10*, apresenta-se um resume da metodologia de cálculo empregada durante o projeto.

2. Introdução

2.1. Pás de uma turbina de vento

O elemento básico dos cata-ventos ou turbinas de vento é o rotor, o qual é formado por pás. Atualmente, a sua teoria de cálculo é similar à teoria das pás de aviões. No estudo dos perfis de pás, ignora-se a projeção horizontal da pá, assim como os efeitos do extremo da pá, flecha e outras características.

O problema do desenho de perfil de uma pá pode ser definido como a geração da forma de um corpo, cujo objetivo é satisfazer tais características, parâmetros aerodinâmicos de desenho, como por exemplo, o coeficiente de sustentação, coeficiente de arraste, assim como as distribuições de pressões.

A história do desenvolvimento das formas de aerofólios é longa e remota. Ao começo, a construção dos perfis aerodinâmicos se baseava unicamente na experiência. Assim, não havia forma nenhuma de desenhar perfis de forma analítica. Até que, em 1930, nos Estados Unidos, o comitê nacional de aeronáutica (NACA – National Advisory Committee of Aeronautics) iniciou uma pesquisa para o desenvolvimento de famílias de aerofólios de forma sistemática, empregando ferramentas matemáticas e, por tanto, favorecendo tecnologia de fácil fabricação de perfis.

Consequentemente, as diferentes famílias de perfis geradas serviram para estudar os efeitos das variáveis geométricas sobre o desempenho aerodinâmico do aerofólio.

Num primeiro lugar, se apresentam os parâmetros mais importantes do perfil aerodinâmico:

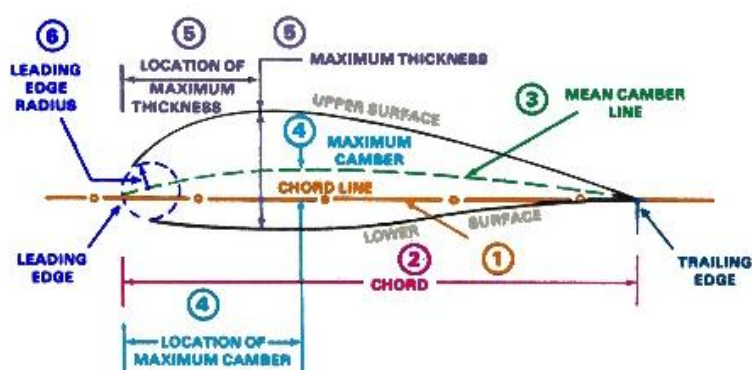


Figura 2.1: Partes do perfil

- A linha média de arqueamento se representa pela linha tracejada verde entre as superfícies superior e inferior [3].

- Nos extremos da linha média, encontramos a borda dianteira, ou borda de ataque, e a borda de fuga, com uma extremidade pontiaguda.
- A linha que faz a união entre as duas bordas anteriormente mencionadas, se chama linha de corda do aerofólio, e é um dos parâmetros de referência no desenho do perfil. O arqueamento é a distância máxima perpendicular entre a linha média e a linha de corda.
- A espessura é a distância entre a superfície superior e inferior medida perpendicularmente à linha de corda. Na *Figura 1.1* pode-se ver a espessura máxima [5].

Os perfis podem-se dividir em dois grandes grupos: os perfis simétricos e os perfis não simétricos. Assim, os perfis simétricos são aqueles sem curvatura, e conseqüentemente, aqueles cuja linha de curvatura coincide com a sua linha de corda.

Uma das vantagens dos perfis simétricos é o fato de que têm uma técnica de geração mais simples, o que se traduz num processo de fabricação menos custoso. A seguir, se apresentam as famílias de perfis tipo NACA.

2.2. Perfis NACA

2.2.1. Série NACA quatro dígitos

A família dos perfis NACA de quatro dígitos foi testada em 1932. O arqueamento e distribuição das espessuras destes aerofólios são gerados pelas equações que podem ser encontradas no *Abbot e Von Doenhoff* [1958].

As distribuições não têm uma base teórica, assim, foram formuladas para se aproximar dos aerofólios que estavam sendo usados na aquela época como, por exemplo, o aerofólio Clark-Y. (ISMAIL K. A.).

A geometria deste tipo de aerofólio é definida por quatro dígitos:

- O **primeiro** marca o arqueamento máximo em porcentagem de corda (**m**), por isso, a importância do valor da corda como referência.
- O **segundo** indica a localização do arqueamento máximo em décimos de corda (**p**).
- Os **dois últimos** dígitos representam a espessura máxima (**t**) em porcentagem da corda.

Os perfis de quatro dígitos têm, por defeito, um valor máximo de espessura de 30 % da corda.

Assim o perfil NACA 2412 tem 12% em espessura, 2 % de arqueamento, e localização a 40% do comprimento de corda medido desde a borda de ataque.

Mediante os parâmetros anteriormente mencionados, podem-se obter as coordenadas do perfil, da seguinte forma:

1. Atribuindo valores de x ao longo da corda, determinam-se as coordenadas da linha de arqueamento média mediante a seguinte equação:

$$y_c \frac{m}{p^2} (2px - x^2) \quad \text{de } x = 0 \text{ até } x = p$$

$$y_c = \frac{m}{(1-p)^2} [(1-2p) + 2x - x^2] \quad \text{de } x = p \text{ até } x = c$$

2. Depois, calcula-se a distribuição da espessura acima e abaixo da linha média mediante a seguinte equação:

$$\pm y_t = \frac{t}{0.2} (0.2969\sqrt{x} - 0.1260x - 0.3516x^2 + 0.2843x^3 - 0.1015x^4)$$

3. Finalmente, determinam-se as coordenadas do perfil, inferiores (x_I, y_I) e superiores (x_s, y_s) mediante as seguintes equações:

$$x_s = x - x_t \sin \theta$$

$$y_s = y_c - y_t \cos \theta$$

$$x_t = x + y_t \sin \theta$$

$$y_I = y_c - y_t \cos \theta$$

Sendo $\theta = \arctan\left(\frac{dy_c}{dx}\right)$

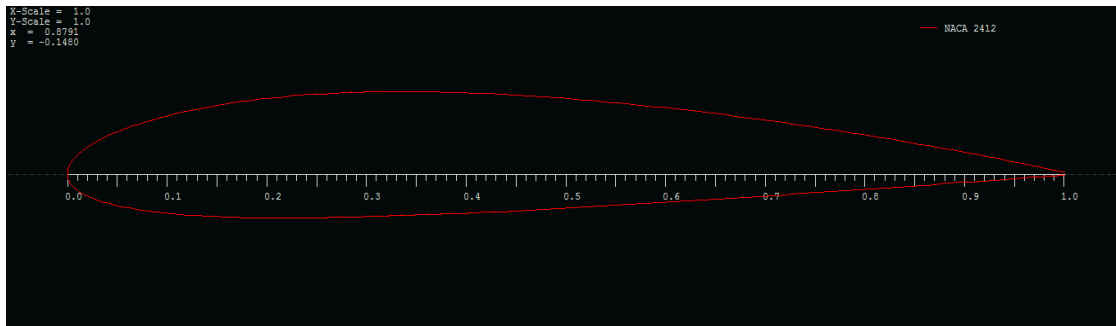


Figura 2.2: Perfil NACA 2412. Serie 4 dígitos.

Vantagens: Os perfis da série NACA de quatro dígitos apresentam boas características de perdas e pequenos movimentos do centro de pressões ao longo do intervalo de alta velocidade.

Desvantagens: Têm um baixo coeficiente de sustentação e um coeficiente de arraste relativamente alto.

2.2.2.Série NACA cinco dígitos

O desenvolvimento desta série foi realizado em 1935 e descreve perfis mais complexos. Utiliza a mesma distribuição da espessura como a série de quatro dígitos. A linha de arqueamento média é definida diferentemente, de forma que se desloca para frente e, assim, aumenta o C_{Lmax} . Consequentemente, o valor do coeficiente de sustentação aumenta 0.1 a 0.2 vezes. A geometria deste tipo de aerofólio é definida por quatro dígitos:

- O **primeiro** dígito, multiplicado por 0.15 mostra o valor do coeficiente de sustentação do projeto, em décimos.
- Os **dois seguintes** dígitos, divididos por 2, mostram a distância de máxima curvatura desde a borda de ataque em porcentagem da corda.
- Os **dois últimos** dígitos representam a porcentagem da espessura.

Assim, o perfil NACA 12345, tem um coeficiente de sustentação de 0.15, uma curvatura máxima de 0.115 c desde a borda de ataque, e uma espessura de 12%. Mediante os parâmetros anteriormente mencionados, podem-se obter as coordenadas do perfil, da seguinte forma:

1. Atribuindo valores a x ao longo da corda, determinam-se as coordenadas da linha de arqueamento média através da seguinte equação:

$$y_c = \frac{k_1}{6} [x^3 - 3mx^2 + m^2(3 - m)x] \quad \text{de } x = 0 \text{ até } x = p$$

$$y_c = \frac{k_1 m^3}{6} (1 - x) \quad \text{de } x = p \text{ até } x = c$$

Os valores de m e k_1 são obtidos pela tabela seguinte:

Designação da linha média	Localização do arqueamento máximo (p)	M	k_1
210	0.05	0.0580	361.400
220	0.1	0.126	51.640
230	0.15	0.2025	15.957
240	0.20	0.2900	6.643
250	0.25	0.3910	3.2300

Tabela 2.1: Perfil NACA 2412. Serie 4 dígitos.

2. Calcula-se a distribuição de espessuras empregando as mesmas equações utilizadas nos perfis de 4 dígitos.
3. Determinam-se as coordenadas finais empregando a mesma equação que na série de 4 dígitos.

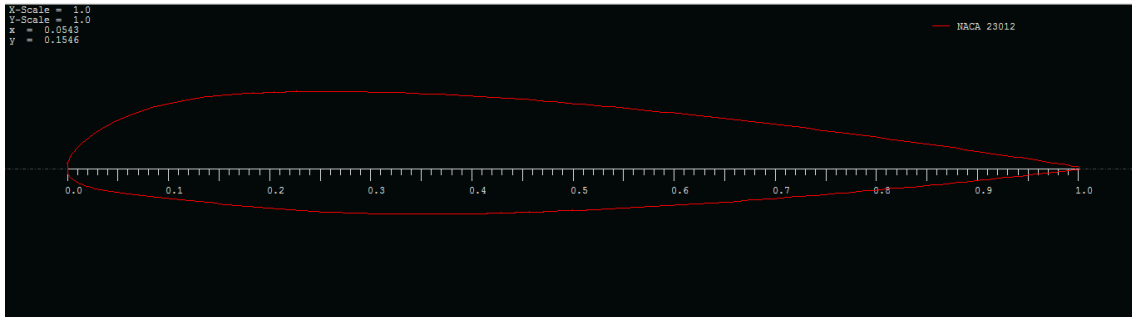


Figura 2.3: Perfil NACA 23012. Serie 4 dígitos.

Vantagens: Maior coeficiente de sustentação que a serie de 4 dígitos. Baixo momento de cabeceio.

Desvantagens: Comportamento nas perdas pouco favorável. Coeficiente de arraste relativamente alto, menor que na Série de 4 dígitos.

2.2.3.Série NACA 1 (série 16)

Em 1939, utilizou-se uma nova forma de geração de perfil onde o desenho se realizava em função dos objetivos de sustentação desejados. Gerava-se o perfil baseando-se na distribuição de pressões desejadas. Os perfis desta série se descrevem da seguinte forma:

- O **primeiro** dígito está relacionado com a série.
- O segundo dígito mostra a localização de mínima pressão, em décimos de corda.
- Depois de “-“ o **terceiro** dígito se refere ao C_L do perfil em décimos.
- Os dois dígitos seguintes descrevem a máxima espessura em décimos da corda.

Assim o perfil NACA 16-123 tem uma zona de mínimo pressão em 60% da corda, um valor do coeficiente de sustentação de 0.1 e uma espessura da corda de 23%.

Vantagens: Evitam-se picos de baixa pressão. O arraste é baixo quando o perfil trabalha a altas velocidades.

Desvantagens: O coeficiente de sustentação é relativamente baixo.

2.2.4.Série NACA 6

Os aerofólios da série NACA 6 são projetados para obter arrasto, compressibilidade e C_{lmax} desejados, sendo o baixo arrasto o principal objetivo. A melhora tem como objetivo principal manter o escoamento laminar sobre a parte inicial do aerofólio. (ISMAIL K. A.). Estes perfis surgiram pela melhora nos métodos teóricos empregados nos perfis da Serie NACA de 5 dígitos.

Assim, o perfil NACA 61₂-345 A=0.5 tem uma zona de mínima pressão no 10% da corda, mantém baixa resistência 0.2 acima e abaixo do coeficiente de sustentação. Tem máxima espessura em 45% da corda e mantém o fluxo laminar sobre o 50% da corda. Contudo, o emprego de perfis NACA, desenhados para a geração de aeronaves de baixa velocidade, não é sempre adequado para outras aplicações, como pode ser o desenho de perfis para cataventos de baixa potência.

Vantagens: Coeficiente de sustentação alto. A Série 6 foi otimizada para conseguir ter amplas regiões de fluxo laminar para altas velocidades.

Desvantagens: Quando se encontra trabalhando fora das regiões ótimas de operação, têm um coeficiente de arraste alto. Possui um momento de cabeceio elevado.

3. Fundamento Teórico. Perfil *Kutta-Joukowski*

3.1. A transformada do *Kutta-Joukowski*

Nikolai Igovich Joukowski viveu entre 1847 e 1921. Foi professor de Mecânica Analítica na Universidade de Moscou. Entre os diversos trabalhos que desenvolveu, publicou nas áreas de Matemática, Mecânica e Fluidodinâmica. Uma de suas principais contribuições foi transformada de *Joukowski*, os perfis derivados desta transformada, e a condições de *Kutta-Joukowski* sobre a circulação gerada por um perfil em movimento.

A transformada do *Kutta-Joukowski* no plano complexo é uma das mais simples transformadas empregadas no desenho de perfis aerodinâmicos. Uma de suas maiores vantagens é o fato de que os perfis gerados mediante esta técnica são pouco ruidosos.

Kutta empregou esta transformada para estudar o perfil arco circular, enquanto *Joukowski* mostrou que pode usar a mesma transformada para obter perfis com certa espessura.

$$\zeta = \xi + i\eta = z + \frac{b^2}{z} = re^{i\theta} + \frac{b^2}{re^{i\theta}} = r(\cos \theta + i \sin \theta) + \frac{b^2}{r}(\cos \theta - i \sin \theta)$$

Consequentemente,

$$\xi = \left(r + \frac{b^2}{r} \right) \cos \theta$$

$$\eta = \left(r - \frac{b^2}{r} \right) \sin \theta$$

Para a seguinte parte do estudo, onde se empregaram as equações dadas pela transformada de *Kutta Joukowski* para calcular o perfil, além do comportamento aerodinâmico, será necessário fazer simplificações para que as complexas equações que descrevem os escoamentos possam ser desenvolvidas analiticamente.

O escoamento que se vai utilizar tem as seguintes especificações ou características:

- **Bidimensional:** As características e propriedades do escoamento em estudo não têm dependência de uma das coordenadas espaciais.
- **Incompressibilidade:** A densidade é considerada como constante.
- **Irrracionalidade:** As partículas do fluxo movem-se sem rotação.
- **Escoamento permanente:** O tempo não influi nas características e propriedades do escoamento.

Assim, o escoamento pode ser representado pelas funções corrente (Ψ) e a função potencial de velocidade (ϕ).

A função de corrente esta delimitada pelas condições de bi dimensionalidade e incompressibilidade, enquanto que a função potencial de velocidade segue a condição de irracionalidade.

A função de corrente é representada por uma linha, tangente ao vetor velocidade de uma partícula qualquer que se move junto ao escoamento, enquanto que a função potencial é representada por uma linha ortogonal ao vetor de velocidade de partícula.

Para entender melhor a transformada de *Joukowski*, é necessário ter algum conhecimento básico do conceito da circulação, representada pela letra Γ . Define-se a circulação como a integral da linha de velocidade do fluido, numa curva fechada e que contém o cilindro. Pode-se definir também como a intensidade de rotação do fluido que atua sobre o corpo. Combinado com o escoamento definido anteriormente, no qual o corpo se encontra submerso, irá modificando o campo de velocidades e de pressões do escoamento ao redor do corpo, obtendo, desta forma, uma força resultante.

A circulação, por tanto, é o dado chave necessário para conhecer o valor da força resultante que atua sobre o aerofólio. Define-se como a seguinte equação:

$$\Gamma = \oint \vec{V} d\vec{s}$$

Onde Γ é a circulação, \vec{V} é o vetor velocidade de uma partícula no escoamento, e $d\vec{s}$ é um comprimento infinitesimal da linha de corrente onde a partícula se move.

Joukowski assegura que a sustentação que se produz em um aerofólio acontece pelo fato da circulação no sistema e, assegurando que as condições no infinito no plano original são iguais, as forças de sustentação que aparecem num plano, se mantêm depois da transformação para o outro plano.

3.1.1. Explicação da evolução das linhas de corrente em torno ao perfil

Quando o fluido, neste caso, o ar, começa fluir ao redor da asa, a sustentação não se produz de forma instantânea. Num primeiro momento, quando o fluido começa se acelerar, o ponto de estagnação (ponto onde as velocidades do fluxo são zero) está situado na parte superior da asa, perto do borde de fuga. Na parte de frente, o escoamento muda a sua direção bruscamente, quando o fluxo se move a altas velocidades produzindo efeitos viscosos que originam que o ponto de estagnação não pode mudar até o borde de fuga. Assim, o escoamento descola da superfície e produz um vórtice perto do borde de fuga. Aí o ponto de estagnação começa-se mover até o borde de fuga de forma que quanto mais perto está dele, maior será a circulação, e por tanto, maior será a sustentação.

Consequentemente, se gera uma circulação com um valor suficiente para que o ponto de estagnação traseiro se coloque no ponto de fuga, sendo assim, a condição de Kutta que será apresentada depois. Os pontos de estagnação traseiro e dianteiro se mantêm depois da transformação de um plano a outro.

3.2. A Condição de Kutta

Em um aerofólio, é necessário que o ponto de estagnação (pontos no contorno do aerofólio em que as velocidades do fluido são zero) traseiro fique localizado na borda de fuga. Assim, elimina-se o problema de ter no ponto de fuga, velocidades infinitesimais. Para obter isso, é necessária uma magnitude de circulação específica. O valor da circulação é fixado por esta condição, conhecida como a Condição de Kutta, que diz:

“Um corpo com borda de fuga afiado que se move em um fluido deverá criar, sobre si mesmo, circulação com força suficiente para manter o ponto de estagnação traseiro na borda de fuga.” (Kuethe & Schwitzer, 1959).

Esta condição fica restringida para os casos em que o aerofólio está trabalhando com ângulos de ataque baixos.

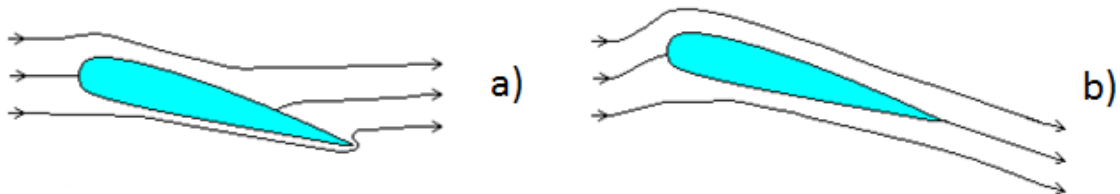


Figura 3.1: Representação das linhas de fluxo. a) Sem circulação b) Com circulação.

3.3. Transformação do círculo para aerofólio simétrico

Para conseguir um aerofólio simétrico com respeito ao eixo ξ do plano ζ , é necessário deslocar o centro do círculo do plano Z_1 , do qual se vai gerar o aerofólio. Assim, primeiro passa-se do plano Z_1 ao plano Z_2 mediante a seguinte transformada:

$$z_2 = z_1 + be^{i\theta} = z_1 + be$$

Depois, aplica-se a transformação conhecida;

$$\zeta = z_2 + \frac{b^2}{z_2}$$

Assim consegue-se que o círculo de raio b se transforme no plano z_2 em uma linha BD de comprimento $4b$. Assim, o valor da corda do perfil é o seguinte,

$$Corda = 4b$$

O círculo de radio a , é transformado em uma elipse com meio eixo maior OA , e pontos focais B , e D , como pode ser visto na imagem adjunta. Por outra parte, o círculo de raio a e centro C é transformado em um perfil simétrico de *Joukowski*. Na imagem seguinte pode-se ver a relação trigonométrica que pode ser utilizada para calcular o valor da distância de um ponto p , do círculo a , até o centro O . Denomina-se o ângulo formado pela linha que une o ponto p com o centro do círculo a e a linha que uno o ponto p com o centro de coordenadas O , como γ (ver figura 2.3).

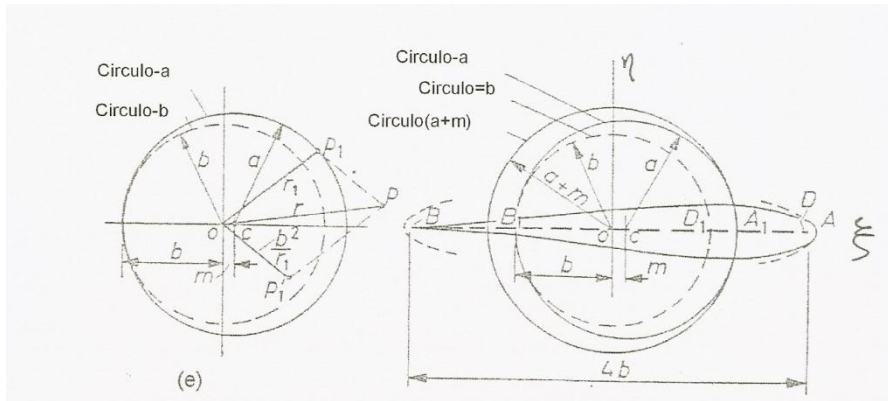


Figura 3.2: Representação da transformadas dos círculos ao plano ζ . Perfil Simétrico.

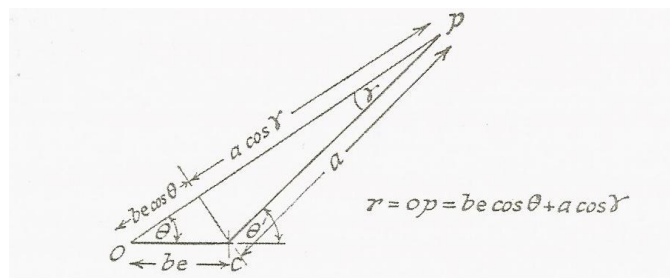


Figura 3.3: Relação trigonométrica. Transformação do círculo para aerofólio simétrico. Perfil Simétrico.

Observamos la seguinte relação,

$$r = be \cos \theta + a \cos \gamma$$

Sendo que o ângulo γ é muito pequeno, tem-se $\cos \theta = 1$. Assim,

$$r = be \cos \theta + a$$

Consequentemente, $a = b + be \frac{r}{b} = 1 + e + e \cos \theta$.

Expandindo a equação e fazendo as transformações necessárias, obtêm-se:

$$\frac{b}{r} = (1 - e - e \cos \theta)$$

E sabemos que,

$$\frac{r}{b} = 1 + e + e \cos \theta$$

Assim, desenvolvendo a equação da transformada de *Joukowski* obtêm-se,

$$\zeta = z + \frac{b^2}{z} = re^{i\theta} + \frac{b^2}{r} e^{-i\theta} =$$

$$r(\cos \theta + i \sin \theta) + \frac{b^2}{r}(\cos \theta - i \sin \theta) = db \left(\frac{r}{b} + \frac{b}{r} \right) \cos \theta + ib \left(\frac{r}{b} - \frac{b}{r} \right) \sin \theta$$

E, substituindo os valores de $\frac{b}{r}$ e $\frac{r}{b}$, tem-se;

$$\zeta = \xi + i\eta = 2b \cos \theta + i2be(1 + \cos \theta) \sin \theta$$

Assim,

$$\xi = 2b \cos \theta$$

$$\eta = 2be(1 + \cos \theta) \sin \theta$$

Para calcular a relação entre a espessura/corda, o valor máximo pode ser obtido da $d\eta = d\theta = 0$.

$$\frac{d\eta}{d\theta} = 2be\{(1 + \cos \theta) \cos \theta - \sin \theta \sin \theta\} = 0$$

Ou

$$\cos^2 \theta - \sin^2 \theta + \cos \theta = 0 \text{ ou}$$

$$2\cos^2 \theta + \cos \theta - 1 = 0 \text{ ou}$$

$$(2\cos \theta - 1)(\cos \theta + 1) = 0$$

Sendo as possíveis soluções, as que seguem,

$$\cos \theta = \frac{1}{2} \rightarrow \theta = 60^\circ \rightarrow \text{Ponto máximo}$$

$$\cos \theta = -1 \rightarrow \theta = 180^\circ \rightarrow \text{Ponto mínimo}$$

Substituindo o valor do ângulo onde se tem o ponto máximo, na equação para determinar a coordenada no eixo horizontal, $\xi = 2b \cos \theta = b$, vemos como o ponto máximo se encontra a $\frac{1}{4}$ da corda.

$$\text{A espessura máxima } t = 2\eta_{max} = 3(3)^2 be$$

A razão, espessura/corda é:

$$\frac{3\sqrt{3}be}{4b} = 1.299e \cong 1.3$$

Consequentemente,

$$\frac{\text{Espessura}}{\text{corda}} = 1.3 e$$

(ISMAIL K. A.)

3.4. Transformação de círculo para aerofólio com arqueamento

Anteriormente, foi apresentado como a mudança do centro do círculo sobre o eixo X originava a geração de um aerofólio simétrico, com respeito ao eixo ξ . Agora, mostra-se, ao deslocar o centro do círculo para o primeiro quadrante, até o ponto C, de modo que $OC=m$ e o ângulo $COX=\delta$. Pela transformação,

$$z_2 = z_1 + m e^{i\delta}$$

Seguidamente, utiliza-se a transformação,

$$\zeta = z_2 + \frac{b^2}{z_2}$$

Sendo $b = OB_1$, transforma o círculo b numa linha reta de tamanho igual $4b$. O círculo a se transforma em um perfil aerodinâmico, como é mostrado na *figura 2.4*. Como foi comentado, neste caso, o círculo é deslocado horizontal e verticalmente da origem do plano Oxy , como se apresenta na *figura 2.4*.

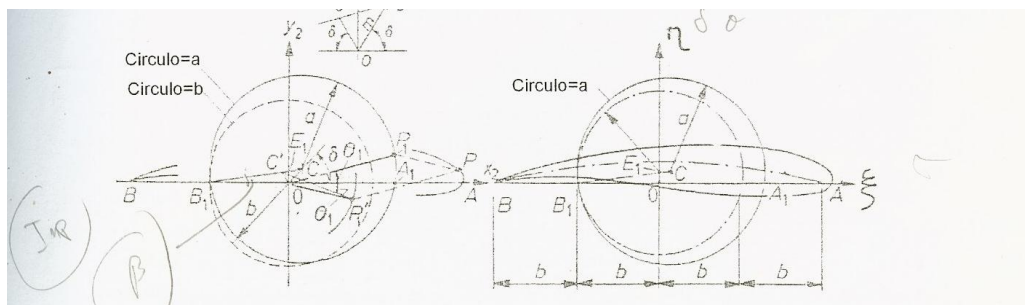


Figura 3.4: Representação da transformadas dos círculos ao plano ζ . Perfil Assimétrico.

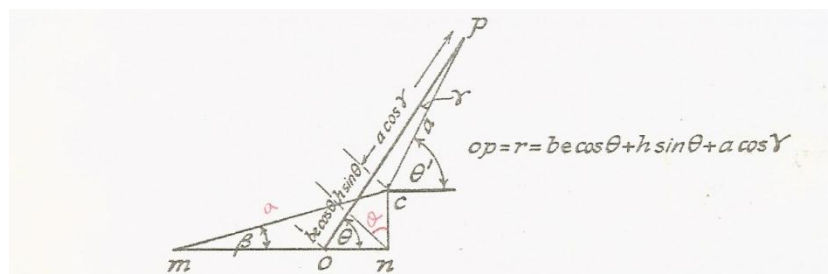


Figura 3.5: Relação trigonométrica. Transformação do círculo para aerofólio simétrico. Perfil Assimétrico.

O deslocamento horizontal $On = be$

O deslocamento vertical é $cm = h$

O ângulo β , medido desde o ponto de saída m , entre o eixo horizontal e a linha que une o ponto m e o centro do círculo, tem um valor muito pequeno. Assim, $\cos \beta = 1$ e também $\cos \gamma \cong 1$. O deslocamento vertical $h = a \sin \beta = b(1 + e)\beta \cong b\beta$

Por tanto:

$$Op = r = a \cos \gamma + h \sin \theta + be \cos \theta$$

Sabe-se que:

$$a = b + be$$

$$h = b\beta$$

Assim,

$$r = b + be + be \cos \theta + b\beta \sin \theta$$

Consequentemente, têm-se as seguintes equações:

$$\frac{r}{b} = 1 + e + e \cos \theta + \beta \sin \theta$$

$$\frac{b}{r} = 1 - e - e \cos \theta - \beta \sin \theta$$

Da transformada de *Joukowski* obtém-se:

$$\zeta = z + \frac{b^2}{z} = r(\cos \theta + i \sin \theta) + \frac{b^2}{r}(\cos \theta - i \sin \theta) = b \left(\frac{r}{b} + \frac{b}{r} \right) \cos \theta + ib \left(\frac{r}{b} - \frac{b}{r} \right) \sin \theta$$

E, substituindo os valores de $\frac{b}{r}$ e $\frac{r}{b}$ tem-se;

$$\zeta = 2b \cos \theta + i2b(e + e \cos \theta + \beta \sin \theta) \sin \theta$$

Assim, o círculo C se transforma em aerofólio arqueado, cujos pontos são dados pelas seguintes coordenadas:

$$\xi = 2b \cos \theta$$

$$\eta = 2b(e + e \cos \theta + \beta \sin \theta) \sin \theta$$

A espessura máxima ocorre no ponto $\xi=b$, isto é, sendo a $\frac{1}{4}$ da corda do perfil. Consideramos a espessura $t=\eta_1-\eta_2$, onde

$$\eta_1 = 2be(1 + \cos \theta_1) \sin \theta_1 + 2b\beta \sin^2 \theta_1$$

$$\eta_2 = 2be(1 + \cos \theta_2) \sin \theta_2 + 2b\beta \sin^2 \theta_2$$

Sendo que η_1 e η_2 não estão na mesma posição ξ , assim $\theta_1 = \theta_2$, conseqüentemente,

$$t = \eta_1 - \eta_2 = 4be (1 + \cos \theta_1) \sin \theta_1$$

Sabe-se que o valor da corda do aerofólio é $4b$, assim a razão entre a espessura e a corda é a seguinte,

$$\frac{t}{\text{corda}} = \frac{4be(1 + \cos \theta_1) \sin \theta_1}{4b} = e(1 + \cos \theta_1) \sin \theta_1$$

O valor será máximo quando $\theta_1 = 60^\circ$, assim, quando a relação t/corda seja $\left(\frac{t}{\text{corda}}\right)_{\text{máx}} = 1.3e$. O arqueamento é dado por $\frac{1}{2}(\eta_1 + \eta_2)_{\text{máx}}$.

Conseqüentemente a porcentagem de arqueamento será $\frac{(\eta_1 + \eta_2)_{\text{máx}}}{2 \text{ corda}} \cdot 100\%$

$$\text{Mas } (\eta_1 + \eta_2)_{\text{máx}} = \frac{(4b\beta \sin^2 \theta)_{\text{máx}}}{2 \cdot 4b} = \frac{\beta}{2} (\sin \theta)$$

Onde o $\sin^2 \theta_{\text{máx}}$ é quando $\theta = 90^\circ$.

Assim, a porcentagem de arqueamento = $\frac{\beta}{2} \cdot 100\%$

(ISMAIL K. A.)

3.5. Coeficiente de sustentação C_L

O coeficiente de sustentação C_L obtém-se da seguinte forma. Em primeiro lugar, a velocidade calculada do ponto p sobre o cilindro, com um ângulo de θ_c respeito à incidência do fluxo de ar vem dada pela seguinte expressão:

$$q_c = 2U \sin \theta_c + \frac{k}{2\pi a}$$

Onde a é o valor do raio do círculo. Como o ponto n é um ponto de escoamento, a velocidade é nula, e $\theta_c = -(\alpha + \beta)$. Portanto,

$$q_c = 0 = 2U \sin[-(\alpha + \beta)] + \frac{k}{2\pi a}$$

Isolando k , tem-se que $k = 4\pi U a \sin(\alpha + \beta)$.

Sabe-se que a sustentação por unidade de envergadura é dada pela seguinte equação:

$$l = \rho U k = \rho U 4\pi U a \sin(\alpha + \beta) = 4\rho U^2 a \sin(\alpha + \beta)$$

Sabe-se também que $l = C_L \cdot \frac{1}{2} \rho U^2 c$, onde $c = 4b$.

Conseqüentemente, $C_L = 2\pi \frac{a}{b} \sin(\alpha + \beta)$, mas como $\frac{a}{b} = 1 + e$, tem-se que:

$$C_L = 2\pi(1 + e) \sin(\alpha + \beta)$$

(ISMAIL K. A.)

4. Programa de Matlab: Perfis *Kutta-Joukowski*

A seguir, apresenta-se o programa desenhado para a geração de perfis aerodinâmicos mediante a utilização da teoria de *Kutta Joukowski*. Porém, empregam-se as equações mostradas anteriormente.

Mediante o programa, o usuário tem a oportunidade de visualizar, de forma rápida, a variação da geometria e o valor do coeficiente de sustentação C_L em função dos parâmetros de desenho chave dentro desta técnica. Esses parâmetros são a **relação espessura/corda** e a **porcentagem de curvatura** do aerofólio. Encontram-se diretamente relacionados com as propriedades do perfil.

O programa tem a opção de que o usuário pode selecionar a quantidade de pontos de estudo que se desejam. Um maior número de pontos de estudo origina uma maior precisão dentro dos cálculos feitos.

Finalmente, o usuário pode gerar um arquivo **.dat** para posteriormente empregar ele em outros programas de desenho de perfis. Dependendo do programa empregado, é necessário colocar diretamente o valor dos pontos gerados, que se apresentam na janela depois de clicar no perfil desejado. Além disso, na mesma janela, se apresenta uma tabela com os dados de coeficiente de sustentação, o coeficiente mais importante na hora do desenho.

4.1. Parâmetros de controle

Na hora do desenho, o usuário tem a possibilidade de impor o valor da **espessura e o valor do arqueamento**. Assim, escolhem-se os parâmetros de forma que se obtenham as propriedades do perfil que mais se ajustem às necessidades impostas pelas condições do trabalho do perfil. No capítulo *5.1 Eleição dos Parâmetros de Desenho* será apresentado o critério empregado no momento do desenho.

4.2. Manual para o usuario

Na hora de executar o programa, o usuário acessa uma janela. Na parte esquerda da mesma, há as opções de:

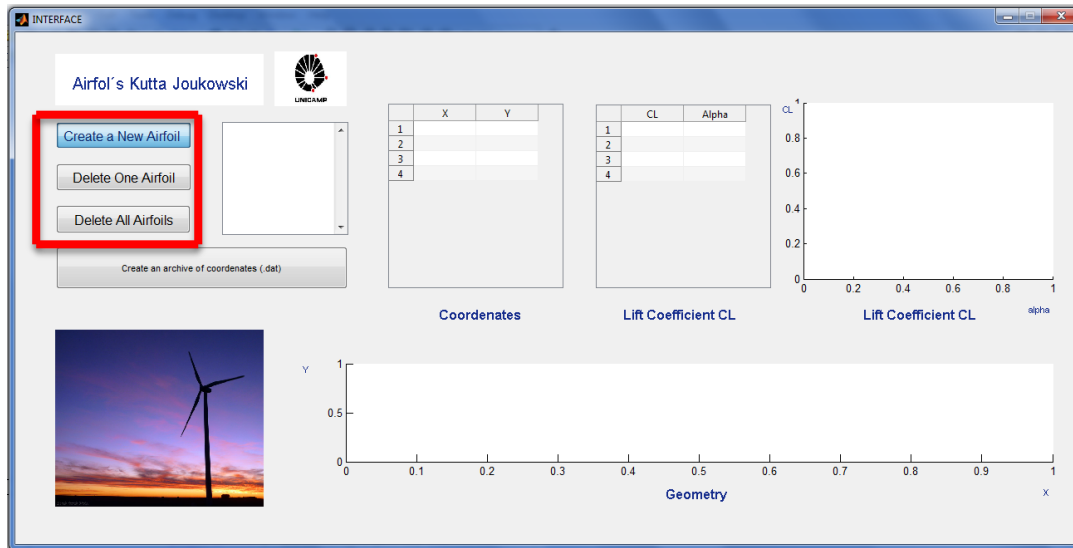


Figura 4.1: Interface inicial programa de Matlab: Perfis *Kutta Joukowski*

- Create a New Airfoil: Gerar um novo aerofólio, que será adicionado na lista situada à direita dos botões.

- Delete One Airfoil: O usuário deve selecionar o perfil que deseja apagar, e posteriormente, clicar no botão “Delete One Airfoil”.

- Delete All Airfoils : Clicando neste botão, o usuário apaga todos os perfis que estiverem na lista ao lado.

- Create an archive .dat: O usuário deve selecionar o perfil do qual pretende guardar as suas coordenadas e, posteriormente, clicar no botão “Gerate an archive of coordenates (.dat)”. Seguidamente um arquivo com o nome dado ao perfil será gerado **na pasta do programa**.

Uma vez gerado os perfis, se o usuário precisar visualizar a geometria, a variação do coeficiente C_L com o ângulo de ataque, assim como os valores dos pontos gerados do mesmo, tem que clicar no perfil desejado.

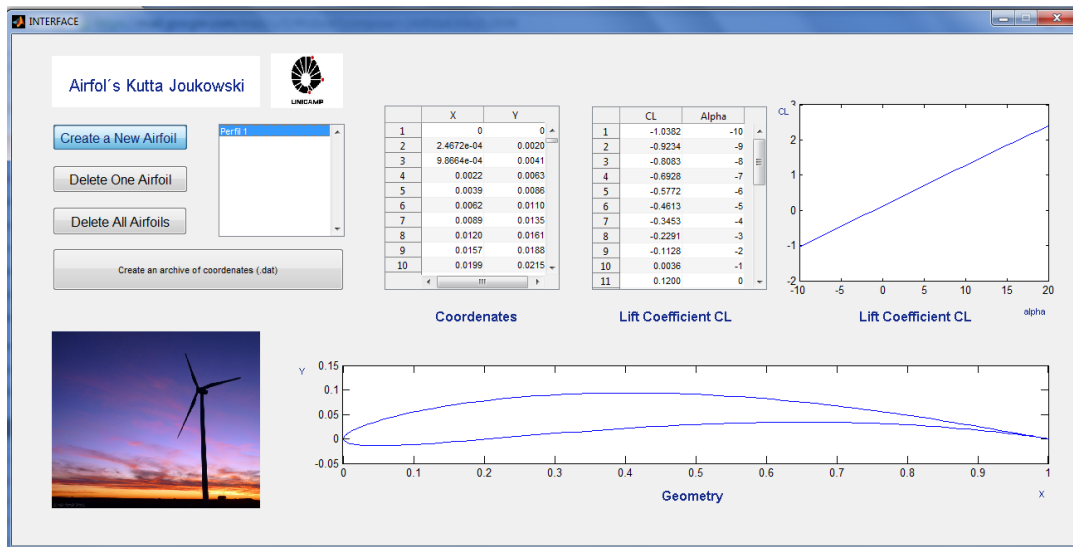


Figura 4.2: Interface resultados do programa Perfis Kutta Joukowski

5. Área de Trabalho e Parâmetros de Desenho

O programa mostrado anteriormente é empregado para desenhar perfis mediante as equações apresentadas na teoria da transformada de *Joukowski*.

Uma das vantagens da geração de perfis empregando esta técnica é o fato de que possui baixo nível de ruído quando se está trabalhando. Vantagem importante dentro do mercado energético onde se pretendem atuar estes tipos de perfis: o mercado ligado à independência energética. O ruído já provoca grandes problemas dentro da União Europeia.

Para isso, se deve levar em conta vários fatores chaves para o bom desenvolvimento do protótipo. Assim, durante o desenvolvimento, se trabalhará com diferentes números de Reynolds, assim como com diferentes ângulos de ataque.

A escolha de um tipo de perfil para a sua instalação em um cata-vento precisa de análises detalhadas. Há que se distinguem as características de perfis destinados à construção de aviões, que requerem altos números de Reynolds, com as características dos perfis de cataventos, onde o Reynolds na ponta do perfil muda muito com o valor na saída do perfil. Os parâmetros mais importantes na hora da seleção do tipo de perfil são os seguintes:

- **Velocidades do vento em que se vai trabalhar**

Analisando o estudo feito na primeira parte do trabalho, pode-se observar que o Nordeste é uma das regiões mais favoráveis para a instalação de cataventos pelo efeito dos ventos acentuados pela brisa marinha. Lá os ventos alcançam valores de até 9 m/s, contudo, deve-se levar em conta as baixas velocidades dos ventos. Assim, o protótipo deve estar preparado para trabalhar em faixas de ventos altas e baixas.

- **Ângulo de ataque em que se vai trabalhar**

O ângulo de ataque modifica todos os que se apresentam posteriormente. As variações da velocidade do vento têm mais influência no ângulo de ataque perto da base que no ângulo de ataque na extremidade da pá. Isso acontece pelo fato de que o ângulo de ataque depende da velocidade resultante da soma vetorial da velocidade gerada pelo efeito do giro mais a velocidade do vento, além das velocidades induzidas em cada seção pelo efeito das outras seções da pá. Assim, na base, a resultante da velocidade tangencial gerada pelo giro é muito menor que na ponta da pá, sendo mais influente neste caso a velocidade do vento.

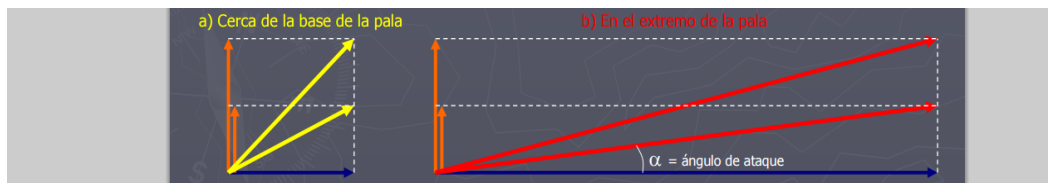


Figura 5.1: Componentes das velocidades na base e na ponta da pá

Tem que se levar em conta o fato de que os coeficientes de sustentação diminuem com ângulos de ataque muito grandes, devido ao desprendimento da capa limite.

Além disso, o coeficiente de arraste aumenta significativamente com o aumento do ângulo de ataque.

- **Alto valor do coeficiente de sustentação C_L**

O coeficiente de sustentação geralmente é calculado mediante provas feitas em túneis de vento ou em softwares específicos que simulam um túnel de vento, como é o caso do XFLR5 empregado neste trabalho.

O coeficiente de sustentação dá uma ideia da eficiência do perfil no momento de gerar uma força de sustentação. O valor do coeficiente de sustentação está relacionado diretamente com o ângulo de ataque em que trabalha o perfil, o número de Reynolds em que está operando e, obviamente, do modelo do perfil. O valor procurado deve ser o máximo possível, tendo em conta a relação C_L/C_D .

- **Baixo valor do coeficiente de empuxo C_D .**

O arraste faz referência às forças que atuam sobre o perfil na direção do vento. O coeficiente é uma quantidade adimensional que se emprega para quantificar o arraste ou resistência de um objeto dentro de um fluido como, por exemplo, a água ou o ar.

O coeficiente de arraste engloba os efeitos produzidos tanto pela forma do objeto, quanto pelas características da superfície dele.

- **Relação C_L/C_D .**

A relação C_L/C_D é uma medida da eficiência de um aerofólio. Procura-se obter um alto valor deste coeficiente, o que origina que o coeficiente de potência aumente, mesmo que o raio da turbina diminua, objetivo chave, tendo em conta o destino das turbinas geradas com este método.

O valor do coeficiente C_L/C_D depende entre outras coisas da qualidade do acabado do perfil, assim como da curvatura, espessura, etc.

Há que se ter em conta também que altos valores desse coeficiente possuem maior curvatura e, conseqüentemente, aumentando-se o ângulo de ataque o momento aerodinâmico cresce.

- **Coeficiente C_m**

Coeficiente de momento. Depende da posição do centro aerodinâmico, situado a 25% da corda. Em perfis com pouca espessura e trabalhando com velocidades próximas à velocidade do som, o valor aumenta. A posição do ponto é de tal forma que o valor do coeficiente C_m se mantém constante e independente do valor do coeficiente de sustentação ou do ângulo de ataque.

- **Coeficiente C_p**

O coeficiente de potência C_p , marca a fração de energia do vento que a turbina converte em energia mecânica de rotação. Na gráfica seguinte se mostra a sua variação com o fator λ , para distintos valores de C_L/C_D em um cata-vento de três pás. Além de que se apresenta o limite teórico de 0.6 que é dado pela teoria de *Betz*.

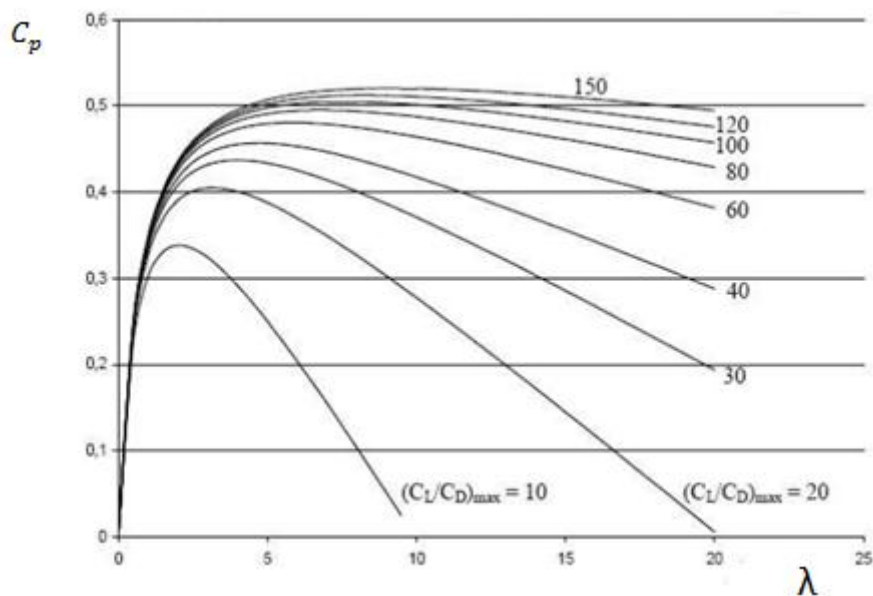


Figura 8.1: Evolução do coeficiente C_p frente a λ para diferentes valores da relação $(C_L/C_D)_{max}$

Da gráfica podemos observar que não teria sentido trabalhar em regimes altos de giro se o cata-vento tem uma relação C_L/C_D baixa, já que o valor de C_p torna-se baixo também. Além de que, devido ao custo de um melhor acabado superficial, às vezes é mais rentável trabalhar com relações de C_L/C_D e velocidades de rotação menores.

- **Número de Reynolds.**

O número de Reynolds é um indicativo da turbulência do fluxo. Para a seleção do tipo de perfil se emprega um número de Reynolds de 1×10^7 .

5.1. Aproximações dos coeficientes de sustentação e de arraste

O emprego das aproximações seguintes influi de forma depreciável nos resultados, facilitando os cálculos.

5.1.1. Coeficiente de sustentação C_L

Como se apresentou durante a teoria de *Kutta Joukowski*, os perfis gerados pelas equações apresentadas anteriormente, possuem uma borda de saída muito afilada. Além disso, essa geometria é inviável de fabricar. Se for possível, o borde de saída não suportaria os esforços gerados, e terminaria se quebrando. Conseqüentemente o perfil deve ser modificado.

O Perfil Modificado de *Kutta Joukowski* responde à seguinte equação,

$$\frac{\zeta + nc}{\zeta - nc} = \left(\frac{z + c}{z - c}\right)^n$$

Porém, devido ao fato da alta dificuldade dos cálculos, o programa desenhado emprega as equações do aerofólio de *Kutta Joukowski* ideal. A continuação se mostra a justificação de que o emprego dos dados de C_L obtidos do perfil ideal é viável.

O programa empregado para o análise do comportamento do perfil é o **XFLR5**, a evolução do conhecido programa de desenho de perfis XFOIL, gerado por *Mark Drela*.

A distribuição do coeficiente de pressões de um perfil qualquer com arqueamento tem a seguinte forma:

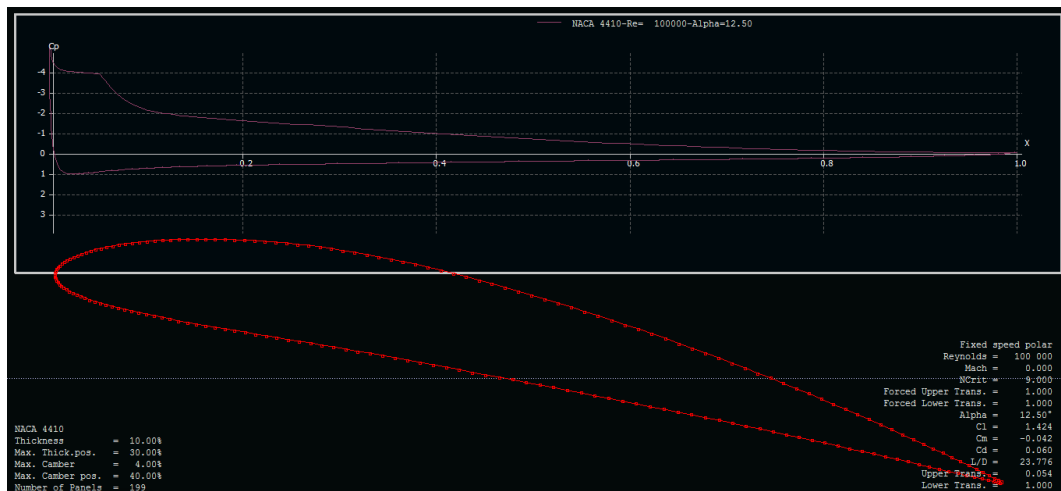


Figura 5.2: Coeficiente C_p ao longo da corda. Perfil NACA 4410

Assim, pomos observar que na frente do perfil a diferença de pressões entre a parte superior e a inferior é maior que ao longo do perfil, tendo um pico perto da borda de ataque. Por este motivo, a contribuição da diferença de pressões perto da borda de fuga é depreciável frente ao resto do perfil.

Conseqüentemente, mediante a gráfica mostrada anteriormente, pomos concluir que a influência de um aumento de espessura na borda de fuga não origina apenas diferença na

sustentação. Assim, na hora do desenho da turbina, se empregaram os dados do coeficiente de sustentação C_L obtidos com o perfil gerado mediante as equações *Kutta Joukowski* sem modificar.

5.1.2. Coeficiente de empuxe, C_D

O coeficiente de empuxe de uma pá tem dois fatores tal como vimos na seguinte equação:

$$C_D = C_{D_0} + kC_L^2$$

Devido ao fato de que a relação entre o comprimento da pá e a corda é muito grande, o fator kC_L^2 pode ser desprezado, facilitando os nossos cálculos.

Mediante o programa XFLR5 realizamos um análise do comportamento de um perfil tipo NACA 4410, com condições de arqueamento parecidas ao nosso perfil, para diferentes valores de Reynolds. Vemos a evolução do valor do coeficiente de empuxe C_D em função do ângulo de ataque. Podemos observar como, para ângulos de ataque compreendidos entre [-2] e [7.5-10] graus, que o valor de C_D é **praticamente constante**. A partir do valor mencionado, o C_D aumenta a medida que aumenta o ângulo de ataque. Porém, trabalhar com ângulos de ataque maiores de 8 graus é pouco frequente.

Consequentemente, pode-se seleccionar o mesmo valor constante para os ângulos de ataque de trabalho do perfil. Assim se faz a aproximação $C_D = C_{D_0}$, valor que será obtido mediante o programa XFLR5.

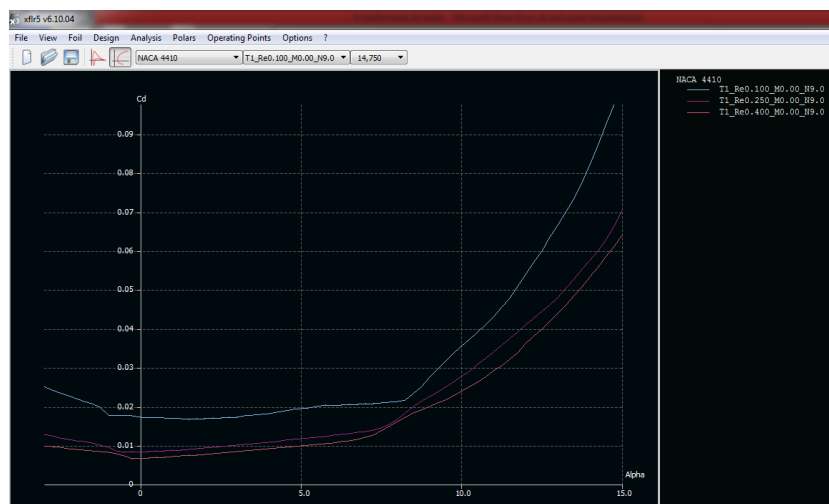


Figura 5.3: Evolução do coeficiente C_d em função do ângulo de ataque para diferentes Números de Reynolds. Perfil NACA 4410

Pelo explicado anteriormente, e devido à impossibilidade de calcular o valor de C_D mediante o programa gerado, na hora de dar um valor para o coeficiente de empuxe dos perfis gerados pelo programa de Matlab, se seguira o seguinte procedimento. Será seleccionado um perfil NACA com propriedades similares de espessura e arqueamento ao nosso perfil gerado, e

mediante o programa XFLR5, se obterá o coeficiente C_D , tal e como se explicou neste mesmo apartado.

6. Desenvolvimento e Seleção do Perfil

A continuação se apresentarão perfis que podem ter um bom comportamento dentro dos objetivos de desenho mencionados anteriormente. Deve-se ter em conta que se trata de um perfil dedicado à instalação de um catavento de baixa potencia.

Analisa-se a evolução dos coeficientes de sustentação C_L e empuxe C_D , assim como seu cociente C_L/C_D , em função do ângulo de ataque.

Na hora de selecionar um perfil, a importância dos coeficientes dados terá a seguinte ordem:

- Primeiro: Coeficiente de sustentação, C_L .
- Segundo: Relação entre os coeficientes de sustentação e de arraste, C_L/C_D .
- Terceiro: Coeficiente de arraste, C_D .

Tem que se levar em conta o fato de que mediante o desenho de perfis de *Kutta Joukowski* só pode-se variar a espessura ao longo da corda e o arqueamento. Por isso mesmo se estuda a sua influência de forma separada.

6.1. Eleição dos Parâmetros de Desenho

Realizamos o estudo tendo em conta os parâmetros disponíveis para a modificação dentro do programa gerado, relação espessura/corda e arqueamento.

Um dos aspetos importantes do desenho do perfil relativo ao desenvolvimento do fluido ao redor do mesmo é o fato de que as linhas do fluido devem circular o mais perto possível ao perfil. Isso se obtém aumentando o radio da ponta de ataque, assim como aumentando o arqueamento.

O aumento da espessura do perfil origina o efeito contrario, ou seja, provoca que as linhas do fluido se separem do perfil. Contudo, os perfis muito finos têm um pico de pressão

perto ao borde de ataque, o que pode originar o desprendimento da corrente nesta parte do perfil.

Uma maior espessura é de vital importância no valor do coeficiente de sustentação C_{Lmax} , assim como a distribuição da espessura ao longo da corda. Por exemplo, que a máxima espessura se encontre detrás do ponto médio da corda gera altos cabeceios. Além do comentado anteriormente, a consequência fundamental do aumento do arqueamento é o aumento do coeficiente de sustentação C_L . Contudo, o valor do coeficiente de arraste também se vê aumentado.

Além da espessura e a curvatura do perfil, parâmetros ajustáveis mediante a técnica de *Kutta Joukowski*, a disposição e forma do borde de ataque e de saída são também parâmetros de desenho importantes na hora de conseguir os coeficientes e o comportamento desejado.

Uma borde de saída angulosa evita o desprendimento da corrente. Infelizmente, essa é uma solução não aplicável para os perfis de cata-ventos, já que originam muito ruído. Borda de ataque redondo origina um coeficiente de sustentação C_{Lmax} maior trabalhando em baixas velocidades (ISMAIL). Além disso, uma parte superior relativamente plana origina uma distribuição de pressões controlada, evitando os picos de pressão.

Enquanto à sustentação, lembrar o fato de que a sucção na parte superior do perfil tem uma contribuição maior para uma maior sustentação que uma sobre pressão na parte inferior.

6.1.1. Influência do Arqueamento

Em primeiro lugar, se fixa o valor da espessura ao longo da corda, e se varia o valor do arqueamento entre o intervalo de 2% - 9%. Valores maiores de arqueamento não têm sentido devido ao alto coeficiente de arraste que tivesse o perfil. Além disso, se teria que ter conta a histeria produzida pelo alto valor do arqueamento, o que originaria uma maior instabilidade do cata-vento produzindo oscilações.

Para escolher o valor da espessura fixo que vai ser escolhida, se procuram aqueles valores dos perfis empregados nas pás dos cataventos de baixa potência. Consequentemente escolhemos um valor de 12% de espessura baseando-nos nos seguintes perfis: perfil NACA 4420, com 20% de espessura máxima em função da corda, o perfil NACA 4412 com 12%, SD 780 9.8% (Chen & P. Bernal, 2006), Dae-51 com 9.4%, E-387. No *Anexo 1* se apresentam as polares dos perfis.

Emprega-se o programa desenhado para gerar perfis mediante a teoria de *Kutta Joukowski* para obter os diferentes perfis e calcular o coeficiente C_L de cada um deles. O coeficiente C_D será calculado mediante o procedimento explicado no capítulo 4.2.1.2.

A continuação se mostra um exemplo dos cálculos dos coeficientes que rechearão a *tabela 5.1*.

6.1.1.1. Metodologia de Cálculo

1. Fixado o valor da espessura/corda em 10%. Coloca-se o valor do arqueamento em função da corda. Neste caso o valor do **Perfil 1** será 2%.
2. Colocar os valores dos parâmetros no programa de Matlab, *Perfis Kutta Joukowski*, e gerar o perfil.

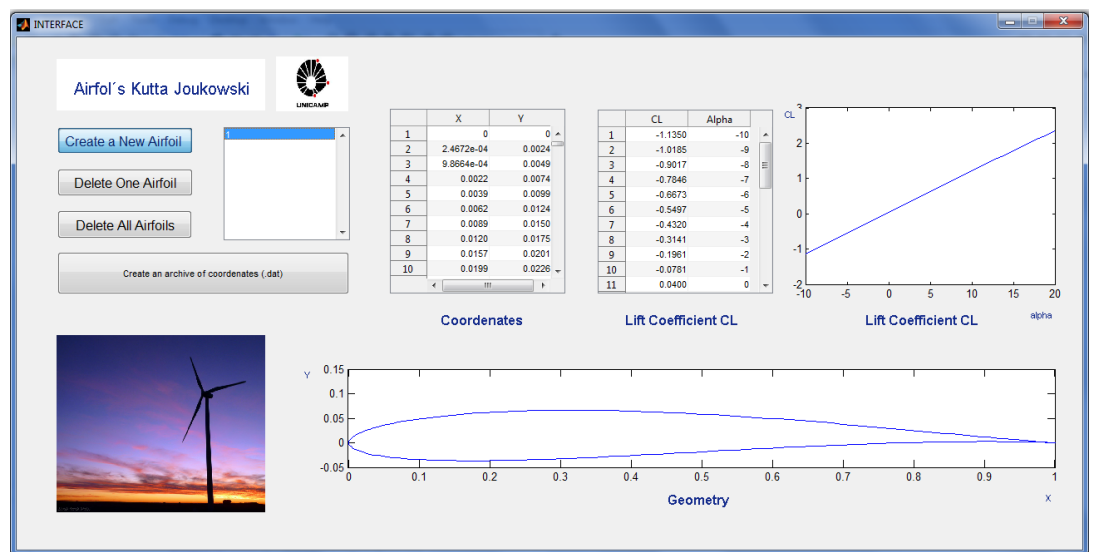


Figura 6.1: Cálculo dos coeficientes C_L a través do programa *Perfis Kutta Joukowski*

3. Obtêm-se os valores de C_L . Estudam-se os valores para ângulo de ataque de 0,4,5,6,7,8.
4. Se obtiver o valor de C_D da seguinte forma:
 - 4.1. Abrir o perfil gerado no programa XFLR5.
 - 4.2. Gerar um perfil NACA com os valores da espessura e arqueamento similares ao perfil gerado por Matlab. O arqueamento máximo é colocado na metade da corda, já que assim se assemelha mais ao perfil gerado com Matlab.
 - 4.3. Por tanto, neste caso, gera-se o perfil NACA 2510, com uma espessura máxima em função da corda de 10% e um arqueamento/corda máximo situado na metade da corda de 2%.



4.4. Realizar análise Batch para calcular as polares do perfil NACA.

4.4.1. Dados da análise:

- Número de Reynolds: 10^7 .
- Intervalo de ângulo de ataque: [-3,12] graus.
- Tamanho entre cada medida: 1 grau.

4.5. Obter o valor de C_D empregando a metodologia explicada no **apartado 4.2.1.2**.

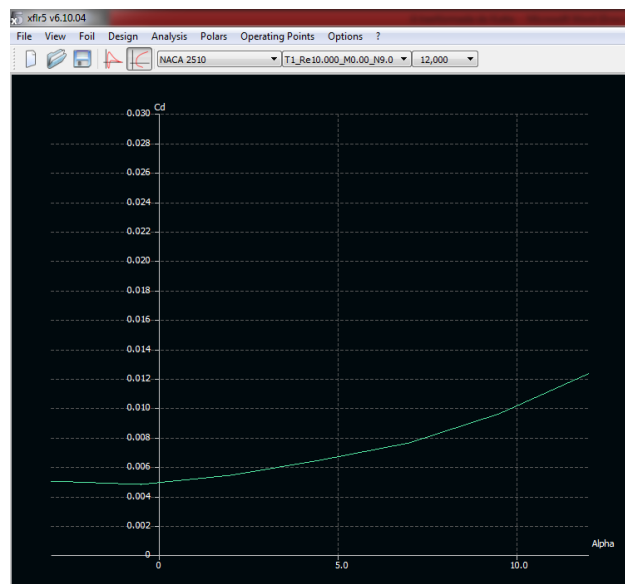


Figura 6.3: Perfil 1. Coeficiente C_D em função de α . Número de Reynolds igual a 1×10^7 .

Por conta da gráfica ajunta, obtemos um valor aproximado de $C_D = 0.006$

6.1.1.2. Cálculo dos coeficientes para os protótipos de perfis

- Coeficiente de sustentação C_L

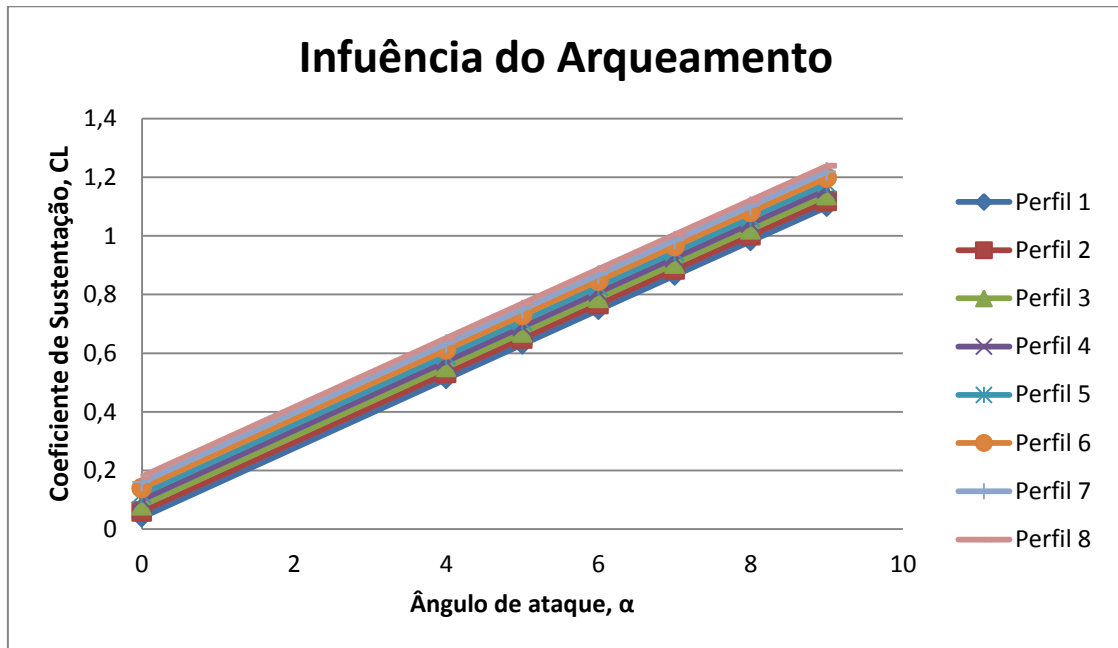


Figura 6.4: Influência da curvatura. Representação do coeficiente C_L em função de α para os diferentes perfis. Número de Reynolds igual a 1×10^7 .

Ampliamos a gráfica, para observar melhor os diferentes valores do coeficiente C_D para os distintos perfis.

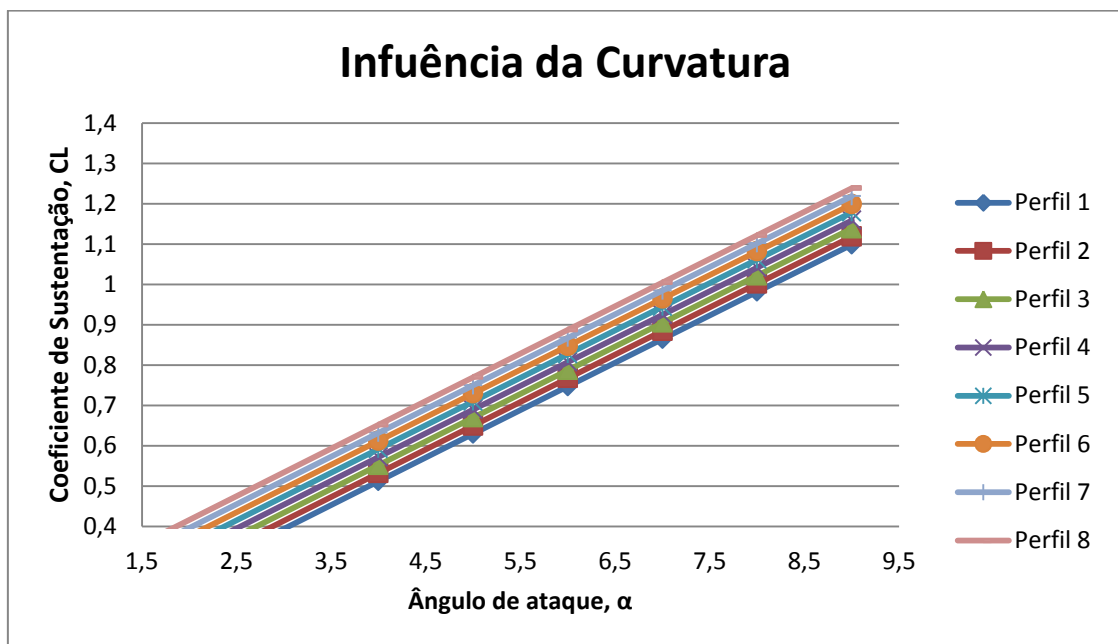


Figura 6.5: Influência do arqueamento. Representação do coeficiente C_L em função de α para os diferentes perfis. Ampliação. Número de Reynolds igual a 1×10^7 .

- **Coefficiente de arraste C_D**

Na seguinte gráfica se pode ver a diferença entre os C_D de cada um dos aerofólios NACA que são semelhantes aos aerofólios gerados por o programa de Matlab.

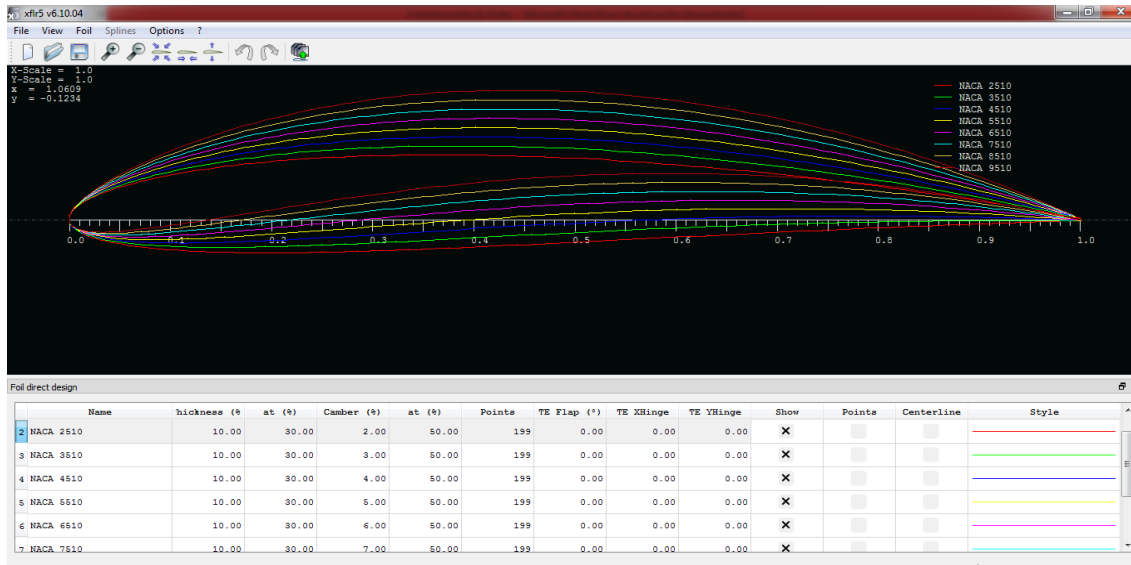


Figura 6.6: Representação dos perfis NACA “semelhantes” aos perfis 1-8 gerados por Matlab levados a estudo.

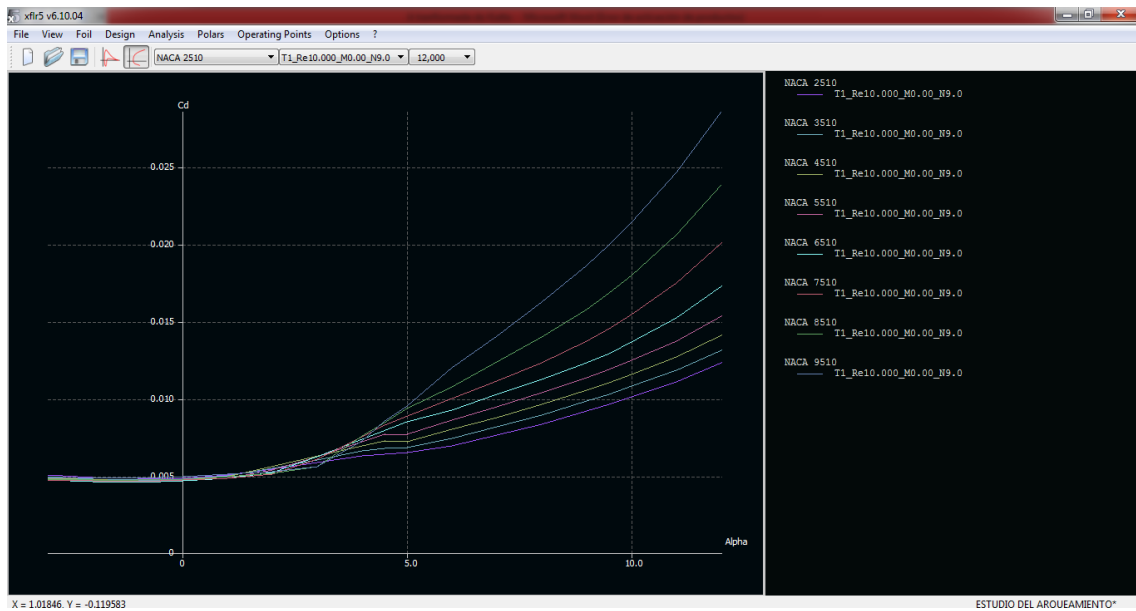


Figura 6.7: Representação dos coeficientes C_D em função do ângulo de ataque α para os perfis NACA “semelhantes” aos perfis 1-8 gerados por Matlab. Número de Reynolds igual a 1×10^7 .

- **Coefficiente de arraste C_L/C_D**

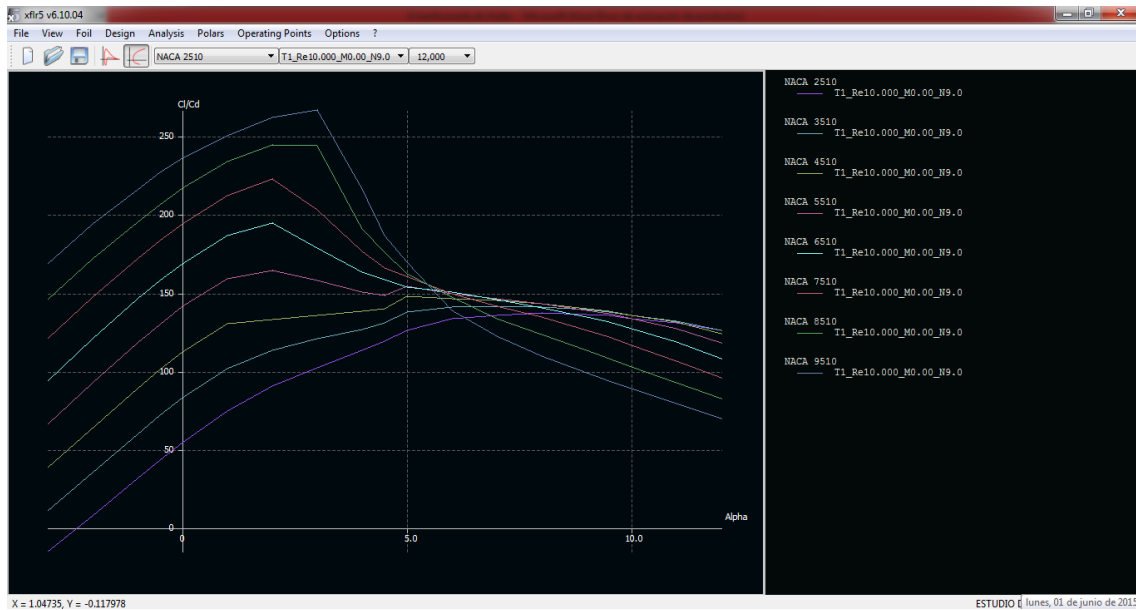


Figura 6.8: Representação do coeficiente C_L/C_D em função de α para os perfis 1-8 gerados por Matlab. Número de Reynolds igual a 1×10^7 .

▪ **Tabela resume da influência da curvatura em função da corda**

Nº de Perfil	Espessura/corda	Curvatura	CL (alpha 0)	CL (alpha 4)	CL (alpha 5)
1	10	2	0,04	0,512	0,6297
2	10	3	0,06	0,532	0,6497
3	10	4	0,08	0,552	0,6697
4	10	5	0,1	0,572	0,6897
5	10	6	0,12	0,592	0,7097
6	10	7	0,14	0,612	0,7297
7	10	8	0,16	0,632	0,7497
8	10	9	0,18	0,652	0,7697
CL (alpha 6)	CL (alpha 7)	CL (alpha 8)	CL (alpha 9)	CD "medio"	
0,7473	0,8646	0,9817	1,0985	0,0065	
0,7673	0,8846	1,0017	1,1185	0,0075	
0,7873	0,9046	1,0217	1,1385	0,0085	
0,8073	0,9246	1,0417	1,1585	0,01	
0,8273	0,9446	1,0617	1,1785	0,011	
0,8473	0,9646	1,0817	1,1985	0,013	
0,8673	0,9846	1,1017	1,2185	0,014	
0,8873	1,0046	1,1217	1,2385	0,015	

Tabela 6.1: Tabela resume dos valores dos coeficientes C_L e C_D para os perfis 1-8. Número de Reynolds igual a 1×10^7 .

6.1.1.3. Seleção do arqueamento:

Analisando os dados obtidos nas gráficas e na tabela se chega até as seguintes conclusões:

- A medida que se aumenta a curvatura do perfil, o coeficiente de sustentação vai aumentando. A diferença do coeficiente de sustentação C_L entre perfis que têm uma diferença de arqueamento em função da corda de 1% é de 0,02. Assim, obtêm-se linhas paralelas entre os diferentes perfis.
- Em referência ao coeficiente de empuxe C_D , a medida que se aumenta o arqueamento do perfil, aumenta o arraste do mesmo. Para ângulos menores de 4 graus, a diferença entre os diferentes perfis não é muito significativa. Tendo valores perto a 0.006
Porém a partir de esse valor, aproximadamente, a diferença dos valores de C_D para cada tipo de perfil vão aumentando, sendo maiores para perfis com um arqueamento maior de 6%. Se tiver que levar em conta o intervalo de trabalho do cata-vento.
- Em referência à relação entre os dois coeficientes, C_L/C_D , o indicador da eficiência do perfil, destacar o fato de que para perfis com **maior arqueamento**, seu valor é maior para ângulos menores de 6 graus aproximadamente. Sem embargo, conforme o ângulo de ataque aumenta, o valor diminui mais bruscamente.

Levando em conta o comportamento dos parâmetros anteriores, considera-se o arqueamento de 6% a melhor opção, a falta de estudar a espessura. O razoamento é o seguinte:

O aumento do coeficiente C_L responde a uma linha com uma pendente de 0.02 por porcentagem de arqueamento. Sendo esse coeficiente o mais importante na hora do desenho, se tenta obter o maior possível sem descuidar o resto dos parâmetros. Assim, pode-se ver o aumento considerável do coeficiente de arraste para ângulos de ataque maiores que 6 graus, um aumento que a partir dos perfis com 6% de arqueamento é mais considerável, ocasionando uma baixa eficiência (relação C_L/C_D) para ângulo maior a 5 graus.

No perfil selecionado, esse descenso não é tão acentuado, contando com uma boa relação C_L/C_D para ângulos de ataque baixos, além de uma estabilidade para ângulos de ataque maiores a 5 graus.

6.1.2. Influencia da espessura

Em primeiro lugar se deve fixar o valor do arqueamento, assim, em vista dos resultados do apartado anterior, se escolhe um valor de arqueamento de 6%, es dizer, o perfil número 5.

Vistas as espessuras empregadas nos perfis pesquisados no apartado anterior, se analizarão os valores dos coeficientes para perfis com espessuras que variam entre 6 e 16 %.

A metodologia de cálculo dos coeficientes C_L e C_D é igual que no apartado anterior “Influencia do arqueamento”. Conseqüentemente, para o coeficiente C_L se emprega o programa de Matlab apresentado no *apartado 3*, e para o cálculo do coeficiente C_D se emprega o coeficiente NACA que corresponda. Na seguinte figura se mostra a semelhança entre o perfil 9 e o NACA 6506.

6.1.2.1. Metodologia

A metodologia empregada neste caso será igual da metodologia empregada para o caso da influencia da espessura. Porém, se precisa fixar o valor do arqueamento selecionado e variar a espessura.

Na seguinte gráfica se pode ver a diferença entre os C_D de cada um dos aerofólios NACA que são semelhantes aos aerofólios gerados por o programa de Matlab.

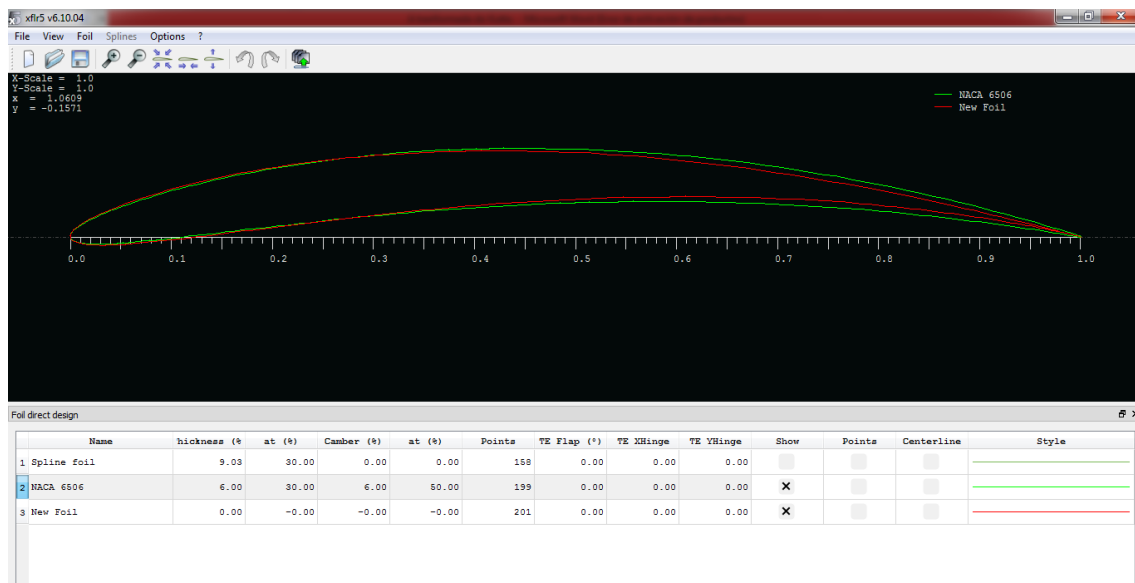


Figura 6.9: Comparativa entre Perfil gerado por Matlab, Perfil 9, e o perfil NACA 6506. Programa XFLR5.

6.1.2.2. Cálculos dos coeficientes para os protótipos de perfil

- Coeficiente de sustentação C_L

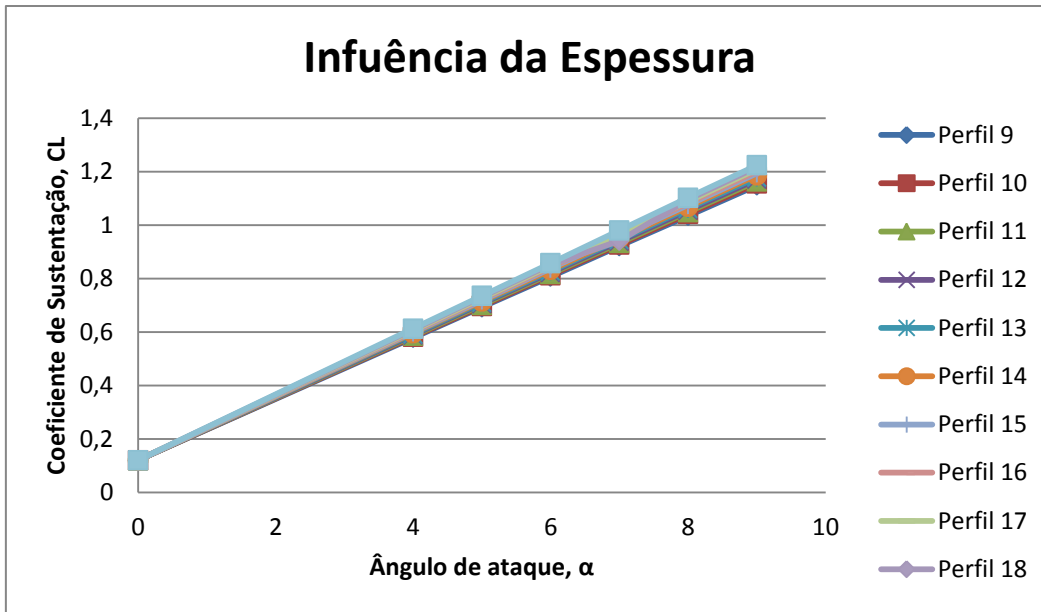


Figura 6.10: Influência da espessura. Representação do coeficiente C_L em função de α para os diferentes perfis. Número de Reynolds igual a 1×10^7 .

- **Coeficiente de arraste C_D**

Na seguinte gráfica se pode ver a diferença entre os C_D de cada um dos aerofólios NACA que são semelhantes aos aerofólios gerados por o programa de Matlab.



Figura 6.11: Representação dos perfis NACA “semelhantes” aos perfis 9-19 gerados por Matlab levados a estudo.

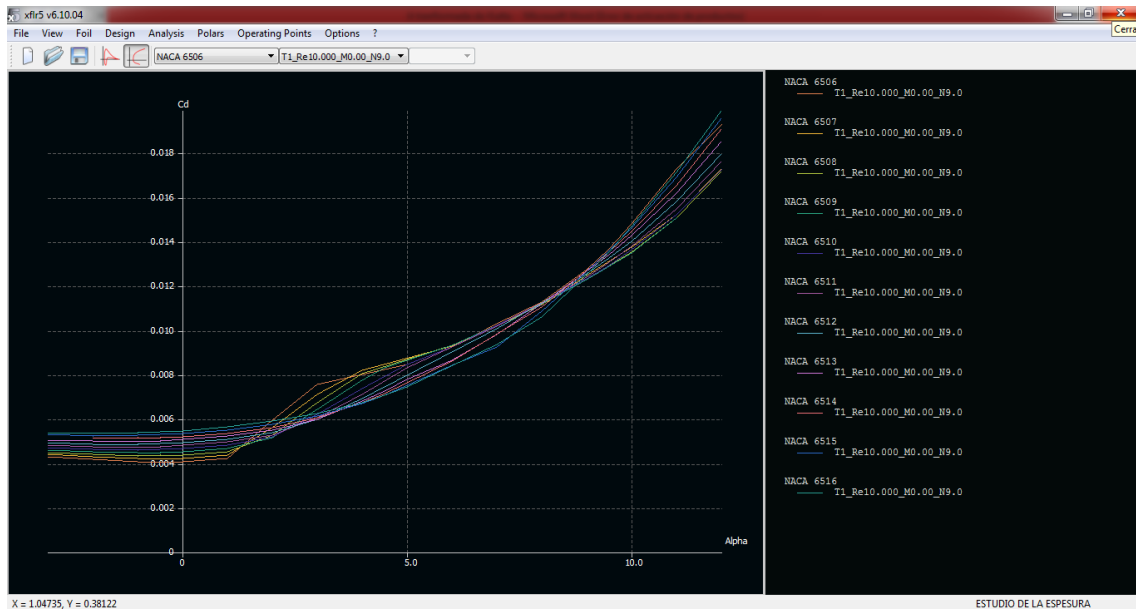


Figura 6.12: Representação dos coeficientes C_D em função do ângulo de ataque α para os perfis NACA “semelhantes” aos perfis 9-19 gerados por Matlab.

Ampliamos a gráfica, para observar melhor o comportamento dos aerofólios entre os ângulos onde mais trabalhara o cata-vento.



Figura 6.13: Representação dos coeficientes C_D em função do ângulo de ataque α para os perfis NACA “semelhantes” aos perfis 9-19 gerados por Matlab. Ampliada. Número de Reynolds igual a 1×10^7 .

- Coeficiente de arraste C_L/C_D



Figura 6.13: Representação dos coeficientes C_L/C_D em função do ângulo de ataque α para os perfis NACA “semelhantes” aos perfis 9-19 gerados por Matlab. Número de Reynolds igual a 1×10^7 .

- Tabela resumo da influencia da espessura.

Nº de Perfil	Espessura /corda	Arqueamento	CL ($\alpha = 0$)	CL ($\alpha = 4$)	CL ($\alpha = 5$)	CL ($\alpha = 6$)	CL ($\alpha = 7$)	CL ($\alpha = 8$)	CL ($\alpha = 0$)	CD "medio"
9	6	6	0,12	0,5785	0,6929	0,8071	0,9211	1,0348	1,1483	0,077
10	7	6	0,12	0,5819	0,6971	0,8121	0,927	1,0415	1,1558	0,076
11	8	6	0,12	0,5853	0,7013	0,8172	0,9328	1,0483	1,1634	0,074
12	9	6	0,12	0,5886	0,7055	0,8222	0,9387	1,055	1,171	0,073
13	10	6	0,12	0,592	0,7097	0,8273	0,9446	1,0617	1,1785	0,07
14	11	6	0,12	0,5954	0,714	0,8323	0,9505	1,0684	1,1861	0,068
15	12	6	0,12	0,5988	0,7182	0,8374	0,9564	1,0752	1,1936	0,067
16	13	6	0,12	0,6021	0,7224	0,8424	0,9623	1,0819	1,2012	0,066
17	14	6	0,12	0,6055	0,7266	0,8475	0,9682	1,0886	1,2088	0,065
18	15	6	0,12	0,6089	0,7308	0,8526	0,941	1,0953	1,2163	0,064
19	16	6	0,12	0,6122	0,735	0,8576	0,98	1,1021	1,2239	0,063

Tabela 6.2: Tabela resume dos valores dos coeficientes C_L e C_D para os perfis 9-19.

6.1.2.3. Seleção da espessura

Analisando os dados obtidos nas gráficas e na tabela se chega até as seguintes conclusões:

- O coeficiente de sustentação C_L tem valores parecidos para os diferentes perfis. A diferença vai aumentando conforme aumenta o ângulo de ataque, mas para valores baixos de α , os perfis têm valores semelhantes.
- Em quanto ao coeficiente de arraste C_D , se pode observar que aquele perfil com baixa espessura tem menores coeficientes de arraste C_D para um ângulo de ataque menor que 1,5 graus aproximadamente. Porém, a partir dos 1,5 graus, os perfis com espessura menor que 10 % sofrem um aumento significativo do coeficiente de arraste. Assim, aqueles perfis menos grossos possuem maiores coeficientes de arraste à medida que se aumenta o ângulo de ataque.

A espessura favorece o fato de que as linhas de corrente se mantenham perto da superfície do perfil, evitando o desprendimento da capa limite.

Mediante da gráfica gerada pelo XFLR5, não se pode dar um valor fiável do coeficiente de arraste, devido ao fato de que a partir dos 1,5 graus aproximadamente os perfis com baixa espessura sofrem um aumento brusco do valor de C_D . Por isso mesmo, na hora de selecionar um perfil, se tem mais em conta a gráfica gerada.

- A gráfica C_L/C_D frente a ângulo de ataque mostra que os perfis com menos espessura tem maiores valores para ângulos α menores de 1,25 graus, mas à medida que aumenta o ângulo de ataque a relação desce consideravelmente.

Levando em conta o comportamento dos parâmetros anteriores, se considera a espessura 12% como a melhor opção. Obtendo assim o perfil **com 6% de arqueamento e 12% de espessura**, é dizer, o **Perfil 15**. O raciocínio é o seguinte:

Para os ângulos de ataque em que o cata-vento trabalha normalmente, as diferentes espessuras não supõem grandes diferenças no coeficiente de sustentação. Assim, o seguinte fator mais importante na hora da eleição é a relação C_L/C_D , onde se pode observar claramente o pouco apropriado de colocar uma baixa espessura já que a partir de 1,25 graus aproximadamente o valor desce rapidamente. Para os valores de espessura maiores, o valor se mantém mais constante no intervalo de trabalho do cata-vento.

O mesmo efeito ocorre com o coeficiente C_D para perfis de baixa espessura. Tem baixos valores para ângulos de ataque menores que 1,5 graus, mas o efeito do desprendimento das linhas de corrente origina que para maiores ângulos α , o coeficiente de empuxe aumente. Assim, interessa colocar uma espessura maior de 10% , sendo um 12% a mais apropriada.

7. Geração da Turbina

Neste apartado se dimensionara a turbina de baixa potencia. Os únicos limites são o fato de que a potencia máxima deve ser de 50 KW e o setor do mercado objetivo da turbina, o setor do auto geração de eletricidade. O último ponto delimita o tamanho da turbina, impondo umas dimensões menores das turbinas de alta geração que possuem diâmetros de hasta 75 metros.

O programa empregado para o desenho da turbina se chama Prop Calc, um programa livre para o cálculo do comportamento dos cataventos, que conta com uma data-base tanto de perfis como de pás. (Schenk). No desenho da turbina o programa leva em conta os seguintes parâmetros:

- Tipo de Perfil da pá.
- Numero de pás.
- Dimensionamento da pá. Geometria, comprimento, corda do perfil ao longo da pá.
- Torção ao longo da pá. Marcada pelo ângulo de passo ou ângulo de pitch.
- Velocidade de rotação.
- Velocidade do vento livre.

Em primeiro lugar, e para estabelecer o tipo de cata-vento que vai ser desenhado, se marca o tipo de eixo da turbina, eixo vertical ou horizontal, e o tipo de gerador que será instalado. Uma vez definido isso, tendo em conta os parâmetros anteriormente enumerados, e considerando algumas pontos que serão explicados na descrição de cada um deles, se variam os parâmetros até obter uma potência menor de 50 kW.

Consequentemente, a continuação se desarrolla o estudo de cada um dos parâmetros obtidos no modelo final da turbina, depois das provas realizadas.

7.1. Tipo de eixo. Eixo Horizontal

O estudo dos modelos de perfis possíveis foram feitos tendo em conta o fato de que a turbina é de **eixo horizontal**. Decisão fundamentada nas vantagens apresentadas na primeira parte do projeto.

- Maior capacidade de geração de eletricidade com condições de ventos baixos, e maior capacidade para trabalhar com velocidades altas dos ventos, em comparação com as turbinas de eixo vertical. O comentado anteriormente tem muita importância na hora de levar a cabo uma instalação nas regiões brasileiras com alto potencial eólico. Onde as velocidades dos ventos variam consideravelmente, tendo uma alta diferença entre as maiores e menores velocidades registradas.

- Mais eficiência que as turbinas de eixo vertical. O fator C_L/C_D é um bom indicativo.
- O desenvolvimento das pás neste tipo de turbinas é maior, questão chave na hora de plantear o projeto inicialmente.

7.2. Tipo de Gerador. Gerador de Indução de velocidade fixa

O tipo de gerador empregado na turbina é um gerador de indução (assíncrono) de velocidade fixa com acoplado diretamente na rede. A parte da turbina que gira pelo efeito do vento fica unida a um rotor de gaiola de esquilo a traves de uma multiplicadora que acopla a velocidade da rede (50Hz ou 60 Hz dependendo do lugar) à velocidade das pás. O bobinado do estator está unido diretamente à rede.

O inconveniente de um rotor de gaiola de esquilo é o fato de que sempre atrai potencia reativa da rede, fato importante em redes fracas jaula já que origina sobrecargas, além de que aumenta o consumo. Por este motivo, precisam-se instalar uns bancos condensadores. A possível instalação de um banco de condensadores provoca a seguintes vantagens:

- Redução de recargo. As companhias elétricas aplicam penalizações ao consumo de energia reativa, para assim provocar a sua eliminação.
- Redução das caídas de tensão.
- Redução da seção dos condutores devido ao fato de reduzir a energia reativa.
- Diminuição das perdas devido ao efeito Joule.
- Aumento da potência disponível na instalação. Sem necessidade de ampliar os cabos, aparelhos e transformadores. Isso acontece pelo fato da redução da intensidade de corrente que se origina depois de melhorar o fator de potencia. (Schneider Eletric)

O motivo fundamental da decisão de colocar um gerador deste tipo é o fato de um preço menor devido a que o sistema é mais simples. Contudo se tem que levar em conta o fato de que as variações de velocidade se traduzem diretamente em aumentos do par, das cargas, o que origina a necessidade de empregar componentes mais robustas. Infelizmente não possuem a vantagem de poder adaptar-se às condições de velocidade do vento.

7.3. Perfil selecionado: Arqueamento 6% e Espessura 12%

Finalmente o perfil selecionado para o desenho da turbina é o **Perfil 15** com um arqueamento em função da corda de 6% e uma espessura ao longo da corda de 12%.

O perfil NACA com parâmetros similares é o NACA 6512, o qual se emprega para o cálculo do coeficiente C_D . Na hora da seleção do perfil, no *apartado 5*, se empregou um número de Reynolds de 1×10^7 . Contudo, realiza-se um estudo do coeficiente C_D empregando um **número de Reynolds de $1,5 \times 10^5$** para o estudo dos coeficientes de arrastes que serão empregados no desenho da turbina.

O coeficiente de sustentação é calculado empregando o programa de Matlab *Perfis Kutta Joukowski*. Na *figura 6.1* se mostram a evolução de C_L em função do ângulo de ataque.

No *Anexo 2* mostram-se os dados gerados no análises tipo Batch sobre o comportamento do perfil NACA 6512. Dados gerados com um *número de Reynolds* de 150.000 entre os intervalos de ângulo de ataque α [-3, 13].

A continuação se apresentam as gráficas dos coeficientes de sustentação e arraste.

- **Coeficiente de sustentação C_L**

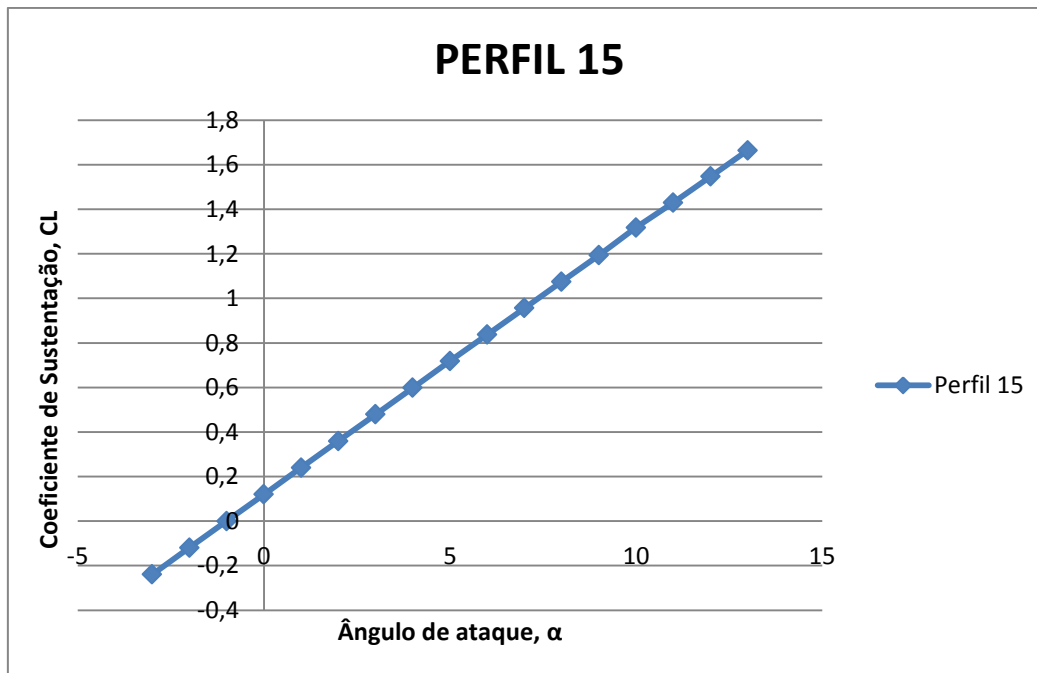


Figura 7.1: Representação do coeficiente C_L em função do ângulo de ataque α .

- **Coeficiente de arraste C_D**

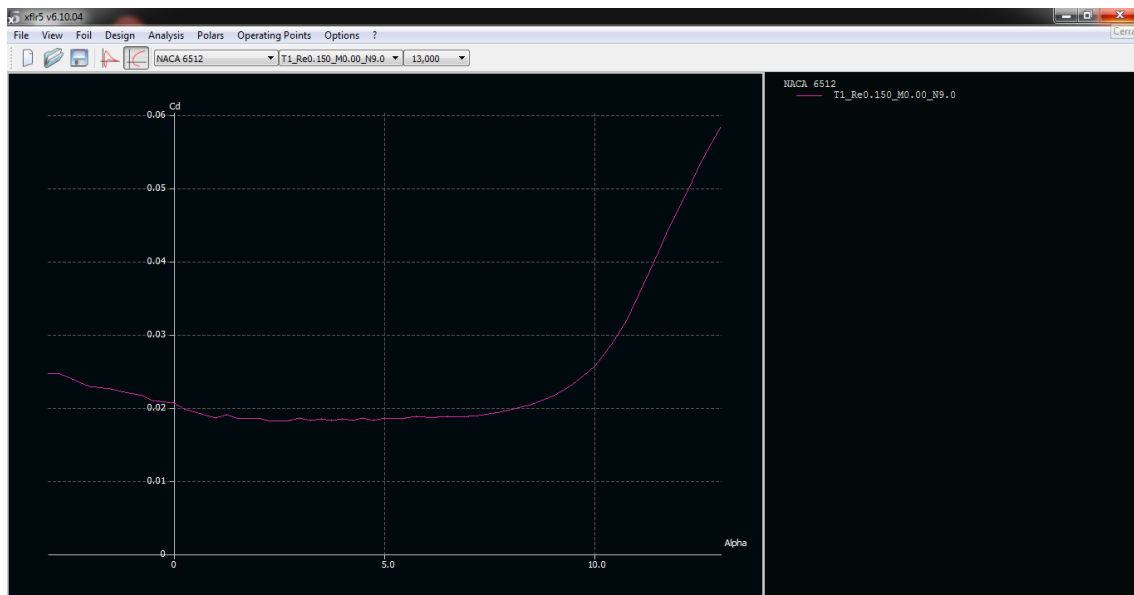


Figura 7.2: Representação do coeficiente C_D em função do ângulo de ataque α . Numero de Reynolds = 150000.

- **Tabela resume com os dados do Perfil 15.**

Ângulo de Ataque, α	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
CL	-0,2392	-0,1195	2,21E-04	0,12	0,2398	0,3595	0,4792	0,5988
CD (NACA 6512)	0,025	0,023	0,022	0,021	0,019	0,019	0,019	0,018

5	6	7	8	9	10	11	12	13
0,7182	0,8374	0,9564	1,0752	1,1936	1,318	1,4296	1,5469	1,6639
0,019	0,019	0,019	0,02	0,022	0,026	0,035	0,047	0,058

Tabela 7.1: Tabela resume dos valores dos coeficientes C_L e C_D do Perfil

7.4. Número de Pás

Tendo em conta a análise feita na primeira parte do projeto, o numero de pás empregadas é de 3 devido principalmente a que possuem o melhor coeficiente de potência do rotor, C_p , em função do coeficiente $\lambda = \frac{\omega R}{V_\infty}$. Sendo ω a velocidade de giro, R o radio da turbina e V_∞ a velocidade do vento livre. Na *figura 6.3* pode-se observar o anteriormente falado.

Além do coeficiente de potência, que marca a capacidade de geração da turbina, se deve ter em conta o fator do custo das pás. Geralmente o custo das pás pode chegar a alcançar um 30% do custo total da turbina. O preço da pá depende de vários fatores, como o material empregado na sua fabricação, atualmente o mais utilizado é a fibra de vidro ou fibra de carbono impregnado com resina epoxy, o custo do transporte, a dificuldade de fabricação do perfil.

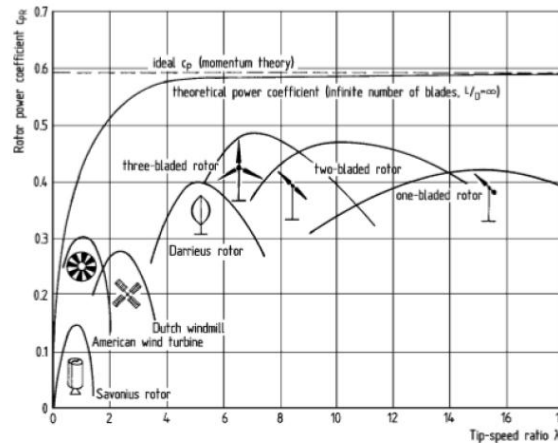


Figura 7.3: Variação do coeficiente C_p em função do coeficiente λ

7.5. Dimensionamento da pá

A pá empregada no desenho da turbina tem a forma apresentada na figura ajunta. Aos 2/3 da pá, a geometria da pá é uma elipse cujo semieixo maior tem um comprimento de 1/10 o comprimento da pá. A base da pá, a parte que fica unida ao centro da turbina, tem um comprimento de 1/3 o comprimento do eixo menor da elipse. (ISMAIL K. A.)

Levando em conta a aplicação da turbina desejada, turbina destinada ao autoconsumo, se define um comprimento das pás de 4 metros. Um alto valor de comprimento, tendo em conta que a turbina girará com altas velocidade de rotação, pode originar velocidades perto da ponta da pá que superem o limite estabelecido do número de *Mach*.



Figura 7.4: Representação da pá empregada no desenho da turbina.

7.5.1. Torção ao longo da pá.

No *apartado 4.1*, se analisou o fato de que o ângulo de ataque muda ao longo da pá pelo efeito das baixas velocidades tangenciais na base, o que origina uma velocidade total com um alto ângulo de inclinação φ . Consequentemente, se precisa mudar o ângulo de posição do perfil, tentando trabalhar a maior parte do tempo com o ângulo de ataque mais favorável, para obter um coeficiente de sustentação C_L maior. Se selecionar o ângulo de ataque a partir do qual se obter o coeficiente C_L igual a um $0.9C_{L_{max}}$. Assim se evitará as oscilações da pá que acontecem quando esta produz o $C_{L_{max}}$, oscilações que terminam gerando fadiga mecânica.

Devido ao fato de que a representação do coeficiente C_L em função de α é uma linha reta. Para calcular qual é o ângulo de ataque para o qual se obtém um $C_L = 0.9 C_{L_{max}}$, se emprega a gráfica $C_L - \alpha$ do perfil NACA 6512.

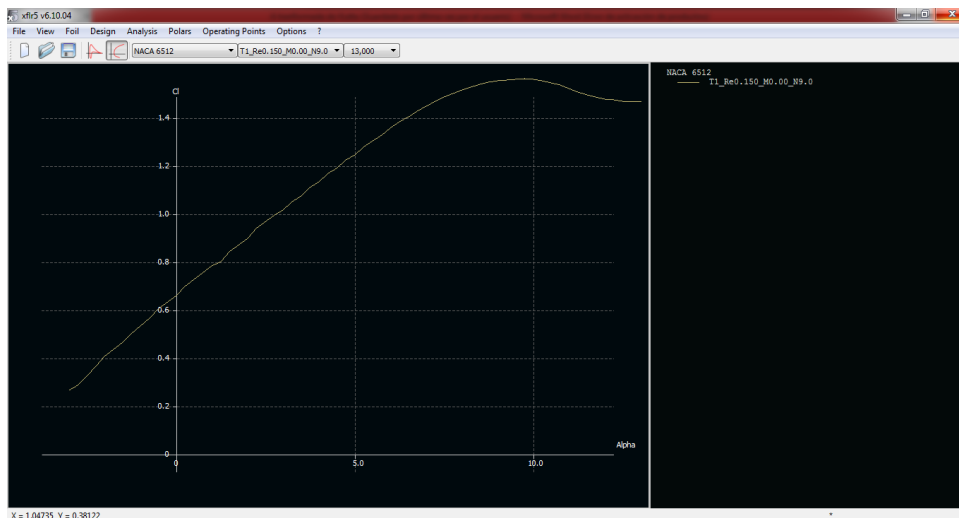


Figura 7.5: Representação C_L em função de α . Perfil NACA 6512. Numero de Reynolds de 150.000.

O ângulo a partir do qual se obtém um $0.9C_L$ é **9.5 graus**, obtendo um $C_L = 1,560$. Assim, para o Perfil 15, com um ângulo de ataque de 9.5 graus, se obtém um $C_L = 1,1936$.

Na figura seguinte podem-se observar as os ângulos gerados pelas velocidades e a posição da pá.

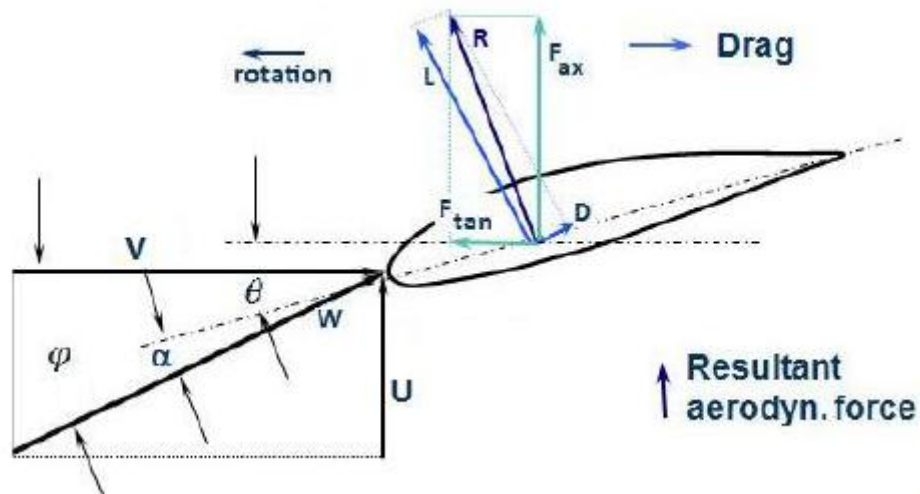


Figura 7.6: Representação das velocidades, ângulos e forças que intervierem ao redor do perfil.

V : velocidade de rotação. $V = \omega \times$ ratio da pá

U : velocidade do vento livre.

W : velocidade resultante.

θ : ângulo de pitch

α : ângulo de ataque

φ : ângulo de inclinação.

Observando a *Figura 6.5*, vemos que o ângulo de ataque obtém-se mediante a relação $\alpha = \varphi - \theta$. Onde o ângulo de inclinação depende diretamente das velocidades de rotação e do vento livre como se comentará posteriormente. Devem-se evitar ângulos de pitch negativos pelo fato de que a sua fabricação resulta impossível mediante as técnicas tradicionais. Assim procede-se ao calculo das mesmas.

- **Velocidade do vento livre**

Em primeiro lugar, precisa-se obter a velocidade media do vento. Poderia pensar em colocar a velocidade media do pais, contudo, se colocará a velocidade media da região onde vai ser instalada a turbina. A região seleccionada para a instalação da turbina é o Nordeste de Brasil. Esta região tem uma faixa de aproximadamente 100 km, tem uma zona costeira muito ampla onde os ventos são controlados pelos alísios de este e pelas

brisas terrestres marinas. Consequentemente, os ventos alcançam valores entre 5 m/s e 7,5m/s na parte norte e entre 6m/s a 9m/s na parte sul. Nessa região, os ventos são mais rápidos pelo fato de que a vegetação é mais escassa e os solos são mais uniformes, o que faz com que a temperatura do solo seja maior e, portanto, aumente a diferença de temperaturas entre a parte terrestre e a marinha, originando maiores brisas marinas.

Velocidades do vento maiores geram ângulos de inclinação maiores, evitando obter ângulos negativos quando se trabalha com altas velocidades de rotação. Contudo, é um dado imposto pelo médio aonde a turbina vai-se instalar. Consequentemente, se emprega uma velocidade do vento livre de **7 m/s**.

▪ **Velocidade de rotação da turbina.**

A velocidade de rotação da turbina é constante, e marcada pela rede elétrica do país, 50 Hz (3000 r.p.m) no caso de Brasil. Essa velocidade será modificada a través da multiplicadora com uma relação de 1:20, em caso de colocar um gerador síncrono de 2 polos, para obter uma velocidade de rotação das pás de 150 r.p.m. No caso de ter um gerador de 4 polos, a velocidade de rotação seria da metade, 75,5 r.p.m.

Um fato importante é que na ponta da pá o numero de *Mach* seja menor que 0.25, tal e como se mostra na tabela seguinte. O valor limite do numero de *Mach* na ponta da pá foi selecionado tendo em conta os valores empregados nos desenhos atuais do mercado eólico, por exemplo, o aeorogerador *AW-70/1500* de alta potencia da empresa *ACCIONA*, 1.500 kW de potencia nominal. Neste cata-vento de diâmetro 70 metros, a velocidade nominal na ponta da pá é 74,1 m/s.

Velocidade de rotação (r.p.m)	150
Velocidade tangencial na ponta da pá (m/s)	62,83185
0,25 * M (m/s)	85,75

Tabela 7.2: Tabela comprovação da velocidade na ponta da pá.

Além do numero de *Mach*, um aumento da velocidade de rotação gera ângulos de inclinação baixos, chegando gerar ângulos de pitch negativos ao longo da pá. Algo totalmente indesejável, é que em esses casos, acontece perto da borda da pá.

Finalmente, para cada seção ao longo da pá, que tem velocidade de rotação diferente, e por tanto diferentes ângulos de pitch, se obtém o ângulo de inclinação necessário para obter o ângulo de ataque desejado.

Apresenta-se uma tabela com os dados calculados para o cálculo da geometria da pá:

% da corda	Corda	Velocidade do vento, U (m/s)	Velocidade tangencial, V (m/s)	Ângulo de inclinação ϕ (graus)	Ângulo de pitch θ (graus)
0%	0,133333333	7	0		
10%	0,173333333	7	6,283185307	48,08891714	41,58891714
20%	0,213333333	7	12,56637061	29,11965662	22,61965662
30%	0,253333333	7	18,84955592	20,37305983	13,87305983
40%	0,293333333	7	25,13274123	15,56364452	9,063644515
50%	0,333333333	7	31,41592654	12,56127384	6,061273841
60%	0,373333333	7	37,69911184	10,51892785	4,018927847
66,60%	0,386666667	7	39,79350695	9,97672165	3,47672165
	0,397994975	7	41,88790205	9,487184994	2,987184994
70%	0,391918359	7	43,98229715	9,043061079	2,543061079
		7	46,07669225	8,638357516	2,138357516
		7	48,17108736	8,26808444	1,76808444
80%	0,366606056	7	50,26548246	7,928054672	1,428054672
		7	52,35987756	7,61472954	1,11472954
		7	54,45427266	7,325098711	0,825098711
90%	0,285657137	7	56,54866776	7,056585653	0,556585653
		7	58,64306287	6,806972581	0,306972581
		7	60,73745797	6,574340401	0,074340401
100%	0	7	62,83185307	6,357020276	-0,142979724

Tabela 7.3: Torção da pá.

8. Comportamento da Turbina Gerada

Neste apartado, se realizará o cálculo da potencia gerada, empuxo, rendimento, e coeficiente de potência, da turbina que possui as características geométricas descritas no apartado anterior, para diferentes velocidades do vento. O programa empregado é o Prop Calc, programa no qual o usuário pode colocar as dimensões tanto das pás como do perfil. Além disso, para cada perfil, tem-se a possibilidade de colocar os valores do coeficiente de sustentação e do coeficiente de empuxo medidos no túnel de vento para cada ângulo de ataque.

O programa precisa de valores dos coeficientes em função do ângulo de ataque, para dois números de Reynolds diferentes. No *apartado 6.2*, se mostraram os valores mencionados para um numero de Reynolds de 150.000. Assim, precisa-se de outros valores dos coeficientes para outro numero de Reynolds. Tendo em conta o fato de que as equações de *Kutta Joukowski* empregadas para o cálculo de C_L , não têm em conta o numero de Reynolds, precisa-se de uma aproximação para o calculo dos coeficientes em outras condições do fluido.

Por isso mesmo, os cálculos dos coeficientes do perfil gerado por Matlab para outro numero de Reynolds, neste caso é o valor 100.000, são feitos da forma seguinte.

1. Calculam-se os valores do C_L do perfil NACA 6512 para os valores do numero de Reynolds de 150.000 e 100.000.
2. Calcule-se a diferença entre os dados do coeficiente C_L obtidos para cada ângulo de ataque, nos dois valores do numero de Reynolds.
3. Finalmente, para cada ângulo de ataque, soma-se essa diferença aos dados de C_L obtidos mediante a equação de *Kutta Joukowski*. Os dados obtidos, serão os dados colocados no programa Prop Calc para um valor de Reynolds de 150.000.
4. Finalmente, pode-se observar na gráfica e nos dados gerados pelo programa XFLR5, que a diferença dos C_L até o ângulo de 5 graus é de aproximadamente 0.7. Depois, a diferença va diminuindo ate se igualar em 9 graus. Contudo, pode-se observar a diferença exata no programa. No *Anexo 3* se mostram os dados exatos do valor de C_L .

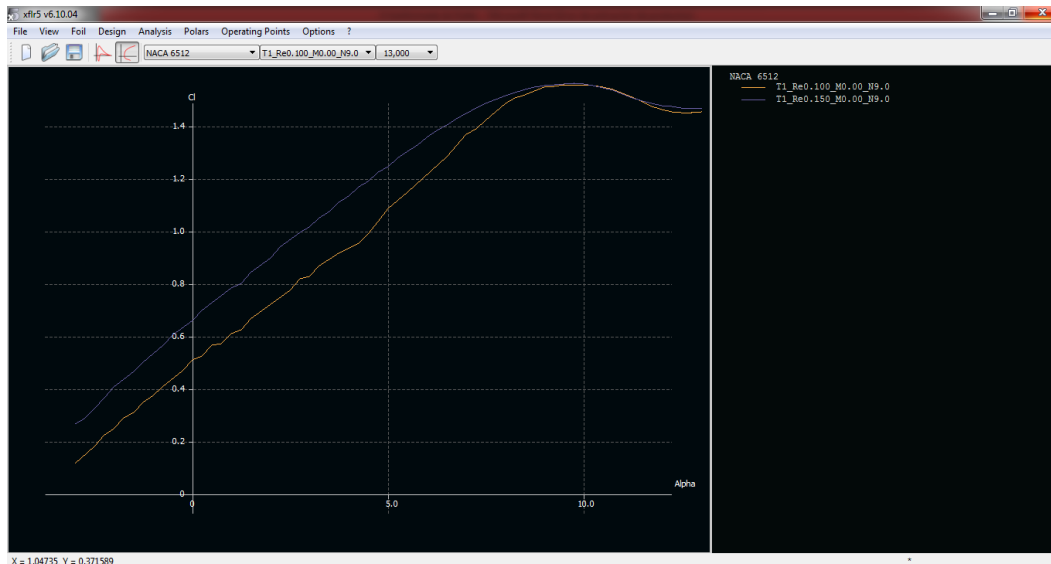


Figura 8.2: Representação do coeficiente de sustentação C_L em função do ângulo de ataque para valores do número de Reynolds de 100.000 e 150.000. Perfil NACA 6512.

5. Finalmente se mostram os dados numa tabla resumem.

Ângulo de Ataque, α	Nº Reynolds	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
CL Perfil 15	150000	-0,2392	-0,1195	0,002	0,12	0,2398	0,3595	0,4792	0,5988
CD (NACA 6512)	150000	0,025	0,023	0,022	0,021	0,019	0,019	0,019	0,018
CD (NACA 6512)	100000	0,035	0,034	0,034	0,033	0,033	0,034	0,035	0,035
CL (NACA 6512)	100000	0,117	0,247	0,373	0,51	0,609	0,721	0,828	
CL (NACA 6512)	150000	0,267	0,408		0,659	0,784	0,898	1,014	
Diferença CL NACA 6512	150000-100000	0,15	0,161		0,149	0,175	0,177	0,186	
CL Perfil 15	100000	-0,3892	-0,2805		-0,029	0,0648	0,1825	0,2932	

5	6	7	8	9	10	11	12	13
0,7182	0,8374	0,9564	1,0752	1,1936	1,318	1,4296	1,5469	1,6639
0,019	0,019	0,019	0,02	0,022	0,026	0,035	0,047	0,058
0,033	0,032	0,029	0,026	0,026	0,029	0,036	0,05	0,06
1,087		1,367	1,485	1,548	1,557	1,525	1,461	1,454
1,245	1,355	1,447	1,515	1,552	1,558	1,52	1,478	1,467
0,158		0,08	0,03	0,004	0,001	-0,005	0,017	0,013
0,5602		0,8764	1,0452	1,1896	1,317	1,4346	1,5299	1,6509

Tabela 8.1: Tabela resume dos valores dos coeficientes C_L e C_D do Perfil

8.1. Resultados. Potência gerada

A continuação procede-se ao cálculo da potencia gerada pela turbina descrita nos apartados anteriores. Mostra-se nos seguintes pontos a metodologia de cálculo.

1. Em primeiro lugar gera-se um novo perfil, chamado Perfil 15. Coloca-se os dados dos valores do coeficiente de sustentação C_L e coeficiente de arraste C_D em função do ângulo de ataque α , para cada número de Reynolds, como se mostra na *figura 7.2*. Nos comentários se especificam as propriedades que deram forma ao perfil gerado, um valor de arqueamento de 6% e uma espessura em função da corda 12%.

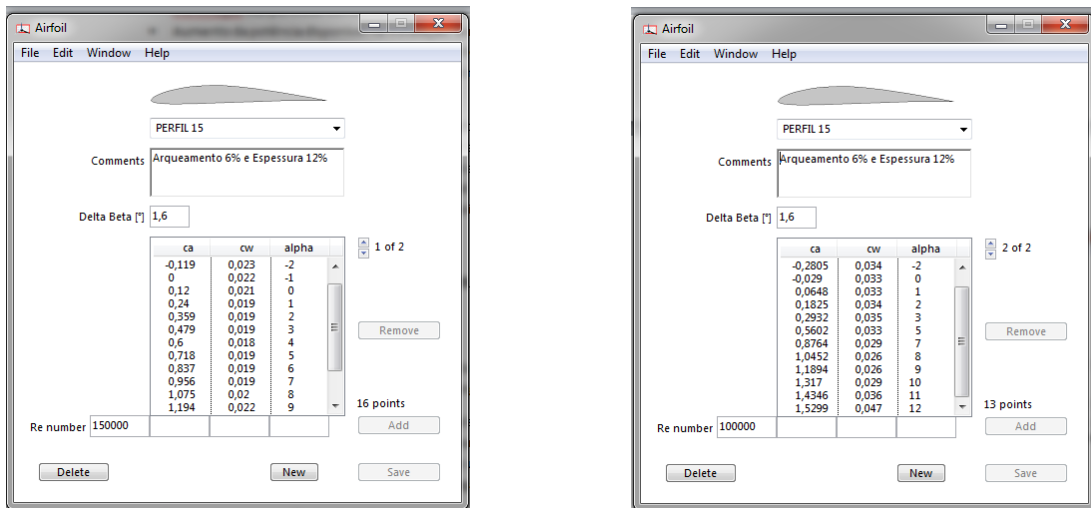


Figura 8.3: Perfil 15. Valores dos coeficientes de sustentação e arraste em função do ângulo de ataque. Números de Reynolds de 150.000 e 100.000.

2. Na interfase apresentada na *figura 7.3* colocam-se os dados do comprimento da pá, para cada seção ao longo da pá, colocam-se os comprimentos das cordas (*apartado 6.4*), além dos ângulos de pitch ou ângulo de passo.

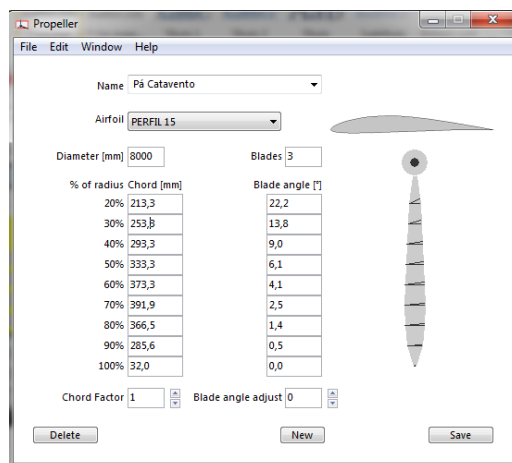


Figura 8.4: Geometria da pá.

- Finalmente, na interface principal se apresenta, para a velocidade de rotação selecionada, a gráfica que mostra a variação da potencia gerada e o empuxo em função da velocidade livre do vento.

Pode-se observar como a potência vai diminuindo lentamente conforme aumenta a velocidade do vento livre, desde uma potência de **15 kW** para uma velocidade do vento de 1 m/s, até **14,5 kW** para uma velocidade de 2,1 m/s. Porém, o empuxo diminui rapidamente com o crescimento da velocidade do vento.

Importante: O programa gera dados da potencia e força de empuxe para o intervalo de 1-2,1 m/s. O limite imposto pelo próprio programa Prop Calc, impede o calculo da potência para outras velocidades do vento. Algum limite, como o numero máximo de Mach, pode ser o responsável. Para obter dados numa faixa maior, no *apartado 7.2.2* se modificarão os parâmetros de desenho dos ângulos de torção ao longo da pá.

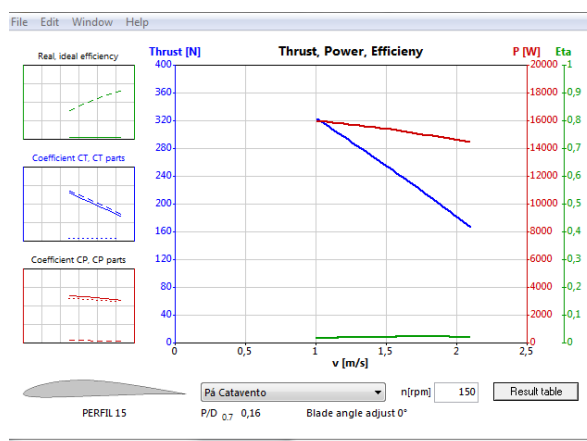


Figura 8.5: Resultados da potencia e empuxo em função da velocidade do vento livre. Velocidade de rotação de 150 r.p.m.

9. Desenho Modificado. Segundo Protótipo

9.1. Variação dos Parâmetros

No desenho da turbina do *apartado 7* se seguiram os passos de desenho, tendo em conta os limites estabelecidos para cada um dos parâmetros. Como por exemplo, uma velocidade de rotação fixa, a velocidade máxima na ponta, o comprimento das pás acorde ao tipo de turbina desejada, o ângulo de ataque desejado para cada uma das seções. Contudo, os dados obtidos pelo programa Prop Calc, só mostravam resultados num intervalo de velocidades do vento muito pequeno.

Para superar o inconveniente, imposto pelo programa, do pequeno intervalo de estudo de velocidades do vento, se modificam alguns parâmetros. Mantem-se os seguintes parâmetros:

- Eixo horizontal.
- Gerador síncrono de velocidade fixa.
- Tipo de Perfil. Perfil 15.
- Número de pás.

O programa Prop Calc, mostra a necessidade de colocar valores de ângulos de pitch altos ao longo da pá, para assim gerar dados em um intervalo de velocidades de vento maior. Por este motivo, os valores do ângulo de torsão serão modificados, impedindo que as seções ao longo da pá trabalhem com o ângulo de ataque ótimo. A continuação se apresentam os parâmetros modificados:

- Geometria das pás.
- Velocidade do vento livre: Coloca-se uma velocidade de vento livre para o estudo de **6 m/s**.
- Velocidade de rotação: Como foi aclarado anteriormente, a velocidade de rotação da turbina é constante, e marcada pela rede elétrica do país, 50 Hz (3000 r.p.m) no caso de Brasil. Essa velocidade será modificada a través da multiplicadora com uma relação de 1:15, em caso de colocar um gerador síncrono de 2 polos, para obter uma velocidade de rotação das pás de 200 r.p.m. No caso de ter um gerador de 4 polos, a velocidade de rotação seria da metade, 100 r.p.m.

Velocidade de rotação (r.p.m)	200
Velocidade tangencial na ponta da pá (m/s)	83,7758041
0,25 * M (m/s)	85,75

Tabela 9.1: Tabela comprovação da velocidade na ponta da pá.

- Ângulo de torção: O ângulo de pitch será modificado pelo fato de que o programa Prop Calc gera dados para um intervalo de velocidades do vento muito pequeno no caso os ângulos de torção sejam baixos. A continuação se mostram os ângulos de pitch teóricos.

% da corda	Cuerda	Velocidad del viento, U (m/s)	Velocidad tangencial, V (m/s)	Ângulo de inclinação ϕ (graus)	Ângulo de pitch θ (graus)
0%	0,133333333	6	0		
10%	0,173333333	6	8,37758041	35,61013395	29,11013395
20%	0,213333333	6	16,75516082	19,70237592	13,20237592
30%	0,253333333	6	25,13274123	13,42704176	6,927041758
40%	0,293333333	6	33,51032164	10,15120398	3,651203978
50%	0,333333333	6	41,88790205	8,15156763	1,65156763
60%	0,373333333	6	50,26548246	6,806972581	0,306972581
66,60%	0,386666667	6	53,05800926	6,451814415	-0,048185585
	0,397994975	6	55,85053606	6,131745009	-0,368254991
70%	0,391918359	6	58,64306287	5,841826452	-0,658173548
		6	61,43558967	5,578002986	-0,921997014
		6	64,22811647	5,336913001	-1,163086999
80%	0,366606056	6	67,02064328	5,115747012	-1,384252988
		6	69,81317008	4,912139054	-1,587860946
		6	72,60569688	4,724082679	-1,775917321
90%	0,285657137	6	75,39822369	4,549865309	-1,950134691
		6	78,19075049	4,388016441	-2,111983559
		6	80,98327729	4,237266411	-2,262733589
100%	0	6	83,7758041	4,096513295	-2,403486705

Tabela 9.2: Torção da pá.

A desvantagem principal de aumentar o ângulo de pitch é o fato de que as seções vão ter que suportar arraste maiores, podendo-se ocasionar uma ruptura. Esse efeito é mais perigoso perto da ponta das pás, já que a espessura é menor. Na *figura 8.1* se mostram os ângulos de pitch para cada seção da pá.

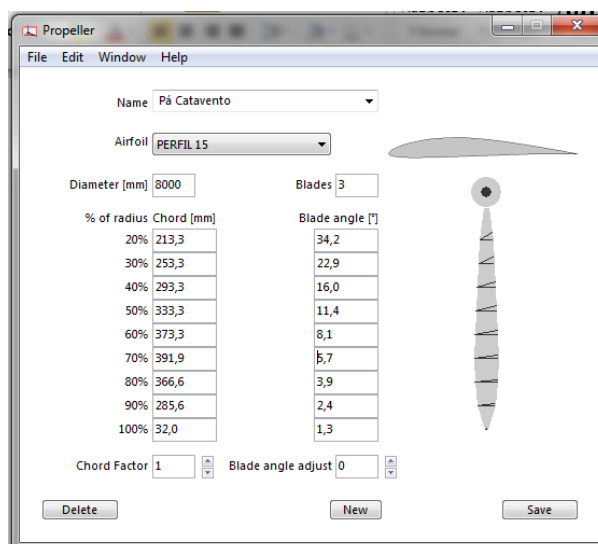


Figura 9.1: Geometria das pás. Interface Prop Calc.

9.2. Resultados

Pode-se observar como a potência vai diminuindo lentamente conforme aumenta a velocidade do vento livre. Porém, o empuxo diminui rapidamente com o crescimento da velocidade do vento. O programa só gera dados até uma velocidade do vento livre de 7,5 m/s, contudo, como a velocidade media da região a estudar é de 6 m/s, podem-se considerar resultados aceitáveis.

Para 6,1 m/s, de velocidade do vento livre, valor perto à velocidade media, se obtém uma potencia **43957.7 kW**. O aumento de potência em relação ao primeiro desenho vem pelo aumento da velocidade de rotação e os ângulos de pitch. Como foi comentado anteriormente, comparando as duas gráficas, pode-se ver a aumento do arraste para uma mesma velocidade do vento.

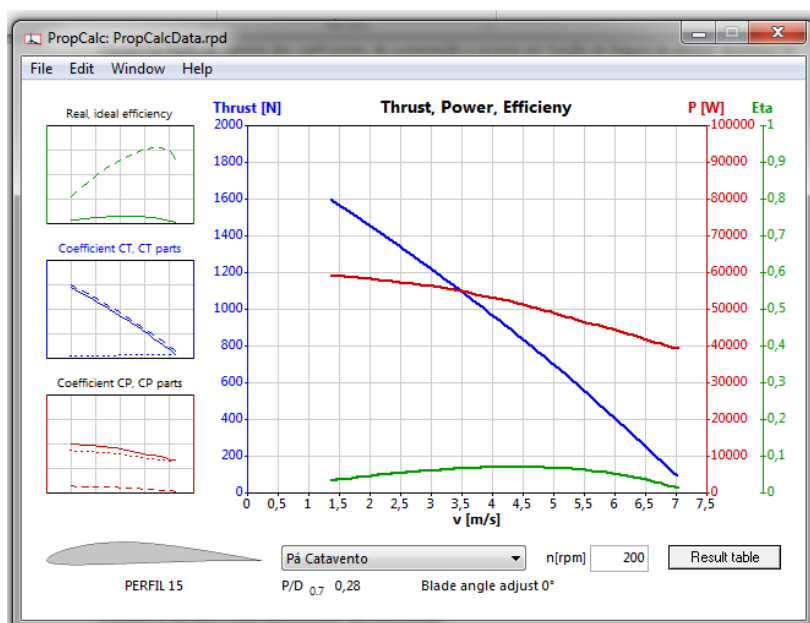


Figura 9.2: Resultados da potencia e empuxo em função da velocidade do vento livre. Velocidade de rotação de 200 r.p.m.

J	CT	CP	Eta	Thr [N]	P [W]	v [m/s]	Re 0.7
0.05	0.0288	0.0401	0.04	1.604.099	59666.1	1.3	1573212
0.06	0.0276	0.0398	0.04	1.539.228	59171.6	1.6	1573415
0.07	0.0264	0.0395	0.05	1.472.849	58657.4	1.9	1573660
0.08	0.0252	0.0391	0.05	1.404.613	58128.6	2.2	1573945
0.10	0.0239	0.0387	0.06	1.333.140	57563.1	2.5	1574272
0.11	0.0226	0.0383	0.06	1.261.467	56999.5	2.8	1574640
0.12	0.0213	0.0379	0.07	1.188.448	56324.0	3.1	1575049
0.13	0.0200	0.0372	0.07	1.114.681	55360.5	3.4	1575499
0.14	0.0186	0.0366	0.07	1.038.956	54355.5	3.7	1575989
0.15	0.0172	0.0359	0.07	961.557	53323.4	4.0	1576521
0.16	0.0158	0.0352	0.07	881.497	52268.4	4.3	1577093
0.17	0.0144	0.0343	0.07	800.953	50980.8	4.6	1577707
0.18	0.0129	0.0333	0.07	719.486	49541.8	4.9	1578361
0.20	0.0114	0.0324	0.07	634.827	48095.3	5.2	1579056
0.21	0.0098	0.0314	0.07	547.840	46633.4	5.5	1579791
0.22	0.0082	0.0305	0.06	455.381	45415.8	5.8	1580567
0.23	0.0065	0.0296	0.05	365.087	43957.7	6.1	1581384
0.24	0.0049	0.0285	0.04	275.408	42421.6	6.4	1582241
0.25	0.0033	0.0275	0.03	182.993	40861.9	6.7	1583139
0.26	0.0015	0.0265	0.02	86.165	39445.9	7.0	1584077

Tabela 8.2: Resultados numéricos da potencia e empuxo em função da velocidade do vento livre. Velocidade de rotação de 200 r.p.m.

Observa-se como os parâmetros são calculados em função do coeficiente de avance, ou também denominado como coeficiente de passo efetivo. A sua relação da uma ideia do rápido que avança o vento em relação à velocidade de giro.

$$J = \frac{V_s}{n_{oD} \cdot D} = \frac{\pi V_s}{\omega R}$$

Sendo,

V_s : velocidade do vento livre
 n_{oD}, ω : velocidade de rotação
 D : diâmetro da turbina

10. Conclusões

10.1. Desenvolvimento do Perfil

A correta eleição do perfil é um fato chave no desenvolvimento da turbina. O método de geração empregado, mediante a teoria de *Kutta Joukowski*, tem a vantagem dos baixos níveis de ruído, um problema cada vez maior.

Nos resultados deve-se tido em conta às aproximações feitas na hora de calcular o coeficiente de arraste. Além disso não se teve em conta as perdas devido ao desprendimento da capa limite, o que provoca que o coeficiente de sustentação C_L diminui para altos ângulos de ataque.

Pôde-se observar o fato de que desenhos mais sofisticados oferecem melhores coeficientes de sustentação e arraste que aqueles perfis empregados na atualidade baseados em teorias que datam do ano 1932, os NACA de quatro dígitos. Contudo, as facilidades no processo de fabricação geram que ainda segam-se utilizando estes tipos de perfis.

10.2. Desenvolvimento da Turbina

Analisando o desenvolvimento do perfil, uma das conclusões é o fato de que as diferentes condições de trabalho para cada seção da pá indicam que a melhor opção seria empregar diferentes perfis ao longo da mesma. Contudo, a elevada complexidade de

fabricação e os custos derivados do processo impõem a utilização de um tipo de perfil para toda a pá.

O limite do comprimento das pás origina o fato de que para poder gerar valores de potência que rentabilizem o investimento, precisa-se aumentar a velocidade de rotação, o que provoca que para trabalhar com o ângulo de ataque desejado, o ângulo de pitch seja pequeno, podendo chegar até ângulos negativos. Os ângulos negativos são indesejáveis pelo método de fabricação, conseqüentemente, deve-se estabelecer um compromisso entre os parâmetros de desenho que intervierem.

11. Resume da Metodologia de Cálculo

Neste apartado, resume-se a metodologia empregada no desenho da turbina. Como se comentou no *apartado 7* os únicos limites são o fato de que a potencia máxima deve ser de 50 KW e o setor do mercado objetivo da turbina, o setor do auto geração de eletricidade. O último ponto delimita o tamanho da turbina, impondo umas dimensões menores das turbinas de alta geração que possuem diâmetros de hasta 75 metros.

1. Em primeiro lugar, deve-se estudar o marco de trabalho do cata-vento, é dizer, o potencial eólico da região onde vai ser instalada, calculando a velocidade media do vento livre, assim como a frequência da rede.
2. Com referência ao desenho, em primeiro lugar, tendo em conta a prioridade dos parâmetros que marcam o comportamento de um perfil, se selecciona o perfil mais adequado para a geração da pá. Os parâmetros principais que determinam o funcionamento do perfil são o coeficiente de sustentação C_L , coeficiente de arraste C_D , a relação entre eles C_L/C_D , e o coeficiente de momento C_m . Neste caso o objetivo é empregar perfis gerados pela teoria de *Kutta Joukowski*, conseqüentemente, precisam-se ajustar os parâmetros que marcam a geometria do perfil.
3. Uma vez selecionado o perfil, fixa-se o numero de pás e se dimensiona a forma das mesmas. Em primeiro lugar, leva-se em conta o fato de que a turbina será instalada em áreas isoladas, distantes da rede elétrica, ou tendo como objetivo a geração de energia elétrica para o autoconsumo. Conseqüentemente, se marca o valor do comprimento das pás, a partir do qual se definem os parâmetros de desenho que definem a geometria das mesmas.
4. Finalmente, se estabelece a velocidade de rotação da turbina, velocidade limitada pelo fato de que a velocidade tangencial, na ponta da pá, não pode superar $0,2 M$.
5. A velocidade de rotação da turbina, junto com a velocidade do vento livre, determina a velocidade resultante que atua em cada seção do perfil. Conseqüentemente, para

conseguir que o perfil de cada seção atue com o ângulo que gera um $C_p = 0,9C_{p_{max}}$, se determina o ângulo de pitch. Esta variação de ângulo para cada seção origina a torção da pá ao longo da mesma.

6. Verifica-se que a potência obtida cumpre com o objetivo imposto ao principio do projeto.
7. Em caso no cumprir, com as especificações iniciais, modificar os parâmetros de desenho tendo em conta os limites.

12. Anexos

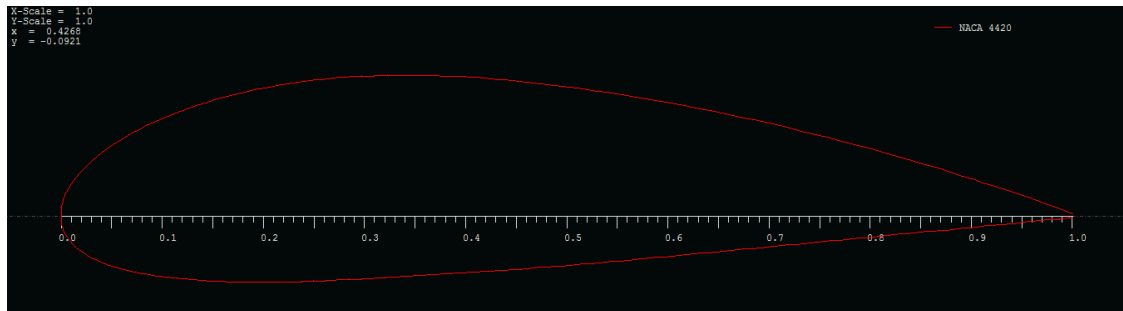
12.1. Anexo1. Perfis empregados para baixos números de Reynolds

- NACA 4420

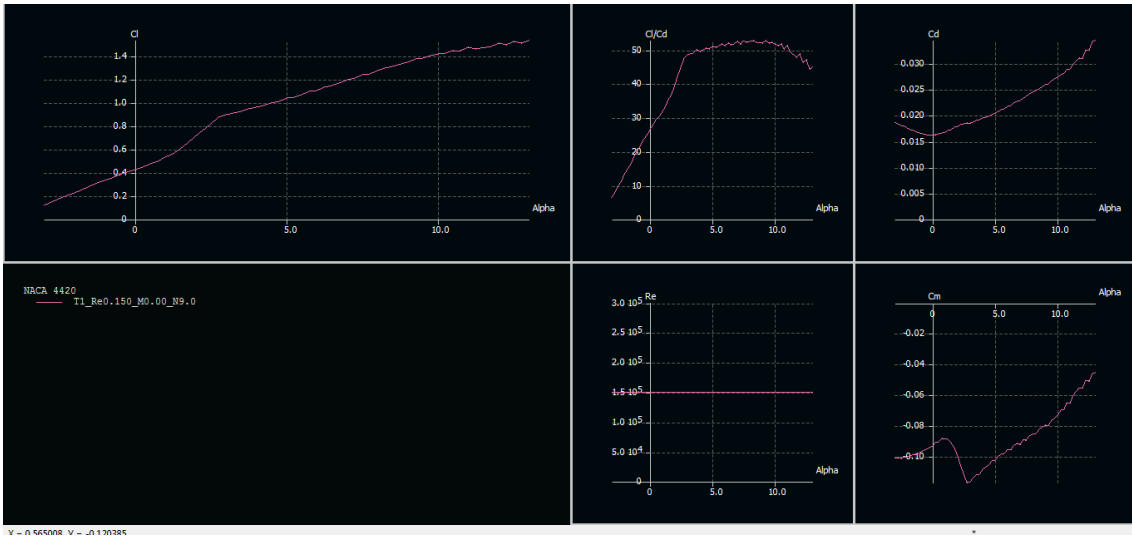
Máxima espessura: 20%.

Máximo arqueamento: 4%. Localizado: 40%.

Desenho do Perfil:



Polares:

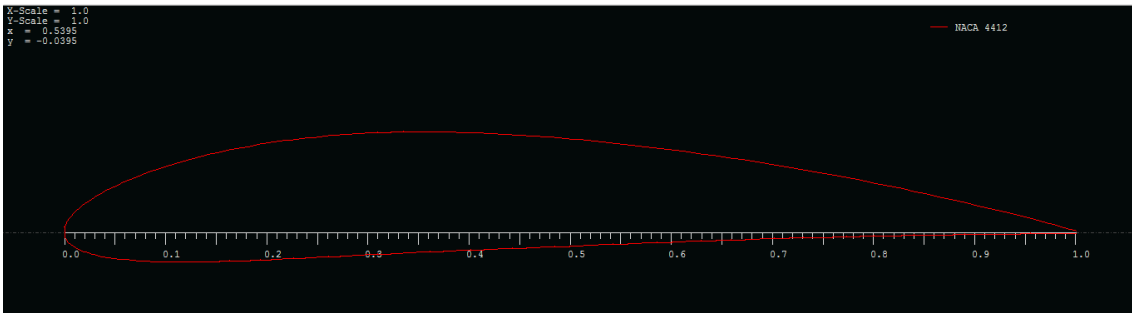


- NACA 4412

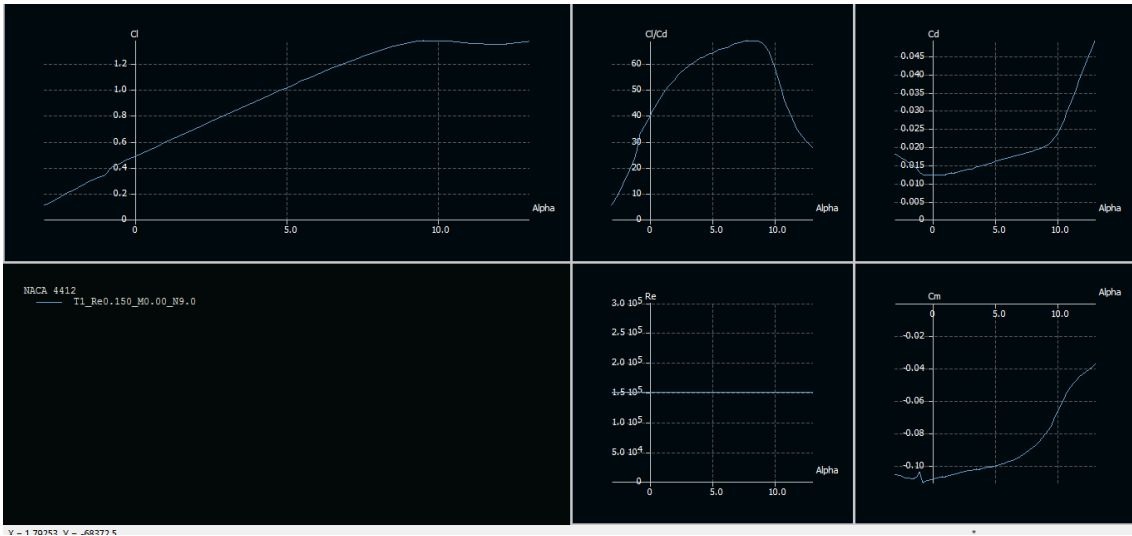
Máxima espessura: 12%.

Máximo arqueamento: 4%. Localizado: 40%.

Desenho do Perfil:



Polares:

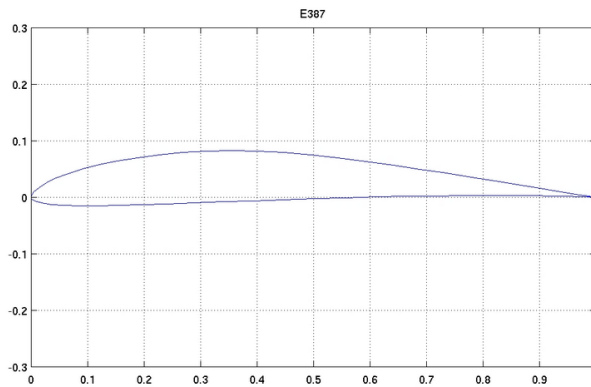


- E-387

Máxima espessura: 9.1% Localizada: 31.1%.

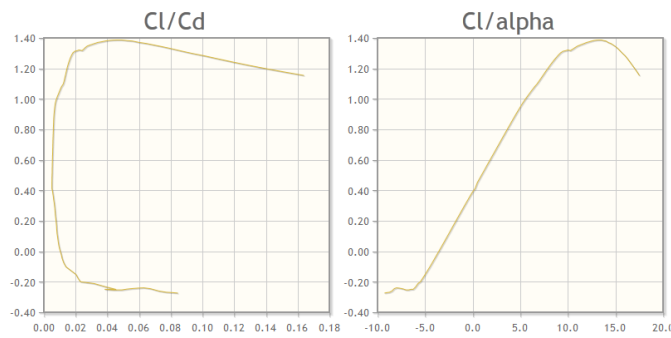
Máximo arqueamento: 3.2% Localizado: 44.8%.

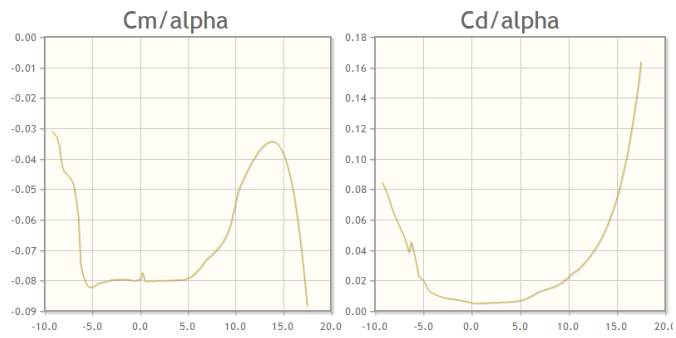
Desenho do Perfil:



Polares:

Numero de Reynolds = 100000



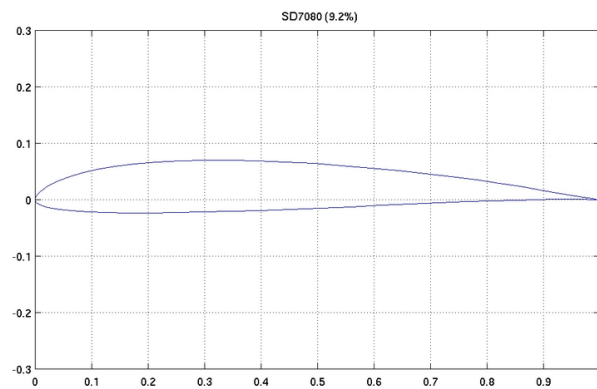


- SD-7080

Máxima espessura: 9.2%. Localizada: 30%.

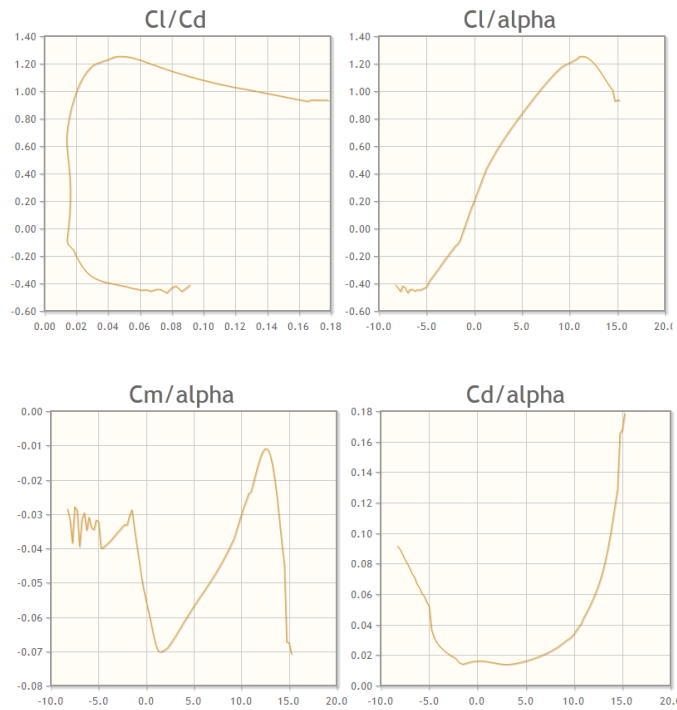
Máximo arqueamento: 2.1%. Localizado: 44.4%.

Desenho do Perfil:



Polares:

Numero de Reynolds = 100000

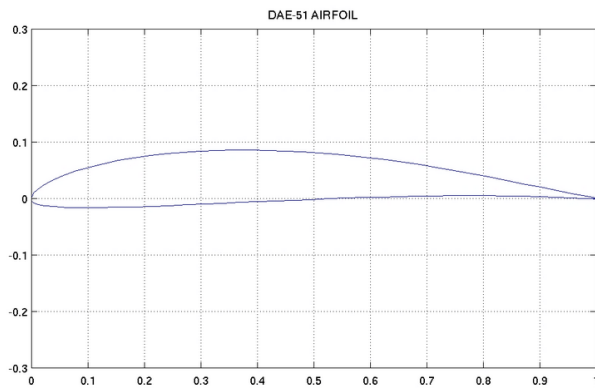


- DAE-51

Máxima espessura: 9.4%. Localizada: 30.7%.

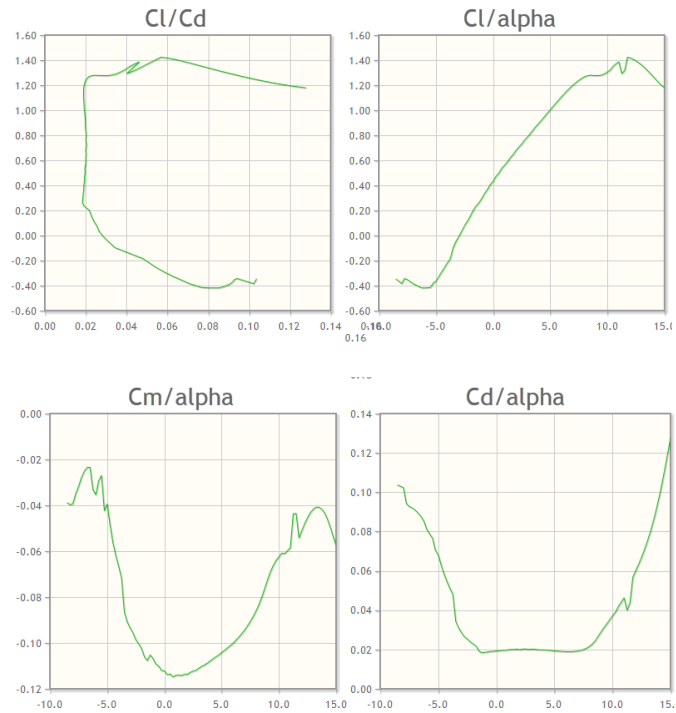
Máximo arqueamento: 4%. Localizado: 46.4%.

Desenho do Perfil:



Polares:

Numero de Reynolds = 100000



12.2. Anexo2. Polares NACA 6512. Número de Reynolds de 150000

Alpha	Cl	Cd	Cm	XTr_top	XTr_bot	Cl/Cd	Cl ^{3/2} /Cd	sqrt(Cl)	XCP	RMom	Cdp	Cpm	Re
-3,000	0,267	0,025	-0,162	0,867	0,136	10,826	5,592	1,936	0,864	0,000	0,016	-1,502	150.000
-2,750	0,286	0,025	-0,160	0,859	0,147	11,635	6,227	1,868	0,817	0,000	0,016	-1,407	150.000
-2,500	0,325	0,024	-0,162	0,856	0,165	13,492	7,689	1,755	0,756	0,000	0,016	-1,274	150.000
-2,250	0,367	0,023	-0,165	0,855	0,188	15,624	9,469	1,652	0,704	0,000	0,015	-1,146	150.000
-2,000	0,408	0,023	-0,167	0,853	0,215	17,808	11,375	1,566	0,664	0,000	0,015	-1,022	150.000
-1,500	0,466	0,022	-0,168	0,842	0,268	20,746	14,169	1,464	0,612	0,000	0,015	-0,831	150.000
-1,250	0,501	0,022	-0,169	0,839	0,302	22,605	15,996	1,413	0,589	0,000	0,014	-0,736	150.000
-0,750	0,564	0,022	-0,170	0,830	0,377	26,150	19,642	1,331	0,553	0,000	0,014	-0,776	150.000
-0,500	0,604	0,021	-0,172	0,828	0,424	28,828	22,406	1,287	0,535	0,000	0,014	-0,802	150.000
0,000	0,659	0,021	-0,172	0,816	0,522	31,975	25,950	1,232	0,510	0,000	0,014	-0,839	150.000
0,250	0,697	0,020	-0,173	0,815	0,602	35,134	29,928	1,198	0,498	0,000	0,013	-0,865	150.000
1,000	0,784	0,019	-0,172	0,801	1,000	42,367	37,512	1,129	0,468	0,000	0,012	-0,930	150.000
1,250	0,801	0,019	-0,170	0,791	1,000	42,207	37,781	1,117	0,460	0,000	0,013	-0,944	150.000
1,500	0,840	0,019	-0,172	0,788	1,000	45,262	41,495	1,091	0,452	0,000	0,012	-0,974	150.000
2,000	0,898	0,019	-0,172	0,776	1,000	48,252	45,714	1,056	0,438	0,000	0,012	-1,020	150.000
2,250	0,938	0,019	-0,174	0,773	1,000	51,642	50,009	1,033	0,432	0,000	0,011	-1,053	150.000
2,750	0,994	0,018	-0,174	0,760	1,000	54,665	54,512	1,003	0,420	0,000	0,011	-1,104	150.000
3,000	1,014	0,019	-0,172	0,751	1,000	54,707	55,101	0,993	0,415	0,000	0,012	-1,124	150.000
3,250	1,052	0,018	-0,174	0,747	1,000	57,746	59,216	0,975	0,410	0,000	0,011	-1,158	150.000
3,500	1,074	0,018	-0,173	0,738	1,000	58,071	60,167	0,965	0,405	0,000	0,012	-1,182	150.000
3,750	1,109	0,018	-0,174	0,733	1,000	60,870	64,104	0,950	0,401	0,000	0,011	-1,218	150.000
4,000	1,132	0,018	-0,173	0,724	1,000	61,273	65,181	0,940	0,397	0,000	0,012	-1,245	150.000
4,250	1,167	0,018	-0,174	0,718	1,000	64,013	69,148	0,926	0,392	0,000	0,011	-1,284	150.000
4,500	1,189	0,018	-0,172	0,709	1,000	64,284	70,096	0,917	0,388	0,000	0,012	-1,316	150.000
4,750	1,225	0,018	-0,174	0,703	1,000	67,160	74,330	0,904	0,385	0,000	0,011	-1,391	150.000
5,000	1,245	0,019	-0,172	0,698	1,000	67,189	74,976	0,896	0,381	0,000	0,012	-1,463	150.000
5,250	1,275	0,019	-0,172	0,685	1,000	68,907	77,817	0,886	0,377	0,000	0,012	-1,560	150.000

	Alpha	Cl	Cd	Cm	XTr_top	XTr_bot	Cl/Cd	Cl ³ /2/Cd	sqrt(Cl)	XcP	RMom	Cdp	Cpm	Re
28	5,500	1,302	0,019	-0,172	0,676	1,000	70,195	80,105	0,876	0,374	0,000	0,012	-1,659	150.000
29	5,750	1,325	0,019	-0,171	0,666	1,000	70,717	81,410	0,869	0,371	0,000	0,012	-1,757	150.000
30	6,000	1,355	0,019	-0,171	0,656	1,000	72,463	84,353	0,859	0,367	0,000	0,012	-1,878	150.000
31	6,250	1,382	0,019	-0,170	0,646	1,000	73,822	86,772	0,851	0,364	0,000	0,012	-1,996	150.000
32	6,500	1,403	0,019	-0,169	0,633	1,000	74,541	88,297	0,844	0,361	0,000	0,012	-2,113	150.000
33	6,750	1,426	0,019	-0,167	0,618	1,000	75,781	90,479	0,838	0,358	0,000	0,012	-2,235	150.000
34	7,000	1,447	0,019	-0,166	0,602	1,000	76,982	92,608	0,831	0,354	0,000	0,012	-2,360	150.000
35	7,250	1,468	0,019	-0,164	0,587	1,000	77,757	94,201	0,825	0,351	0,000	0,012	-2,492	150.000
36	7,500	1,486	0,019	-0,162	0,571	1,000	77,911	94,963	0,820	0,348	0,000	0,013	-2,619	150.000
37	7,750	1,501	0,019	-0,159	0,554	1,000	77,548	94,992	0,816	0,345	0,000	0,013	-2,738	150.000
38	8,000	1,515	0,020	-0,157	0,536	1,000	77,013	94,776	0,813	0,342	0,000	0,013	-2,857	150.000
39	8,250	1,528	0,020	-0,154	0,518	1,000	76,330	94,344	0,809	0,338	0,000	0,014	-2,986	150.000
40	8,500	1,539	0,020	-0,151	0,500	1,000	75,479	93,648	0,806	0,335	0,000	0,014	-3,110	150.000
41	8,750	1,546	0,021	-0,147	0,480	1,000	73,890	91,868	0,804	0,332	0,000	0,014	-3,220	150.000
42	9,000	1,552	0,022	-0,143	0,459	1,000	72,084	89,812	0,803	0,329	0,000	0,015	-3,331	150.000
43	9,250	1,557	0,022	-0,139	0,437	1,000	69,840	87,138	0,801	0,325	0,000	0,016	-3,436	150.000
44	9,500	1,560	0,023	-0,135	0,412	1,000	67,234	83,962	0,801	0,322	0,000	0,017	-3,536	150.000
45	9,750	1,560	0,024	-0,131	0,385	1,000	64,214	80,206	0,801	0,319	0,000	0,018	-3,629	150.000
46	10,000	1,558	0,026	-0,126	0,354	1,000	60,799	75,898	0,801	0,316	0,000	0,019	-3,716	150.000
47	10,250	1,553	0,027	-0,122	0,321	1,000	56,920	70,942	0,802	0,313	0,000	0,020	-3,795	150.000
48	10,500	1,545	0,029	-0,118	0,283	1,000	52,717	65,530	0,804	0,310	0,000	0,022	-3,864	150.000
49	10,750	1,534	0,032	-0,113	0,243	1,000	48,335	59,869	0,807	0,307	0,000	0,024	-3,920	150.000
50	11,000	1,520	0,035	-0,109	0,204	1,000	43,948	54,189	0,811	0,305	0,000	0,027	-3,963	150.000
51	11,250	1,507	0,038	-0,105	0,170	1,000	39,989	49,087	0,815	0,302	0,000	0,030	-4,003	150.000
52	11,500	1,494	0,041	-0,102	0,144	1,000	36,548	44,674	0,818	0,300	0,000	0,033	-4,044	150.000
53	11,750	1,484	0,044	-0,099	0,126	1,000	33,696	41,050	0,821	0,298	0,000	0,036	-4,092	150.000
54	12,000	1,478	0,047	-0,096	0,112	1,000	31,429	38,205	0,823	0,296	0,000	0,039	-4,152	150.000

55	12,250	1,472	0,050	-0,094	0,102	1,000	29,437	35,715	0,824	0,294	0,000	0,042	-4,214	150.000
56	12,500	1,469	0,053	-0,092	0,094	1,000	27,773	33,656	0,825	0,293	0,000	0,045	-4,283	150.000
57	12,750	1,467	0,056	-0,090	0,087	1,000	26,393	31,969	0,826	0,291	0,000	0,047	-4,359	150.000
58	13,000	1,467	0,058	-0,088	0,081	1,000	25,210	30,537	0,826	0,289	0,000	0,050	-4,440	150.000

12.3. Anexo3. Polares NACA 6512. Número de Reynolds de 100000

	Alpha	Cl	Cd	Cm	XTr_top	XTr_bot	Cl/Cd	Cl ³ /2/Cd	sqrt(Cl)	XcP	RMom	Cdp	Cpm	Re
1	-3,000	0,117	0,035	-0,142	0,893	0,135	3,291	1,124	2,927	1,486	0,000	0,027	-1,739	100.000
2	-2,500	0,182	0,035	-0,145	0,882	0,158	5,261	2,245	2,343	1,055	0,000	0,026	-1,511	100.000
3	-2,250	0,226	0,034	-0,148	0,879	0,177	6,633	3,154	2,104	0,912	0,000	0,025	-1,381	100.000
4	-2,000	0,247	0,034	-0,147	0,871	0,192	7,253	3,606	2,011	0,852	0,000	0,025	-1,293	100.000
5	-1,750	0,289	0,034	-0,150	0,867	0,216	8,562	4,600	1,861	0,774	0,000	0,025	-1,171	100.000
6	-1,500	0,311	0,034	-0,149	0,860	0,238	9,190	5,125	1,793	0,734	0,000	0,025	-1,087	100.000
7	-1,250	0,349	0,034	-0,151	0,855	0,268	10,406	6,151	1,692	0,686	0,000	0,025	-0,972	100.000
8	-1,000	0,373	0,034	-0,151	0,848	0,297	11,055	6,753	1,637	0,657	0,000	0,025	-0,892	100.000
9	-0,750	0,409	0,034	-0,152	0,843	0,336	12,172	7,783	1,564	0,624	0,000	0,025	-0,793	100.000
10	-0,250	0,467	0,034	-0,153	0,831	0,418	13,884	9,491	1,463	0,579	0,000	0,025	-0,698	100.000
11	0,000	0,510	0,033	-0,156	0,828	0,479	15,346	10,956	1,401	0,555	0,000	0,025	-0,726	100.000
12	0,250	0,524	0,034	-0,154	0,818	0,527	15,563	11,271	1,381	0,543	0,000	0,026	-0,735	100.000
13	0,500	0,564	0,033	-0,155	0,815	0,621	17,062	12,818	1,331	0,524	0,000	0,025	-0,762	100.000
14	0,750	0,572	0,033	-0,152	0,806	0,786	17,316	13,094	1,322	0,514	0,000	0,026	-0,768	100.000
15	1,000	0,609	0,033	-0,153	0,802	1,000	18,671	14,970	1,281	0,499	0,000	0,025	-0,795	100.000
16	1,250	0,625	0,033	-0,151	0,792	1,000	19,665	14,754	1,265	0,490	0,000	0,026	-0,805	100.000
17	1,500	0,666	0,033	-0,153	0,788	1,000	19,987	16,308	1,226	0,478	0,000	0,026	-0,835	100.000
18	2,000	0,721	0,034	-0,153	0,775	1,000	21,217	18,011	1,178	0,460	0,000	0,026	-0,877	100.000
19	2,500	0,775	0,035	-0,153	0,761	1,000	22,398	19,716	1,136	0,444	0,000	0,027	-0,920	100.000
20	2,750	0,819	0,034	-0,155	0,759	1,000	24,124	21,836	1,105	0,435	0,000	0,026	-0,957	100.000
21	3,000	0,828	0,035	-0,153	0,747	1,000	23,557	21,442	1,099	0,430	0,000	0,027	-0,966	100.000
22	3,250	0,868	0,035	-0,154	0,744	1,000	25,034	23,327	1,073	0,423	0,000	0,027	-1,001	100.000
23	3,750	0,916	0,035	-0,153	0,729	1,000	25,871	24,763	1,045	0,411	0,000	0,028	-1,048	100.000
24	4,250	0,954	0,037	-0,151	0,711	1,000	25,992	25,393	1,024	0,402	0,000	0,029	-1,091	100.000
25	4,500	0,989	0,036	-0,151	0,706	1,000	27,287	27,140	1,005	0,396	0,000	0,028	-1,128	100.000
26	4,750	1,036	0,035	-0,152	0,704	1,000	29,671	30,194	0,983	0,390	0,000	0,027	-1,178	100.000
27	5,000	1,087	0,033	-0,155	0,703	1,000	32,582	33,967	0,959	0,385	0,000	0,026	-1,237	100.000
28	5,500	1,146	0,033	-0,154	0,689	1,000	34,777	37,235	0,934	0,377	0,000	0,025	-1,364	100.000
29	6,500	1,284	0,031	-0,156	0,660	1,000	41,465	46,977	0,883	0,362	0,000	0,024	-1,809	100.000
30	7,000	1,367	0,029	-0,158	0,645	1,000	47,222	55,218	0,855	0,356	0,000	0,022	-2,124	100.000

	Alpha	Cl	Cd	Cm	XTr_top	XTr_bot	Cl/Cd	Cl ^{3/2} /Cd	sqrt(Cl)	XCp	HMom	Cdp	Cpmin	Re
25	4,500	0,989	0,036	-0,151	0,706	1,000	27,287	27,140	1,005	0,396	0,000	0,028	-1,128	100.000
26	4,750	1,036	0,035	-0,152	0,704	1,000	29,671	30,194	0,993	0,390	0,000	0,027	-1,178	100.000
27	5,000	1,097	0,033	-0,155	0,703	1,000	32,582	33,967	0,959	0,385	0,000	0,026	-1,237	100.000
28	5,500	1,146	0,033	-0,154	0,699	1,000	34,777	37,235	0,934	0,377	0,000	0,025	-1,364	100.000
29	6,500	1,284	0,031	-0,156	0,660	1,000	41,465	46,977	0,853	0,362	0,000	0,024	-1,809	100.000
30	7,000	1,367	0,029	-0,159	0,645	1,000	47,212	55,219	0,855	0,356	0,000	0,022	-2,124	100.000
31	7,250	1,388	0,029	-0,157	0,632	1,000	48,114	56,693	0,849	0,352	0,000	0,022	-2,242	100.000
32	7,500	1,420	0,028	-0,156	0,618	1,000	50,558	60,236	0,839	0,349	0,000	0,021	-2,394	100.000
33	7,750	1,484	0,027	-0,156	0,603	1,000	53,744	64,804	0,829	0,346	0,000	0,020	-2,567	100.000
34	8,000	1,485	0,026	-0,155	0,587	1,000	56,519	68,884	0,820	0,343	0,000	0,019	-2,734	100.000
35	8,250	1,506	0,026	-0,153	0,570	1,000	57,708	70,818	0,815	0,340	0,000	0,019	-2,873	100.000
36	8,500	1,518	0,026	-0,150	0,552	1,000	57,818	71,240	0,812	0,336	0,000	0,019	-2,998	100.000
37	8,750	1,532	0,026	-0,147	0,534	1,000	58,131	71,948	0,808	0,333	0,000	0,020	-3,130	100.000
38	9,000	1,548	0,026	-0,144	0,514	1,000	58,793	73,150	0,804	0,330	0,000	0,020	-3,271	100.000
39	9,250	1,550	0,027	-0,140	0,495	1,000	57,699	71,843	0,803	0,326	0,000	0,020	-3,369	100.000
40	9,500	1,556	0,027	-0,136	0,473	1,000	56,901	70,981	0,802	0,323	0,000	0,021	-3,479	100.000
41	9,750	1,567	0,028	-0,131	0,460	1,000	56,391	69,036	0,801	0,320	0,000	0,021	-3,572	100.000
42	10,000	1,587	0,029	-0,127	0,425	1,000	53,620	66,907	0,801	0,316	0,000	0,022	-3,664	100.000
43	10,250	1,584	0,030	-0,122	0,397	1,000	51,385	64,054	0,802	0,313	0,000	0,023	-3,745	100.000
44	10,500	1,548	0,032	-0,118	0,366	1,000	48,718	60,609	0,804	0,310	0,000	0,025	-3,821	100.000
45	10,750	1,538	0,034	-0,113	0,331	1,000	46,643	56,609	0,806	0,307	0,000	0,027	-3,883	100.000
46	11,000	1,525	0,036	-0,108	0,292	1,000	42,172	52,075	0,810	0,304	0,000	0,029	-3,928	100.000
47	11,250	1,508	0,039	-0,104	0,251	1,000	38,495	47,270	0,814	0,301	0,000	0,032	-3,956	100.000
48	11,500	1,490	0,043	-0,100	0,214	1,000	34,982	42,698	0,819	0,299	0,000	0,035	-3,976	100.000
49	11,750	1,474	0,046	-0,096	0,184	1,000	31,592	38,762	0,824	0,297	0,000	0,038	-3,998	100.000
50	12,000	1,461	0,050	-0,093	0,161	1,000	29,476	36,691	0,827	0,295	0,000	0,041	-4,030	100.000
51	12,250	1,453	0,053	-0,090	0,144	1,000	27,597	33,191	0,830	0,293	0,000	0,044	-4,077	100.000
52	12,500	1,450	0,056	-0,088	0,130	1,000	26,087	31,410	0,831	0,291	0,000	0,047	-4,138	100.000
53	12,750	1,450	0,058	-0,086	0,119	1,000	24,948	30,036	0,831	0,289	0,000	0,049	-4,214	100.000
54	13,000	1,454	0,060	-0,084	0,109	1,000	24,140	29,108	0,829	0,287	0,000	0,051	-4,306	100.000

Bibliografía

Chen, W., & P. Bernal, L. (2006). *Design and Performance of Low Reynolds Number Airfoils*.

ISMAIL, K. A. (s.f.). *Aerodinâmica Básica*.

Associação Brasileira de Energia Eólica.

Camargo do Amarante, O. A., Brower, M., Zack, J., & Leite de Sá, A. (2001). *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro*.

Global Wind Energy Council (GWEC) 2014.

Kuethe, & Schwitzer. (1959).

Manual XFLR5

Manual, PROP CALC (s.f.).

file:///E:/UNIVERSIDAD/BRASIL/PROYECTO/Segundo%20Semestre/Documentaci%C3%B3n/PROGRAMAS/PropCalc_en_Win/PCHelp/help.html.

Schenk, H. (s.f.). <http://www.drivecalc.de/PropCalc/>.

(s.f.). Schneider Electric.

TURBINE, A. W. (s.f.). <http://www.windturbinestar.com/30kwh-aeolos-wind-turbine.html>.

WIKIPEDIA

