

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

VINICIUS MALTA CHEIM

**OTIMIZAÇÃO DE PROJETO AERODINÂMICO DE PÁ DE
GERADOR EÓLICO EMPREGANDO O MÉTODO DE ELEMENTO DE
PÁ ESTACIONÁRIO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2016

VINICIUS MALTA CHEIM

OTIMIZAÇÃO DE PROJETO AERODINÂMICO DE PÁ DE GERADOR EÓLICO EMPREGANDO O MÉTODO DE ELEMENTO DE PÁ ESTACIONÁRIO

Projeto de Pesquisa apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr Cláudio Tavares da Silva

CURITIBA

2016

TERMO DE ENCAMINHAMENTO

Venho, por meio deste termo, encaminhar para apresentação a Proposta do Projeto de Pesquisa otimização de projeto aerodinâmico de pá de gerador eólico empregando o Método de Elemento de Pá Estacionário, realizada pelo aluno Vinicius Malta Cheim, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 1 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Tavares da Silva
UTFPR - Damec

Curitiba, 4 de Junho de 2016.

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a Proposta de Projeto de Pesquisa otimização de projeto aerodinâmico de pá de gerador eólico empregando o Método de Elemento de Pá Estacionário, realizada pelo Vinicius Malta Cheim, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 1, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Cláudio Tavares da Silva
DAMEC, UTFPR
Orientador

Prof. Dr. Moisés A. Marcelino Neto
DAMEC, UTFPR
Avaliador

Prof. Dr. Ana Paula da Silva Ferreira
DAMEC, UTFPR
Avaliador

Curitiba, 4 de Junho de 2016.

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso (ou Programa)

RESUMO

A energia eólica ainda representa uma pequena parcela da matriz energética mundial. Nos dias de hoje a preocupação com os impactos ambientais e a busca por fontes alternativas e renováveis faz com que se desenvolvam cada vez mais os estudos sobre essas fontes alternativas, como a eólica. No Brasil existem poucas indústrias e escritórios de projetos comerciais voltados para energia eólica. Toda tecnologia dos geradores que se encontram no Brasil é estrangeira. Este trabalho tem como objetivo iniciar os estudos teóricos a respeito do tema energia eólica no Departamento de Engenharia Mecânica da UTFPR, buscando a otimização da pá de gerador eólico de eixo horizontal, com fluxo invariante no tempo, através do método de elemento de pá (BEM), bem como desenvolver um código numérico na linguagem de programação **MATLAB Script**[®] para realizar o procedimento de otimização dos principais parâmetros aerodinâmicos de projeto em diferentes condições de operação e gerar a geometria ótima.

Palavras-chave: BEM, Gerador Eólico, Otimização, aerodinâmica.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1.1.1 ----- Principais marcos do desenvolvimento da energia eólica
- Figura 1.1.2 ----- Matriz energética
- Figura 1.1.3 -----Classificação das turbinas quanto ao eixo de rotação
- Figura 2.2.1 -----Energia extraída de um disco atuador e o tubo de escoamento
- Figura 2.2.2 ----- Tubo de escoamento
- Figura 2.5.1 -----Um elemento de pá varre um anel anular
- Figura 2.5.2 ----- Forças e velocidades sobre um elemento de pá
- Figura 3.1.1 ----- Coeficiente de potencia
- Figura 3.1.2----- Fluxograma para obtenção dos fatores de indução
- Figura 3.2.1----- Parâmetros da pá de rotor
- Figura 3.4.1 -----Gráfico $C_d \times C_l$
- Figura 3.4.2 -----Gráfico $\alpha - C_l$
- Figura 3.5.1-----Fluxograma do Método da refletiva da região de confiança
- Figura 4.2.1-----Gráfico $\lambda \times C_p$ $\alpha=12$ e 15 respectivamente
- Figura 4.2.2 -----Gráfico $\alpha \times C_d$
- Figura 4.3.1 -----Gráfico $\lambda \times C_p$
- Figura 4.3.2 -----Gráfico $\lambda \times C_p$ extrapolado
- Figura 4.3.3 ----- $C_p \times \lambda$
- Figura 4.3.4 ----- $C_p \times \lambda$
- Figura 4.3.5 ----- Cps típicos para número de pás

Figura 4.4.1 ----- Distribuição de cordas

Figura 4.4.2 ----- Ângulo de torção

Figura 4.4.3----- Nuvem de Pontos

Figura 4.4.4-----Modelo CAD

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

HAWT Horizontal Axis Wind Turbine

BEM Blade Element Method

UTFPR Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CAD Computed aided design

UE União Europeia

CFD Computational Fluid Dynamics

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Contexto do Tema	10
1.2	Caracterização do Problema	12
1.3	Objetivos.....	13
1.3.1	Objetivo Geral	13
1.3.2	Objetivos específicos	14
1.4	Justificativa	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1	O Tubo de escoamento.....	15
	A potência de saída então pode ser obtida	16
2.2	O Limite de Betz	16
2.3	Coefficiente de empuxo.....	18
2.4	Teoria da pá de rotor	18
2.5	Número finito de pás, correção de Prandtl.....	20
3	Metodologia	22
3.1	Proposta	22
3.2	Produtos do Projeto.....	24
3.3	Obtenção do λ ótimo	25
3.4	Resolução do sistema não linear	27
3.5	Função e <i>inputs</i>	29
3.6	Obtenção da geometria ótima	30
4	RESULTADOS E comentários.....	32
4.1	Influência da resolução do algoritmo.....	32
4.2	Influência do ângulo de ataque	33
4.3	λ Ótimo para máxima razão Cl/Cd	35
4.4	Geometria.....	38
5	CONCLUSÕES.....	42
	REFERÊNCIAS	44
6	Apêndice 1	45
7	Apêndice 2	48
8	Apêndice 3	49
9	Anexo 1.....	50

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto do Tema

A força dos ventos é usada pelo homem a mais de 3000 anos impulsionando moinhos, bombeando água e possibilitando o deslocamento de grandes embarcações, fundamentais para a expansão marítima do final do século XV.

Por volta dos anos 70, o estímulo para o desenvolvimento de usinas eólicas foi devido ao alto preço dos combustíveis fósseis, impulsionado pelos EUA e países europeus, que possuíam sua matriz energética basicamente térmica, como demonstra Dutra (2009) na Figura 1.1.1. Já nos dias de hoje, o foco está na necessidade da redução das emissões de gases do efeito estufa e na expansão da utilização de fontes de energia renováveis, a fim de evitar racionamentos ocasionados pela escassez dos recursos não renováveis.

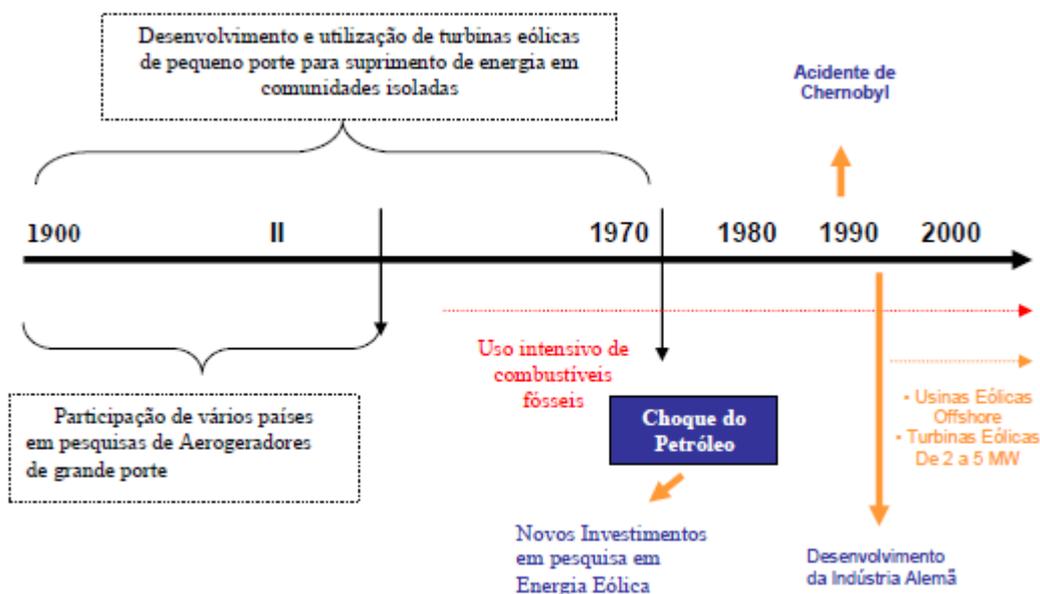


Figura 1.1.1: Principais marcos do desenvolvimento da energia eólica
Fonte: Dutra (2009)

O Brasil possui uma matriz energética basicamente hidráulica, com 62,6% da matriz. É uma fonte limpa e renovável, mas impactante, tanto ambientalmente quanto socialmente. Além disso, é também dependente das condições climáticas, que podem provocar uma redução significativa na produção de energia.

Outras fontes não renováveis como nuclear, biomassa, carvão e derivados de petróleo representam 31,4%, restando para a energia eólica 4,6% (Associação Brasileira de Energia Eólica, 2015) como se vê no Gráfico da Figura 1.1.2.

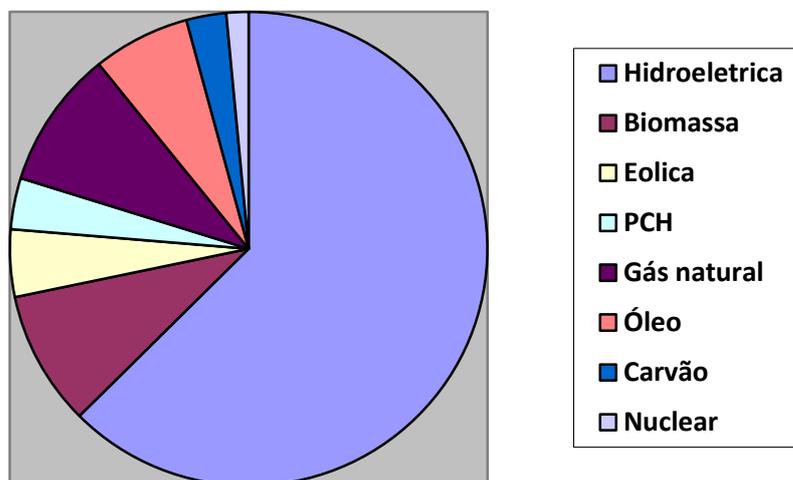


Figura 1.1.2 - Matriz energética

Fonte: Associação Brasileira de Energia Eólica, 2015

No Brasil se vislumbra uma alternativa ao impacto das usinas hidroelétricas. Uma possível tendência para a utilização de micro geração de energia, que consiste na geração de energia eólica e solar em residências e ou empresas, podendo alcançar de 2KW a 800KW de potência de geração, apenas num gerador eólico.

Por não existirem centros de desenvolvimento de geradores eólicos nacionais, ou seja, toda tecnologia tem que ser importada, os custos de implantação desse modal energético são altos. Além disso, a eficiência desses geradores importados é reduzida devido a adaptações de projeto relacionadas às condições de vento dos sítios. Os geradores importados são desenvolvidos para sítios de outros países com características de ventos diferentes.

Este trabalho pretende iniciar os estudos teóricos a respeito do tema energia eólica no Departamento de Engenharia Mecânica da UTFPR. Ele se concentra nos aspectos de determinação dos parâmetros aerodinâmicos das pás de um gerador eólico. Visa especificamente otimizar a aerodinâmica da pá da turbina eólica de um gerador de eixo horizontal (HAWT – *Horizontal Axis Wind Turbine*), por meio do

Método do Elemento de Pá (BEM – *Blade Element Method*), utilizando ferramentas de modelagem matemática computacional e métodos numéricos, afim de se aproximar o máximo possível do limite teórico de rendimento aerodinâmico de uma turbina eólica, ou limite de Betz.

A Figura 1.1.3 mostra a classificação das turbinas eólicas quanto ao eixo de rotação, onde pode-se verificar o eixo de rotação no sentido vertical nas figuras a) e b) e horizontal na figura c).

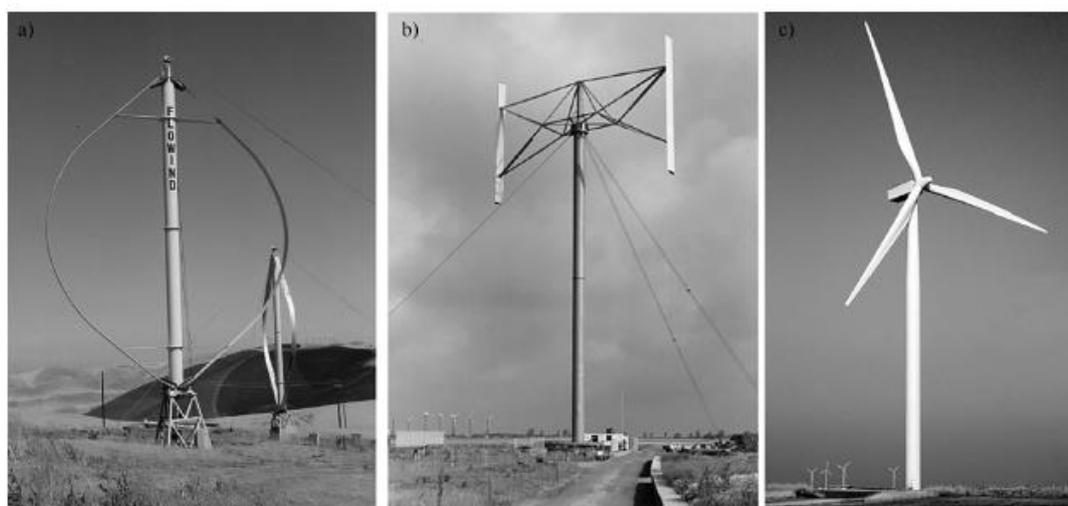


Figura 1.1.3: Classificação das turbinas quanto ao eixo de rotação a) e b) vertical e c) horizontal

Fonte: Hau (2006)

1.2 Caracterização do Problema

Para se gerar energia elétrica, necessita-se converter algum dos tipos de energia, tal como cinética, potencial, solar ou térmica. O problema está no fato de algumas fontes passarem por processos irreversíveis como a combustão, ou seja, a matéria que passa pelo processo não é reaproveitável e tais recursos se esgotarão. Assim, devemos buscar formas alternativas de geração de energia elétrica, de modo a causar o menor impacto possível.

Nos últimos séculos, vem-se percebendo fortes mudanças climáticas oriundas de impactos ambientais de atividades do ser humano. A geração de energia é uma dessas fontes de impactos. Devemos, portanto, procurar minimizar ou buscar formas alternativas de geração de energia. No que diz respeito à energia eólica busca-se

otimizar ao máximo o rendimento dos geradores de eixo horizontal a fim de substituir de forma competitiva, outras fontes de energia. Minimizando assim os impactos tanto no quesito ambiental quanto no econômico.

Fazendo uma análise no quesito ambiental, podemos comparar os impactos causados pelas fontes de geração de energia de quatro fontes: hidráulica, térmica, solar fotovoltaica e eólica. Segundo Leite (2005), a implantação de hidrelétricas pode gerar impactos ambientais na hidrologia, clima, erosão e assoreamento, sismologia, flora, fauna e alteração da paisagem. As usinas hidroelétricas necessitam de grandes obras. As dimensões dessas obras se relacionam em proporção direta com os impactos ambientais e sociais.

As usinas termoelétricas produzem energia através da queima de combustíveis fósseis ou biomassa e um sistema de potência a vapor, gerando altos níveis de emissão de CO₂ e outros óxidos. A utilização desses recursos, além de provocar o esgotamento dessas fontes energéticas, é a maior responsável pela emissão de óxidos gasosos tóxicos e poluentes, que alteram o clima mundial, e causam danos à saúde.

Segundo Tolmasquim (2004), os sistemas fotovoltaicos têm impactos relacionados com emissões, na fase de fabricação dos componentes e também relacionado com a área ocupada pelas placas, além da poluição visual.

Os aerogeradores modernos de grandes dimensões, com mais de 200m de torre e mais de 100 m de diâmetro de rotor, configuram uma poluição visual para alguns. Existe também a questão da poluição sonora causada pelo ruído das pás em rotação.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Neste trabalho pretende-se determinar os parâmetros aerodinâmicos ótimos da pá de um gerador de eixo horizontal, através do Método do Elemento de Pá (BEM – *Blade Element Method*), levando em consideração um fluxo constante de vento.

Esses parâmetros são: diâmetro do rotor, distribuição de cordas aerodinâmicas ao longo da envergadura da pá, torção geométrica da pá e perfil aerodinâmico.

1.3.2 Objetivos específicos

- Otimização aerodinâmica da geometria da pá de gerador eólico de eixo horizontal
- Desenvolvimento de código numérico para otimização em diferentes condições de vento

1.4 Justificativa

Um ponto crítico do desenvolvimento da sociedade está diretamente ligado ao esgotamento das fontes não renováveis de energia. Neste sentido, a busca por fontes de energia renováveis e de baixo impacto se mostra justificável. A otimização da pá do gerador eólico, através do Método do Elemento de Pá, é uma forma de tornar a geração de energia eólica mais eficiente e até menos impactante, já que se consegue retirar mais energia a partir de uma unidade geradora mais eficiente, não necessitando assim o emprego de muitas turbinas para atender uma demanda energética específica, além de um passo inicial no desenvolvimento de geradores nacionais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O Tubo de escoamento

O tubo de escoamento é definido de forma que, antes do disco, tem velocidade U_∞ e área seccional menor que a área do disco atuador, velocidade $U_\infty(1 - 2a)$ e área maior que a do disco, depois de passar pelo mesmo. Esta expansão ocorre porque o fluxo de massa deve ser igual em todos os pontos.

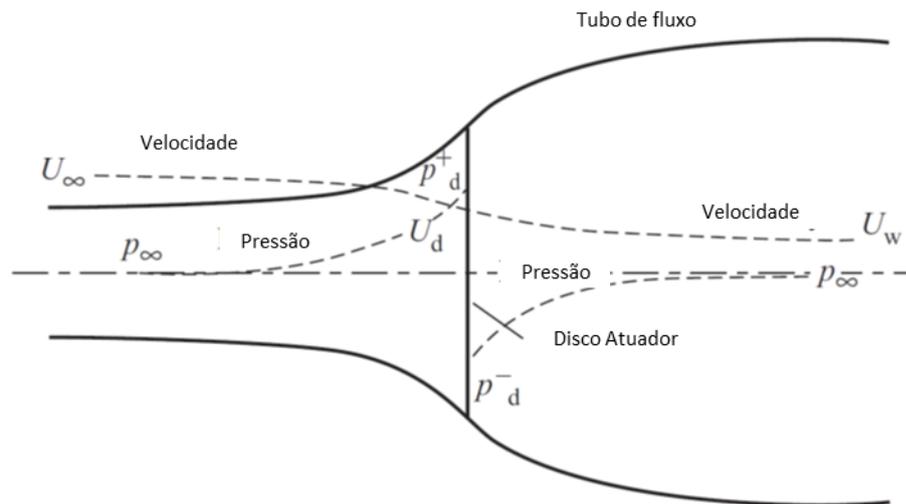


Figura 2.2.1: Energia extraída de um disco atuador e o tubo de escoamento

Fonte: Burton (2001)

De acordo com o princípio da continuidade, sob a superfície de controle do disco atuador da Figura 2.2.1, temos que o balanço de massa é

$$\rho A_\infty U_\infty = \rho A_d U_d = \rho A_w U_w \quad (2.1)$$

onde o sub índice ∞ se refere às condições antes do disco, d às condições no disco e w depois do disco. É usual que se imponha uma variação de velocidade causada pelo disco no escoamento livre, que é dada por $-aU_\infty$, onde a é chamado de fator de indução de fluxo axial que é um valor adimensional desconhecido que se multiplica a velocidade do vento. No disco, então temos que a velocidade total do escoamento é

$$U_d = U_\infty(1 - a) \quad (2.2)$$

Segundo Da Silva (2012), na direção axial, a variação do momento do fluxo ao longo do tubo de escoamento deve ser igual ao empuxo produzido pelas pás. O tubo de escoamento é definido de acordo com a Figura 2.2.2, como aquele que cobre todo o disco do rotor. Todas as variáveis são assumidas como constantes no tempo.

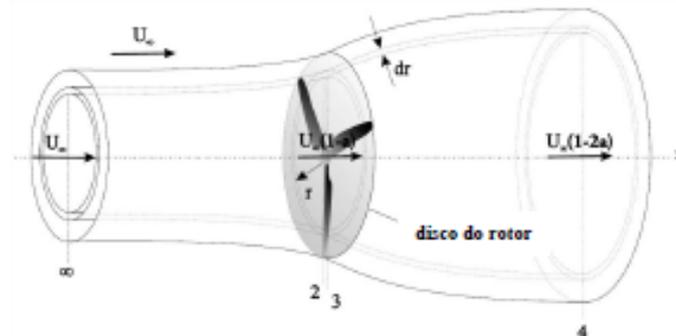


Figura 2.2.2: Tubo de escoamento
Fonte: Da Silva (2012)

Temos então, que o empuxo no rotor é

$$T = \frac{1}{2} \rho A U_\infty^2 [4a(1-a)] \quad (2.3)$$

A potência de saída então pode ser obtida

$$Potencia = \frac{1}{2} \rho A U_\infty^3 4a(1-a)^2 \quad (2.4)$$

2.2 O Limite de Betz

O coeficiente de potência é definido por

$$C_p = \frac{Potencia}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^3 A_d} \quad (2.5)$$

onde o denominador representa a energia contida no escoamento, na ausência do rotor, e o numerador, a potência extraída. A_d é a área do rotor, ρ a densidade do fluido e U_∞ a velocidade do escoamento.

De acordo com Burton (2001), a potência extraída do fluxo pelo rotor é dada por

$$Potencia = FU_d = 2\rho A_d U_\infty^3 a(1 - a) \quad (2.6)$$

onde a é definido como $\frac{U_\infty - U_d}{U_\infty}$.

Substituindo as equações 2.5 e 2.6 temos que,

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (2.7)$$

Temos o máximo valor de C_p quando

$$\frac{dC_p}{da} = 4(1 - a)(1 - 3a) = 0 \quad (2.8)$$

que nos fornece o valor de $a = \frac{1}{3}$, logo

$$\left. \frac{dC_p}{da} \right|_{a=1/3} = \frac{16}{27} = 0.593 \quad (2.9)$$

Tal valor é conhecido como limite de Betz, como definido pelo aerodinamicista Albert Betz. Este limite não é decorrente de nenhuma deficiência no projeto da pá, mas sim pela expansão do tubo de fluxo, que requer certa quantidade de energia. Além disso, há também uma redução da velocidade do fluxo após a passagem pelo disco. Essa redução é apenas parcial. Um rendimento de 100% só ocorreria se essa redução fosse total, ou seja, o fluxo teria velocidade zero, após sua passagem pelo disco. O que nunca ocorre.

2.3 Coeficiente de empuxo

A força aplicada no disco atuador causada pela diferença de pressão entre as áreas superior e inferior da pá é dada pela equação (2.3). Ela pode ser usada para se definir o coeficiente de empuxo

$$C_T = \frac{\text{Potencia}}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A_d} \quad (2.10)$$

$$C_T = 4a(1 - a)^2 \quad (2.11)$$

2.4 Teoria da pá de rotor

As forças que agem sobre uma pá podem ser obtidas através da força de arrasto e de sustentação em um aerofólio bidimensional a uma distância r do centro do rotor. O rotor gira a uma velocidade angular Ω descrevendo assim um disco anular de largura δr como na Figura 2.5.1.

O aerofólio, com suas características geométricas de corda c e ângulo de ataque β , que variam de acordo com a extensão da pá devido à diferença de velocidade tangencial, que aqui será expressa em termos da velocidade do fluxo de ventos U_∞ , considerado como constante neste trabalho.

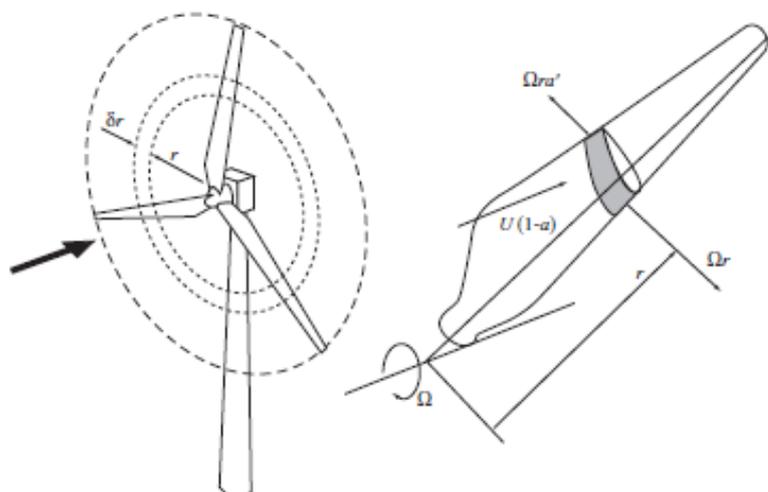


Figura 2.5.1: Um elemento de pá varre um anel anular

Fonte: Burton (2001)

Da Figura 2.5.2 temos que a velocidade relativa resultante num elemento de pá é

$$W = \sqrt{U_{\infty}^2(1-a)^2 + \Omega^2 r^2(1+a')^2} \quad (2.12)$$

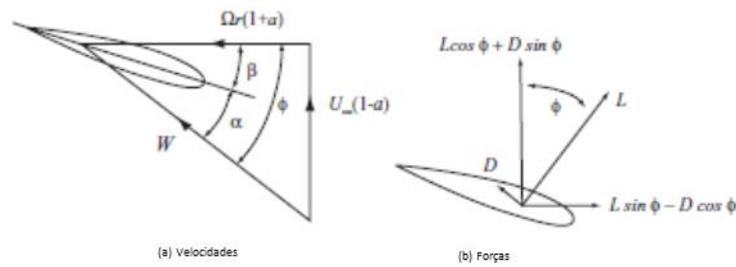


Figura 2.5.2: forças e velocidades sobre o elemento de pá

Fonte: Burton (2001)

Da Figura 2.5.2 temos que as forças que agem sobre um elemento de pá são

$$F_N = L \cos \varphi + D \sin \varphi \quad (2.13)$$

e

$$F_T = L \sin \varphi - D \cos \varphi \quad (2.14)$$

Os coeficientes de sustentação e de arrasto são definidos como

$$C_L = \frac{2L}{\rho U^2 c} \quad (2.15)$$

$$C_D = \frac{2D}{\rho U^2 c} \quad (2.16)$$

Para um número finito de pás N temos que a força diferencial normal e o torque diferencial ficam da forma

$$dF_N = N \frac{1}{2} \rho W^2 (C_L \cos \varphi + C_D \sin \varphi) c dr \quad (2.17)$$

$$dQ = N \frac{1}{2} \rho W^2 (C_L \sin \varphi - C_d \cos \varphi) c r dr \quad (2.18)$$

Sabe-se que a potência é dada por $P = Q\Omega$. Fazendo as substituições das equações 2.8 e 2.18 chega-se a uma nova expressão para C_p , introduzindo os coeficientes λ e λ_r que segundo Gash e Twele (2002), é

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_{\lambda_r}^{\lambda} \sin^2 \varphi (\cos \varphi - \lambda_r \sin \varphi) (\sin \varphi + \lambda_r \cos \varphi) \left[1 - \frac{C_D}{C_L} \cot \varphi \right] \lambda_r^2 d\lambda_r \quad (2.19)$$

onde a velocidade de ponta da pá é dada por $\lambda = \frac{\Omega R}{U}$ e a velocidade local $\lambda_r = \lambda \frac{r}{R}$.

2.5 Número finito de pás, correção de Prandtl

Neste caso é feita uma abordagem do problema de forma que se assume que todas as partículas que atravessam a área do disco interagem com alguma das pás da turbina, isto é, existe um número de pás suficiente para interagir com todo o fluxo, entretanto com um número insuficiente de pás algumas partículas não terão interação com as mesmas, tal nível de interação é definido pelo fator de indução a . Se o fator de indução axial de fluxo é grande em um ponto da pá então a força de sustentação será quase normal ao plano do rotor de forma que a componente de sustentação na direção tangente será pequena assim como sua participação no torque total. Esta redução de torque é conhecida como perda de ponta, e segundo (Burton, 2001) é descrita pela aproximação de Prandtl

$$f_T(\mu) = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} e \left[-\frac{\left(\frac{B}{2}(1-\mu)\right)}{\mu} \right] \sqrt{\frac{1+(\lambda\mu)^2}{(1-a)^2}} \quad (2.20)$$

onde $\mu = r/R$.

A velocidade angular na raiz da pá é bem menor que na ponta, de modo que a circulação na raiz cai para zero, entretanto é usado também a função de perda de ponta na raiz da pá na forma

$$f_R(\mu) = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} e^{\left[-\frac{(B/2)(1-\mu_R)}{\mu} \right] \sqrt{1+(\lambda\mu)^2}/(1-a)^2}} \quad (2.21)$$

onde μ_R faz referência a posição do cubo do rotor.

Sendo assim o fator de perda de ponta/raiz fica

$$f(\mu) = f_R(\mu)f_T(\mu) \quad (2.22)$$

O que leva a novo fator de indução

$$a = \frac{1}{3} + \frac{1}{3}f - \frac{1}{3}\sqrt{1-f+f^2} \quad (2.23)$$

$$a' = \frac{1}{(\mu\lambda)^2} a \left(1 - \frac{a}{f} \right) \quad (2.24)$$

Neste ponto podemos agora escrever a derivada da equação 2.19, que representa a variação da extração de potência ao longo da envergadura da pá, levando-se em consideração as perdas da ponta e da raiz

$$R \frac{dC_p}{dr} = 8(1-a)a'\lambda^2\mu^3 \quad (2.25)$$

Agora pode-se encontrar o coeficiente de potência do rotor C_p , que de acordo com o BEM é a soma de todos os elementos de pá.

3 METODOLOGIA

3.1 Proposta

Neste estudo será desenvolvido um algoritmo para otimização da aerodinâmica da pá de gerador eólico de eixo horizontal (HAWT) utilizando o BEM (*Blade Element Method*). Esse cálculo demanda iterações e considerações de erro e desvio. A partir da equação 2.19 é escolhido, um valor inicial para λ de modo que se comece com baixas velocidades de rotação e um valor de erro é definido, o algoritmo faz quantas iterações forem necessárias até que o valor do erro definido seja zero, ou próximo de zero e o coeficiente de potência C_p se aproxime do máximo, como pode ser observado no Gráfico da Figura 3.1.1 gerado da equação 2.19 para as condições estabelecidas na situação.

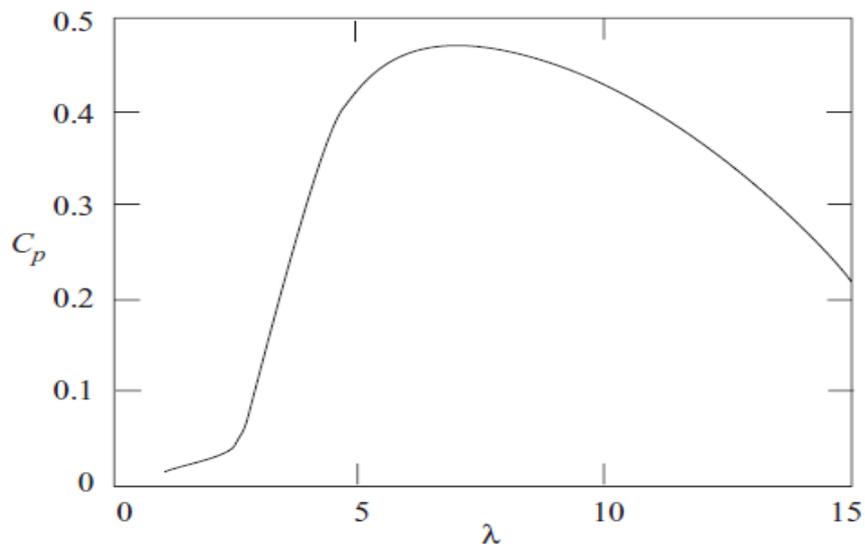


Figura 3.1.1: Coeficiente de potência – razão de velocidade de ponta

Fonte: Burton (2001)

Será calculado o fator de potência de cada elemento de pá e então feita a soma a fim de definir os parâmetros geométricos da pá.

De acordo com Da Silva (2012), um algoritmo utilizando o BEM para se obter os fatores de indução pode ser sintetizado nos seguintes passos:

- Passo 1: Inicializar o fator de indução axial a e o fator de indução radial a' .

- Passo 2: Calcular o ângulo de fluxo
- Passo 3: Calcular o ângulo de ataque local
- Passo 4: Obter os coeficientes de sustentação e arrasto aerodinâmicos do perfil adotado para o elemento de pá.
- Passo 5: Calcular as forças nas direções radial e tangencial através dos valores obtidos para as forças aerodinâmicas de sustentação e arrasto.
- Passo 6: Recalcular os fatores de indução
- Passo 7: Se os fatores de indução se modificam mais que certa tolerância, repetir o passo 2, caso contrário, finalizar.
- Passo 8: Recalcular os carregamentos locais em cada elemento.

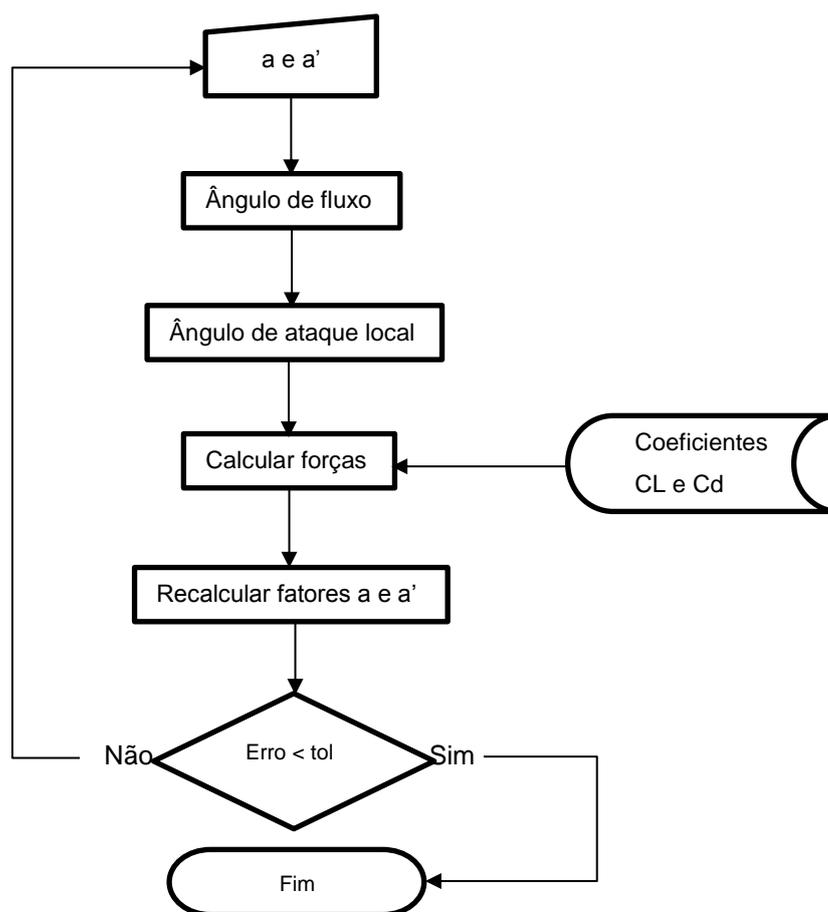


Figura 3.1.2: Fluxograma para obtenção dos fatores de indução

Fonte: Autor

Após ter sido encontrado os valores dos fatores de indução a e a' é calculado o C_p e incrementado o valor de λ , se repete o procedimento até que se encontre um valor de C_p menor que o anterior. Um fluxograma completo do trabalho pode ser visto no Apêndice 3.

É escolhido para este trabalho o software **MATLAB**[®] na versão estudantil, e uma linguagem de programação lógica tal como **MATLAB Script**[®].

3.2 Produtos do Projeto

O aplicativo a ser desenvolvido carrega em seus *scripts* toda a bagagem teórica e executa a otimização de qualquer pá de gerador eólico de eixo horizontal (HAWT), desde que as condições impostas e o erro sejam coerentes. Assim como uma função matemática, o aplicativo ou software tem como entrada as variáveis a potência extraída P e U (velocidade do vento) para um perfil pré-determinado, como na Figura 3.2.1. Após algumas iterações, o aplicativo ou software tem como saída, as características da pá como distribuição de cordas, torção geométrica, envergadura e também uma representação em 3D da pá.

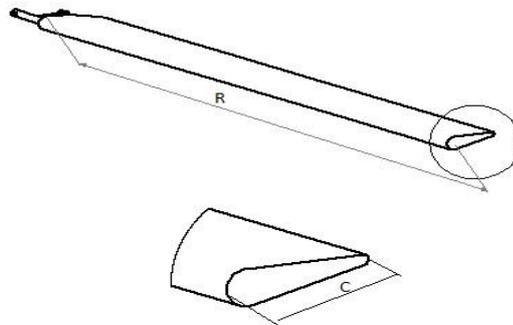


Figura 3.2.1: Parâmetros da pá de rotor

Fonte: Autor

3.3 Obtenção do λ ótimo

É definido inicialmente alguns parâmetros necessários para o início dos cálculos.

É definido o número de pás como três, escolhido um valor de corda constante igual a 0.85, e um valor de α no qual se obtivesse o maior coeficiente de sustentação e o menor coeficiente de arrasto, ou seja, a maior razão C_l/C_d observados nos Gráficos das Figuras 3.4.1 e 3.4.2 gerados a partir dos dados polares obtidos em testes para o aerofólio NACA 4412 disponíveis em airfoiltools.com. Esse é o aerofólio escolhido previamente para compor toda a envergadura da pá. Trata-se, portanto, de uma pá monolítica, isto é, apenas um perfil aerodinâmico ao longo de toda a envergadura.

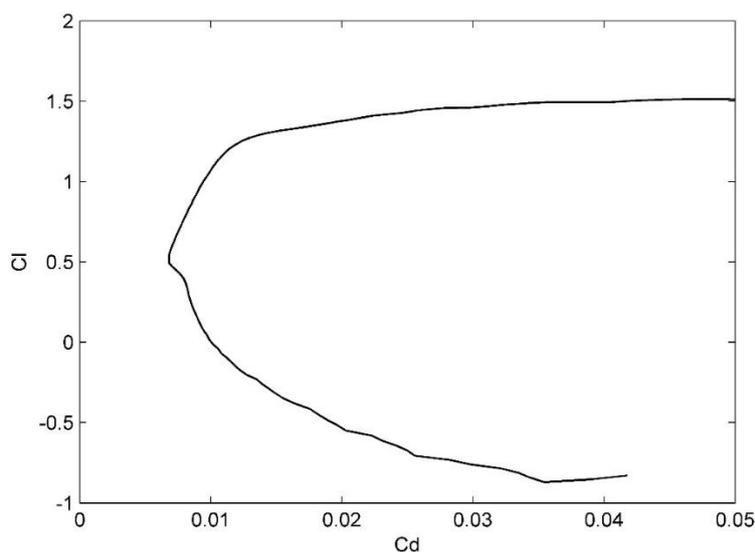


Figura 3.4.1 – C_d - C_l

Fonte: Airfoiltools.com, 2016

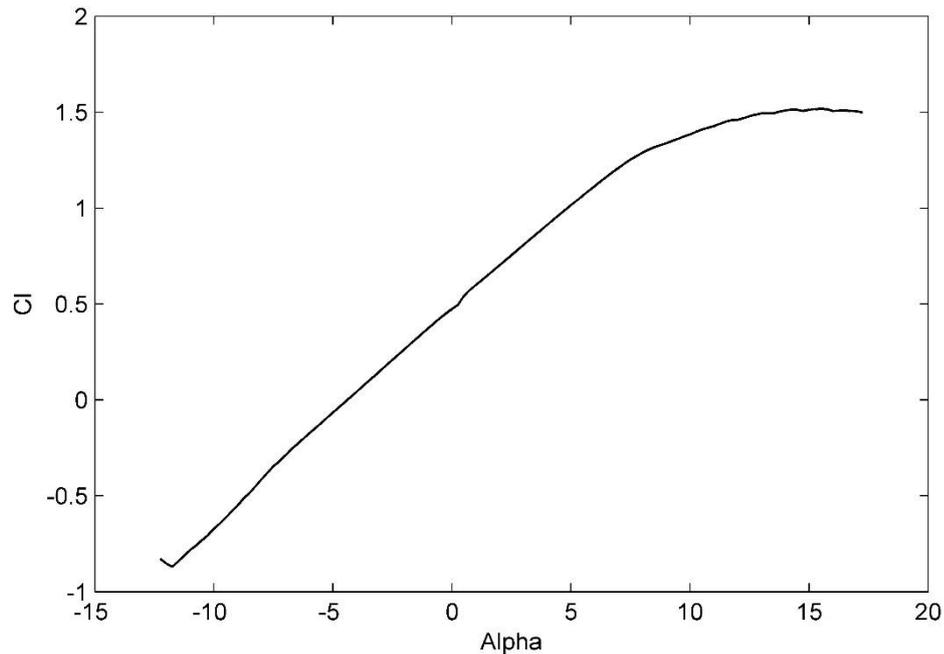


Figura 3.4.2 – Alpha - Cl

Fonte: Airfoiltools.com, 2016

Os coeficientes de arrasto e sustentação, para que se tenha o máximo rendimento, precisam se manter constantes, entretanto a velocidade do fluxo varia sua direção com o raio, então para que estes coeficientes se mantenham constantes é preciso que se tenha uma torção proporcional a variação da velocidade na pá.

Definimos também os valores de Cl e de Cd. Na sequência é definida a tolerância para as iterações de resolução do sistema não linear que será descrito mais a diante, e a densidade do ar.

Inicia-se assumindo um valor qualquer para os fatores de indução axial e radial. A partir destes valores encontram-se as componentes de velocidades no aerofólio elementar. Com estas velocidades pode-se determinar o ângulo de ataque aparente e calcular o torque e o arrasto na pá, através das equações 2.17 e 2.18.

Sabe-se também, como descreve Donadon, Savanov, Menezes e Filho (2008), que os diferenciais de torque e arrasto podem ser calculados na forma

$$\Delta T = \rho 4\pi r U^2 (1 + a) a dr \quad (4.26)$$

$$\Delta Q = \rho 4\pi r^3 U^2 (1 + a) a' \Omega dr \quad (4.27)$$

Com as equações 2.17, 2.18, 4.26 e 4.27 temos um sistema de equações não linear que pode ser resolvido de forma iterativa.

A convergência deste sistema, como afirmam Donadon, Savanov, Menezes e Filho (2008), nem sempre é garantida. Devido a isso é usual a aplicação de métodos com relaxação para se resolver este sistema. Esta resolução possui suas próprias tolerâncias por padrão. Tal cálculo é repetido até que a tolerância seja atingida.

Quando os valores dos fatores de indução estiverem dentro da tolerância especificada parte-se para o cálculo do λ ótimo. Partindo de um λ inicial escolhido, que seja pequeno, recalculam-se as velocidades no aerofólio, com os novos valores dos fatores de indução, obtendo-se o novo ângulo φ , que introduzido na equação 2.19, nos dá o coeficiente de potência para o λ corrente. Tal valor é incrementado a cada iteração por um valor escolhido, também a critério. Tal operação é repetida até que um valor de C_p menor que o anterior seja encontrado.

3.4 Resolução do sistema não linear

É utilizado o algoritmo chamado Refletiva da Região de Confiança (*Trust region reflective*) {184} que aproxima uma função simples q que reflete razoavelmente o comportamento da equação $f(x)$, tal qual procuramos a solução. A função q é definida por ponto x .

No método da região de confiança descrito por Moré (1970, p. 626), a aproximação quadrática q é definida pelos dois primeiros termos da aproximação de Taylor para f no ponto x . A vizinhança é usualmente esférica ou elíptica.

Matematicamente o problema da região de confiança é definido como

$$\min \left\{ \frac{1}{2} s^T H s + s^T g \mid \|Ds\| \leq \Delta \right\} \quad (4.28)$$

Onde g é o gradiente de f no ponto x , H é a matriz Hessiana, D uma matriz diagonal e Δ um escalar positivo. Existem ótimos algoritmos para resolução da equação 4.28, mas tais algoritmos tipicamente envolvem a computação de sistemas de auto-vetores e auto-valores inteiros e processo de Newton aplicado a equação

$$\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{\|s\|} = 0 \quad (4.29)$$

Tais algoritmos fornecem uma solução precisa, entretanto eles requerem um tempo proporcional a fatorações severas da matriz Hessiana.

Porém, para problemas de região de confiança é necessária uma abordagem diferente como aproximações e estratégias heurísticas. O método da refletiva da região de confiança restringe o subproblema da região de confiança num subespaço bidimensional S , quando o subespaço S é calculado o trabalho para se solucionar a equação 4.28 se torna trivial mesmo com problemas de auto-valor e auto-vetor.

Neste ponto o foco do trabalho se torna a determinação do subespaço S . Tal espaço é determinado através do processo do conjugado do gradiente pré-condicionado descrito por Branch(1999), onde o solver define S como um espaço linear parametrizado por s_1 e s_2 , onde s_1 está na direção do gradiente g e s_2 uma aproximação da direção de Newton, isto é, uma solução para

$$H \cdot s_2 = -g \quad (4.30)$$

ou a direção da curvatura negativa

$$s_2^T \cdot H \cdot s_2 < 0 \quad (4.31)$$

A filosofia por trás da escolha do S é forçar a convergência global via direção descendente ou direção da curvatura negativa e atingir rapidamente a convergência local via método de Newton. Tal processo é representado pelo fluxograma a seguir

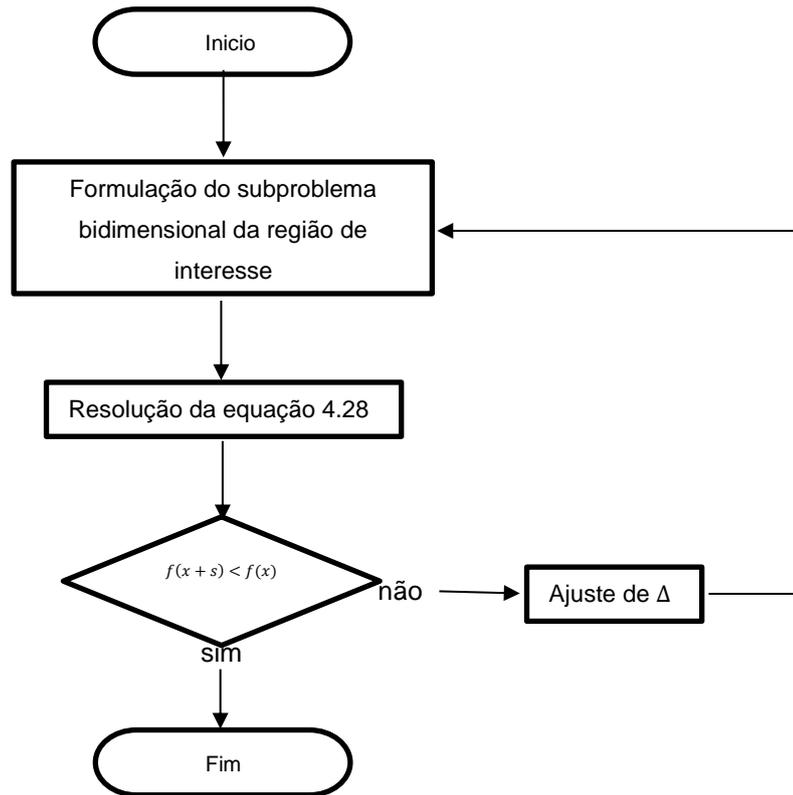


Figura 3.5.1: Fluxograma do Método da refletiva da região de confiança

Fonte: Autor

3.5 Função e inputs

A função desenvolvida em **MATLAB Script**[®] disponível no Apêndice 1 tem como entrada os valores de velocidade do escoamento U , λ inicial, raio do rotor R e valor de λ que se deseja incrementar “increment”. Como saída o número de iterações até o “ C_p ” máximo ser atingido s , o valor de λ correspondente “Optlambda” e o valor total das iterações “iter”, pois como foi dito anteriormente existem no algoritmo iteração em dois níveis, as de nível interno para resolução do sistema não linear e as de nível externo para obtenção do λ . Cada iteração externa tem n iterações internas de modo que a variável iter é a multiplicação dos números de iterações internas pelo número de iterações externas. De forma algébrica

$$iter = iter_{externa} n \quad (4.32)$$

A função chamada de `optlambNT` apresenta sintaxe da forma `[Optlambda,s,iter] = optlambNT(Lambda,U,R,increment)`. O Apêndice 2 descreve de forma sucinta o procedimento do cálculo completo que é abordado na próxima seção.

3.6 Obtenção da geometria ótima

Uma vez obtido o λ ótimo para um dado aerofólio, que neste trabalho foi escolhido o NACA4412, parte-se para geração da geometria, que se entende como sendo: distribuição de cordas e ângulos de fluxo. Através da ferramenta WTdesign e com inputs de potência desejada, densidade do ar, velocidade do vento, λ , razão raio cubo, máximo coeficiente de sustentação, ângulo de ataque para o máximo coeficiente de sustentação e número de pás, conseguimos através do BEM definir inteiramente o projeto aerodinâmico de uma pá, com a máxima extração de potência para casos específicos.

Nota-se que o raio do rotor é utilizado para a obtenção do λ ótimo, mas é também um resultado da função de obtenção da geometria ótima, então supõe-se que seja feito um processo iterativo até que o raio de input para obtenção do λ ótimo seja o mesmo raio de output da função de geometria ótima.

Como a distribuição de cordas é normalizada pelo raio do rotor e as coordenadas do aerofólio pela corda, é desenvolvido um algoritmo para geração desta geometria, que pode ser consultado no Apêndice 2. As coordenadas do aerofólio são apresentadas no Anexo 1. Então se faz necessário multiplicar a matriz de coordenadas do aerofólio por cada corda. A ferramenta WTdesign nos fornece um vetor de 98 cordas desde o cubo até a ponta da pá.

Após tal multiplicação teremos 98 matrizes 35×2 que representam as coordenadas x e y reais de cada elemento de aerofólio. Sabe-se que cada posição do vetor de distribuição de cordas corresponde a um valor de raio da pá de forma que, dividindo o raio pelo número de matrizes, obtemos o incremento para o raio e gera-se um vetor para a coordenada z com 98 valores de raio incremental.

Em seguida é feito um tratamento de dados para que cada matriz tenha um valor fixo de raio, isto é, cada uma das 98 matrizes deve conter um único valor de

raio incremental de forma que a matriz da primeira seção possui raio incremental igual a zero e a próxima igual ao valor do incremento e assim por diante.

Algebricamente temos a triade de pontos na forma

$$x = cx_{aerofolio} \quad (4.33)$$

$$y = cy_{aerofolio} \quad (4.34)$$

$$z(s) = \begin{cases} 0, & s = 1 \\ z + R/98, & s > 1 \end{cases} \quad (4.35)$$

com s variando de 0 a 98 onde c é o vetor de cordas, $x_{aerofolio}$ é a primeira coluna da matriz de coordenadas do aerofólio, $y_{aerofolio}$ a segunda coluna da mesma matriz e s o número da seção do aerofólio que varia de 0 a 98, como dito anteriormente.

A torção que é fornecida em um vetor de mesmo tamanho da distribuição de cordas e que varia com o raio é inserida multiplicando-se os valores de x e y pelo cosseno e seno do ângulo de inclinação respectivamente, somado ao ângulo formado pelas coordenadas do ponto, de forma algébrica

$$x_T = \cos\left(\tan^{-1}\frac{y}{x} + \varphi\right)\sqrt{x^2 + y^2} \quad (4.36)$$

$$y_T = \sin\left(\tan^{-1}\frac{y}{x} + \varphi\right)\sqrt{x^2 + y^2} \quad (4.37)$$

Onde x_T é a coordenada no eixo x com a torção aplicada, y_T a coordenada y com a torção aplicada e φ o ângulo de torção.

Agora que tem-se as 98 matrizes com todos os seus 35 pontos espaciais definidos, juntam-se todas em um único arquivo e tem-se então uma nuvem de pontos que descreve a geometria da pá. Procede-se então para uma representação gráfica de tais pontos.

4 RESULTADOS E COMENTÁRIOS

4.1 Influência da resolução do algoritmo

Utilizando o algoritmo desenvolvido como descrito no capítulo 4, seção 4.2 e 4.4 procede-se as avaliações dos resultados.

Para este estudo são utilizados os valores de raio igual a 14,7 metros, velocidade do vento de 12,5m/s, valor inicial de λ de 0.1 e incremento de 0.01, como mostra a Tabela 1

Tabela 1 – dados de entrada para função optlambNT utilizados neste estudo

Entradas	
λ	0.1
U	12.5 m/s
R	14.7 m
Incremente	0.01

Fonte: Autor

A função retorna valores de λ e iterações como mostrado na Tabela 2

Tabela 2 – dados retornados pela função optlambNT quando calculada com dados da Tabela 1

Saída	
λ	7.6
s	758
iter	1516

Fonte: Autor

Tais resultados estão de acordo com aqueles obtidos por outros estudos para o mesmo aerofólio, como pode ser encontrado na literatura (Burton,2001). O valor de λ ótimo para o aerofólio NACA4412 é próximo de 8, para o máximo coeficiente de potência. A curva deste estudo é apresentada no Gráfico 7.

Pode-se controlar o número de iterações diminuindo ou aumentando o valor da variável incremente. É perceptível que com uma resolução de 0.1 chega-se a um resultado satisfatório, como pode ser visto nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – dados de entrada para função optlambNT utilizados neste estudo, resolução 0.1

Entradas	
λ	0.1
U	12.5 m/s
R	14.7 m
Incremente	0.1

Fonte: Autor

Tabela 4 – dados retornados pela função optlambNT quando calculada com dados da Tabela 3

Saída	
λ	7.8
s	79
iter	158

Fonte: Autor

Percebe-se que o valor do lambda ótimo varia 0.2 devido a redução da resolução e temos uma redução de 679 iterações internas e 1358 externas, que nos leva a concluir que é valioso sempre manter uma baixa resolução desde que satisfatoriamente precisa, já que as tolerâncias dos algoritmos estão na ordem de 10^{-3} .

Neste estudo é utilizada a tolerância de 0.01, por se tratar de um trabalho executado apenas uma única vez. Entretanto, para testes e no decorrer do desenvolvimento do algoritmo, emprega-se a resolução de 0.1, para redução do tempo de cálculo e uma visualização rápida dos resultados.

4.2 Influência do ângulo de ataque

Tais testes, feitos para reconhecimento do comportamento do algoritmo de modo que se percebe que o valor de lambda ótimo praticamente não varia, dentro de um intervalo testado (0.1 a 12), com a variação do raio da pá.

Ao contrapasso destas variáveis a variação do ângulo de ataque aparente, tem sérios impactos nos resultados como podemos observar nos Gráficos (a) e (b) da Figura 4.2.1.

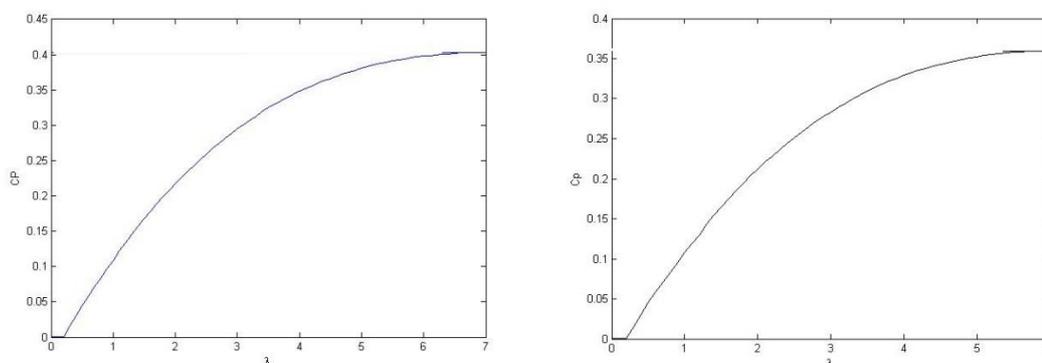


Figura 4.2.1 – λC_p $\alpha = 12$ e 15 respectivamente

Fonte: Autor

Percebe-se que ao se aumentar o ângulo de ataque o coeficiente de potência máximo diminui, isto ocorre por que quando se aumenta o ângulo de ataque partindo-se do valor escolhido para maior razão C_l/C_d o coeficiente de arrasto C_d só aumenta como pode ser visto no Gráfico da Figura 4.2.2, ao diminuir o ângulo o coeficiente de arrasto diminui, mas em contrapartida o coeficiente de sustentação também diminui rapidamente, o que causa uma perda de rendimento e uma consequente diminuição do coeficiente de potencia C_p .

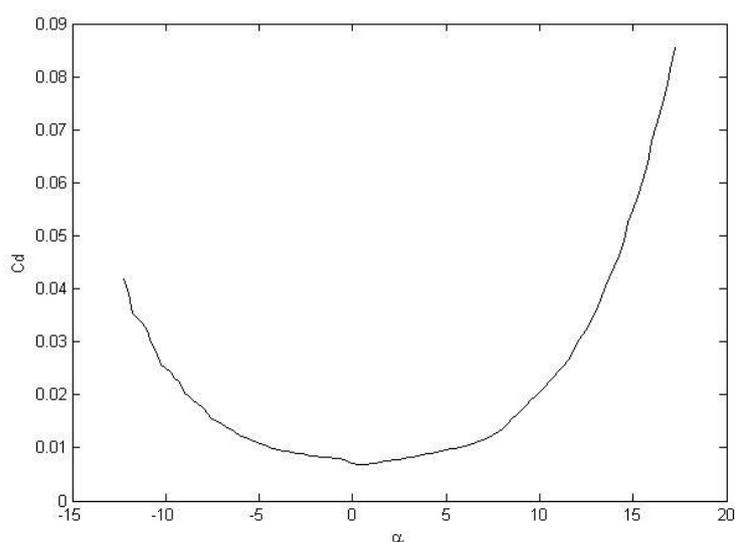


Figura 4.2.2 – αC_d

Fonte: Autor

4.3 λ Ótimo para máxima razão C_l/C_d

Fixando os coeficientes característicos do aerofólio na máxima razão C_l/C_d obtemos o máximo coeficiente de potência, ou seja, a máxima extração de potência do vento

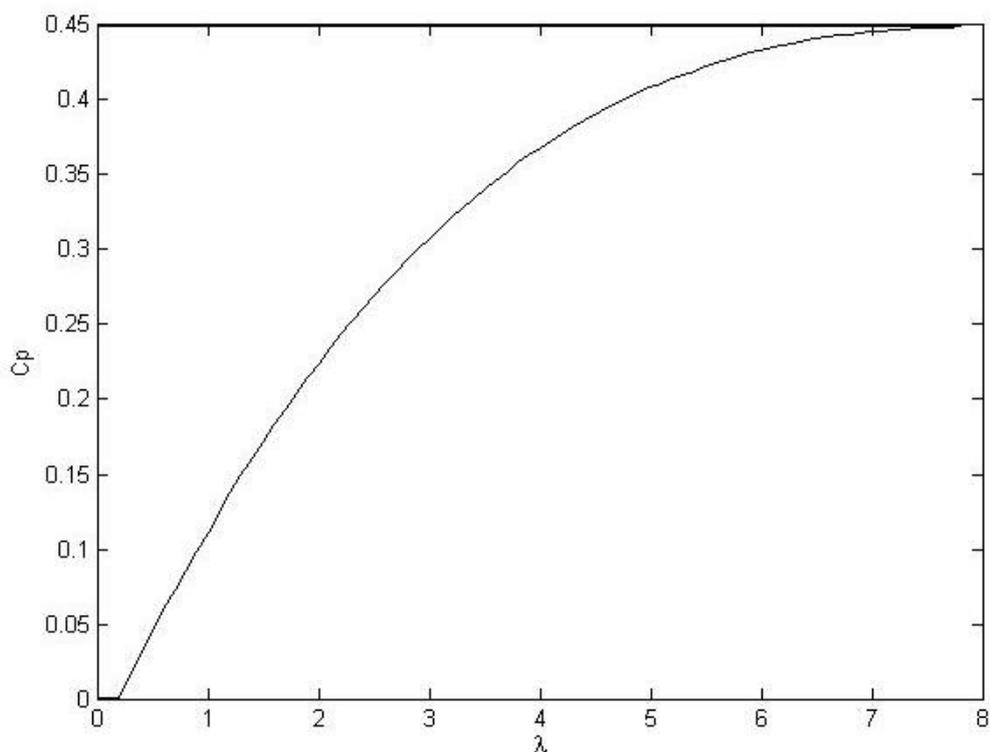
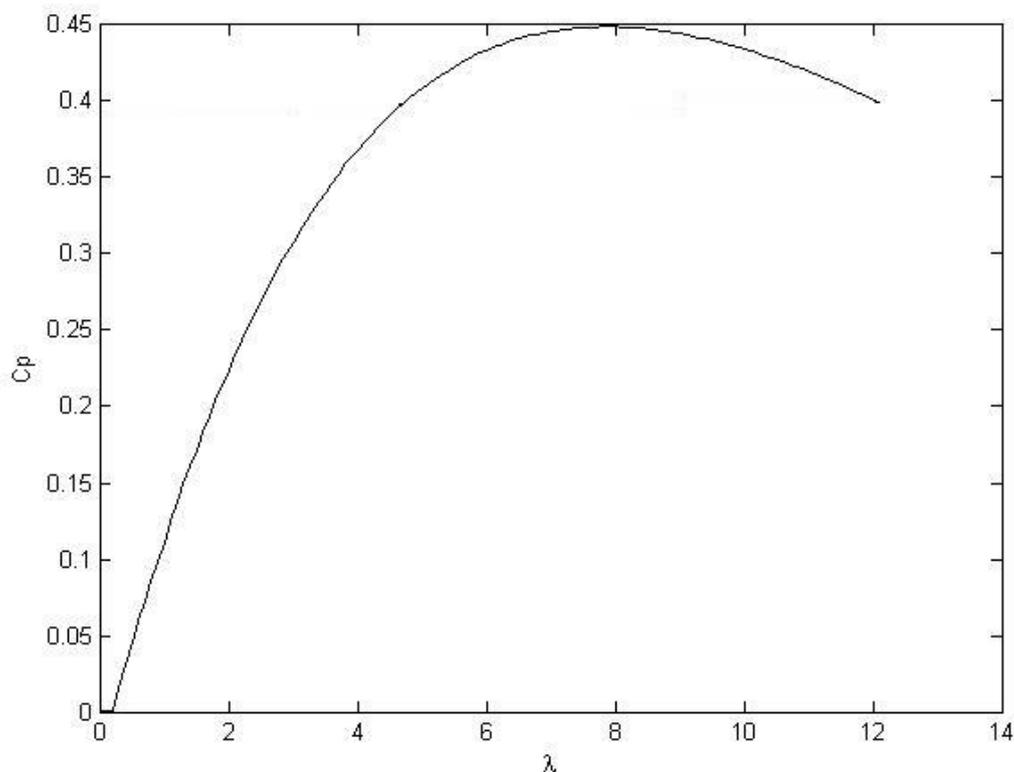


Figura 4.3.1 - λC_p

Fonte: Autor

Pode-se observar que o Gráfico da Figura 4.3.1 termina no λ ótimo devido a condição contida no algoritmo de terminar o cálculo, quando o valor corrente de C_p for menor que o valor anterior. Agora que já se sabe que a partir do λ igual a 7.6 o comportamento da função proposta por Gash e Twele (2002) apresenta um decréscimo em certa escala, podemos gerar um gráfico com mais valores de λ para observar o comportamento da função.

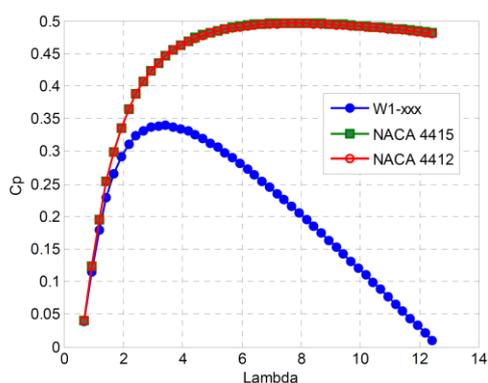
É gerado um gráfico com os valores de λ variando do valor de entrada da Tabela 1 até 12, tais resultados são apresentados no Gráfico da Figura 4.3.2, para gerar tal gráfico apenas é retirada a condição de convergência da função e estabelecido uma faixa de variação para λ .

Figura 4.3.2 - $\lambda \times C_p$

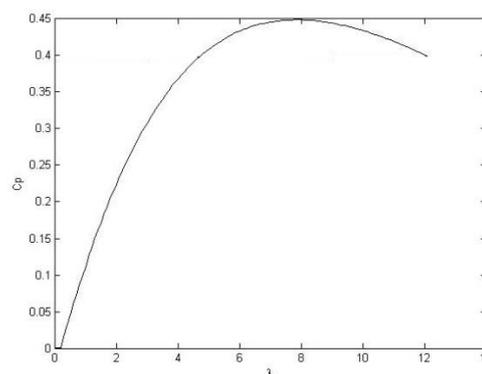
Fonte: Autor

Pode-se observar que o Gráfico 8 está de acordo com a curva gerada pela equação 2.7 e por curvas disponíveis na literatura para este mesmo aerofólio. O coeficiente de potência apresenta um comportamento decrescente após o valor do λ ótimo o que nos garante a funcionalidade do algoritmo implementado e desenvolvido neste trabalho.

É notável que o coeficiente máximo de potência alcançado neste trabalho é um pouco menor que os apresentados na literatura (Donadon,2008) como pode ser visto no comparativo entre os gráficos das Figuras 4.3.3 e 4.3.4, isto provavelmente se deve a fonte dos dados do aerofólio, que são dados adquiridos por testes físicos e possuem uma certa variação o que implica em uma variação no coeficiente de potência, caso as fontes sejam diferentes.

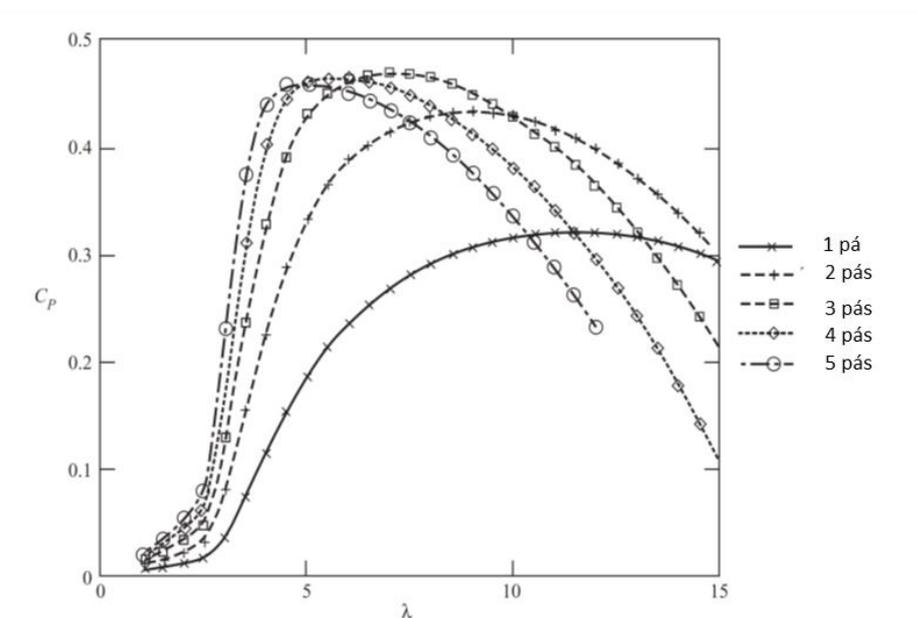
Figura 4.3.3 – C_p vs λ

Fonte: Donadon(2008)

Figura 4.3.4 – C_p vs λ

Fonte: Autor

Pode-se verificar tal variação em outros estudos, uma boa noção desta variação é apresentada por Burton(2001) no Figura 4.3.5

Figura 4.3.5 – C_p s típicos para número de pás

Fonte: Burton(2001)

Percebe-se que para os rotores com 3 pás, como o que é objeto deste estudo, que o coeficiente de potência não atinge o limite de Betz, ficando próximo de 0,45 assim como o deste estudo.

4.4 Geometria

São escolhidos como dados para geração da geometria, Potência de 24000 Watts, velocidade do vento igual a velocidade utilizada para obtenção do λ 12.5 m/s, densidade do ar igual a utilizado no algoritmo optlamNT de 1.293 Kg/m³, λ igual a saída da função criada neste trabalho optlamNT de 7.8, razão cubo ponta igual do algoritmo para obtenção do λ 0.018, máximo coeficiente de sustentação de acordo com o Gráfico 4 no valor de 1.55, ângulo onde ocorre o máximo coeficiente de sustentação de acordo como o Gráfico 4 no valor de 15°, número de pás igual ao utilizado para definição do λ ótimo de 3.

Todas as entradas da função WTdesign podem ser vistas de forma organizada na Tabela 5

Tabela 5 – dados de entrada para função WTdesign utilizados neste estudo

Entradas	
Potência	24000 Watts
Velocidade do vento	12.5 m/s
Densidade do ar	1.293 Kg/m ³
λ	7.6
Razão cubo raio	0.018
Máximo coeficiente de sustentação	1.55
Ângulo para máximo coeficiente de sustentação	15°
Número de pás	3

Fonte: Autor

A função retorna um valor diferente do raio utilizado inicialmente para obtenção do λ ótimo. Corrige-se o λ ótimo para o raio retornado 14,7m sem muita variação dos resultados e recalcula-se. Os valores apresentados já são os valores recalculados.

O perfil de cordas em função do raio e a variação do raio normalizado pelo raio gerado, que é utilizado para criação da geometria, pode ser visto na Figura 4.4.1, assim como a variação do ângulo de torção em função do raio no Figura 4.4.2. Estes

gráficos, juntamente com o *dat file* do aerofólio NACA4412 disponível no Anexo 1, fornece todos os dados necessários para criação gráfica e fabricação da geometria.

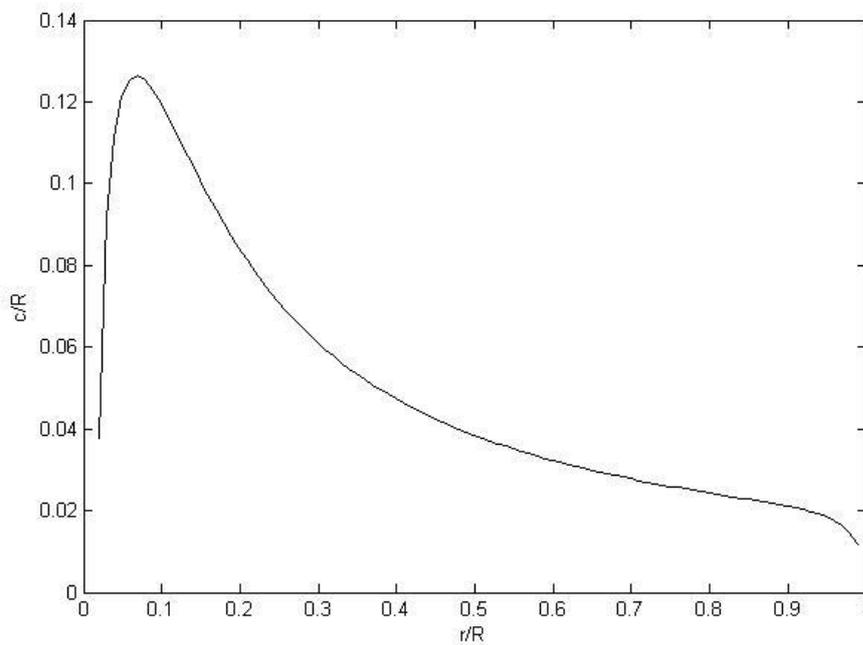


Figura 4.4.1 - Distribuição de cordas

Fonte: Autor

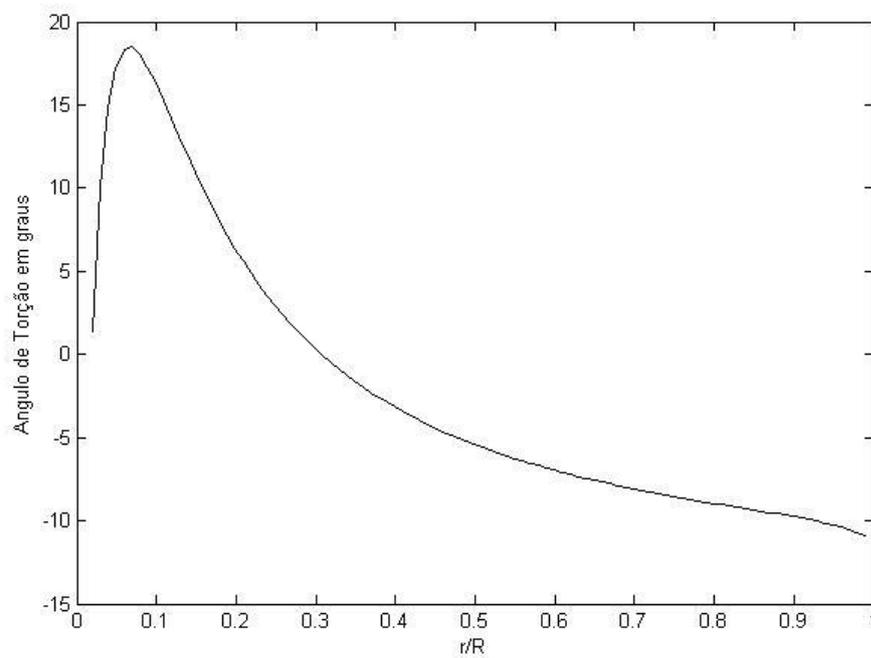


Figura 4.4.2 – Ângulo de torção

Fonte: Autor

Utilizando o algoritmo desenvolvido como descrito no capítulo 4, seção 4.5 e disponível no Apêndice 2, é gerado um arquivo que passa pelo tratamento de uma função disponível no repositório do *mathworks file exange*, para se gerar um arquivo no formato DXF. Este arquivo, que ainda é uma nuvem de pontos, é uma representação gráfica da pá projetada, como mostra a Figura 4.4.3:

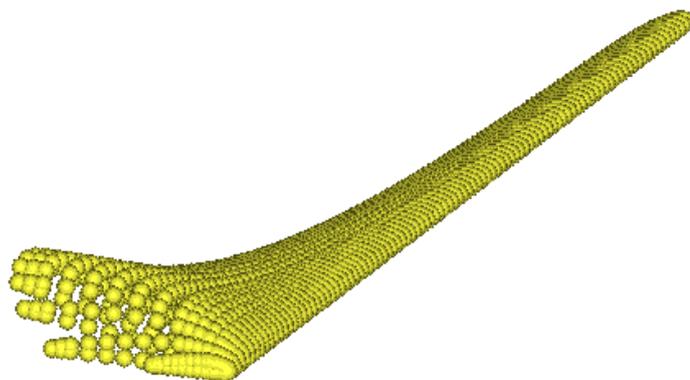


Figura 4.4.3: Nuvem de pontos

Fonte: Autor

A partir deste arquivo de pontos, utilizando-se uma ferramenta CAD, é desenhada de fato uma geometria de superfícies e em seguida gerado um modelo sólido que pode agora ser utilizado para análises como, CFD e até fabricação.

O sólido gerado pode ser visualizado na Figura 4.4.4:



Figura 4.4.4: Modelo CAD

Fonte: Autor

A geometria também pode ser vista de forma interativa em um .pdf gerado pelo software **SolidWorks**[®], através deste [link](#).

5 CONCLUSÕES

Neste estudo, conclui-se que o máximo coeficiente de potência é obtido fixando-se o ângulo de ataque de cada aerofólio elementar no ângulo correspondente a máxima razão entre os coeficientes de sustentação e arrasto gerando uma torção na pá, o que é natural, pois um ângulo em que o coeficiente de sustentação seja alto nos dá o maior torque na pá, entretanto se o coeficiente de arrasto também for grande, parte da energia será perdida por atrito e o torque, conseqüentemente diminuirá.

O valor de lambda correspondente a tal coeficiente de potência máximo foi calculado pelo código numérico desenvolvido neste trabalho para as condições específicas deste estudo chegando-se ao valor de 7.6.

Tal valor está alinhado com valores disponíveis nas literaturas como explanado por Donadon, Savanov, Menezes e Filho (2008) e Burton (2001) dentre outros.

Neste trabalho foi apresentado a otimização aerodinâmica da pá de gerador eólico de eixo horizontal. Resultados mostram que para uma velocidade de ponta de 7.6, para um aerofólio padrão NACA4412, o coeficiente máximo de potência é obtido e que tal coeficiente diminui quando se afasta do ângulo de ataque correspondente a máxima razão Cl/Cd .

Os resultados, apesar de diferirem de algumas literaturas na ordem de 0.05 para o coeficiente de potência, estão dentro da variação que as mesmas apresentam entre si.

Não foi possível o desenvolvimento de uma interface gráfica e a montagem de todos os scripts para compilação de um aplicativo, devido à dificuldade e complexidade na obtenção dos fatores de indução.

Inicialmente achava-se que o maior desafio estava nas iterações para se achar o lambda ótimo, entretanto no decorrer dos estudos o verdadeiro desafio se tornou a obtenção dos fatores de indução que exigiram o estudo de métodos de resolução de sistemas não lineares que nem sempre convergem.

Recomenda-se para próximos trabalhos:

- A união dos códigos desenvolvidos e utilizados neste trabalho
- A criação de uma interface gráfica
- O desenvolvimento de um código para visualização 3D instantânea
- A compilação dos itens anteriores em um aplicativo independente
- Análise CFD da geometria gerada e a validação da extração de potencia

REFERÊNCIAS

AIRFOIL TOOLS. Disponível em:

< <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca4412-il>> . Acesso em: 17 mai. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA, **Boletim de dados jun. de 2015**, São Paulo, SP, 2015, disponível em:

<<http://www.abeeolica.org.br/pdf/Boletim-de-Dados-ABEEolica-Junho-2015-Publico.pdf>>. Acesso em: 16 jun. 2015, 10:30.

BURTON, TONY ET AL. **Wind Energy Book**. John Wiley & sons, 2001.

BRANCH, M.A., T.F. COLEMAN, AND Y.LI, **A Subspace, Interior, and Conjugated Gradient Method for Large-Scale Bound-Constrained Minimization Problems**, SLAM Journal on Scientific Computing, Vol. 21, Number1, pp 1-23, 1999

DUTRA, R. **Energia Eólica. Princípios e tecnologias**. Rio de Janeiro: CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sergio de Salvo Brito, 2009.

DA SILVA, Cláudio Tavares. **Método do Elemento de Pá Não Estacionário Aplicado ao Projeto de Pás de Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal**.162f. Tese de Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2012.

DONADON, Mauricio; SAVANOV, Roman; MENEZES, João; FILHO, Lindolfo. **A Numerical Tool To Design Blades For Horizontal Axis Wind Turbines With Variable Geometry**. V Congresso Nacional De Engenharia Mecânica, Salvador, Bahia,2008.

E. HAU, **Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics**, Springer, Berlim, 2006.

GASH, R. AND TWELE, J., **Wind Power Plants**, Ed. James & James (Science Publishers) Ltd., London, UK, 2002.

LEITE, M. A. **Impacto Ambiental das Usinas Hidrelétricas**. II Semana do Meio Ambiente. UNESP.Ilha Solteira, junho 2005.

MORÉ, J.J. AND D.C., SORENSEN, **Computing a Trust Region Step**, SLAM Journal on Numerical Analysis, Vol. 20, pp 626-637, 1983.

TOLMASQUIM, MAURÍCIO T. ET AL. **ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS SUSTENTÁVEIS NO BRASIL**. Editora Relume Dumará. Rio de Janeiro, 2004.anexo

6 APÊNDICE 1

```

function [Optlambda,s,iter] = optlambNT(Lambda,U,R,increment)
%%OPTLAMB
% Trabalho a presentado como criterio de avaliação para disciplina de
% conclusão de curso 2 na UNIVERSIDADE TECNOLOGICA FEDERAL DO PARANA.
% inputs:
%   Lambda = velocidade adimensional conhecida por velocidade de ponta.
%   U = velocidade do escoamento no sitio.
%   R = Raio do rotor.
%   increment = valor a ser incrementado no valor inicial de lambda.
% outputs:
%   OPTLAMBDA = retorna o valor otimo de lambda.
%   S = retorna numero de iterações.
%   ITER = numero total de iterações.
% sintaxe:
%   [Optlambda,s,iter] = optlambNT(Lambda,U,R,increment)
%   sintaxe simples optlambNT(Lambda,U,R,increment)
%para mais informações consultar CHEIM, V.M., "Otimização de Projeto
%Aerodinâmico de Pá de Gerador Eólico Empregando o Método de Elemento de Pá
%Estacionario," UTFPR, DAMEC,Curitiba, 2016.
N = 3;
c=0.85;
into1 = 0.001;
Pho = 1.293;
aa = 0.28;
a_linha = 0.2;
s = 2;
Cp = zeros(500);
Cp(1) = 1e-6;
Cp(2) = 1e-5;
Cp(3) = 2e-4;
Lamb = zeros(500);

while Cp(s) > Cp(s-1)
%for Lambda = 0.1:0.1:12
    Lambda_h = Lambda*(0.018);
    tola1 = 0.008;
    tola = tola1;
    k =1;
    while tola1 > into1 && tola > into1
        if k == 1
            a(1) = aa;
            a(2) = a_linha;
        else
            aa = a(1);
            a_linha = a(2);
        end
        Omega_R = U*Lambda/R;
        V_0_R = U + aa*U;
        theta = -3.5;
        alpha = 7.25;
    end
end

```

```

if -12.25 <= alpha && alpha <= 17.25

    p1 = -1.313e-06 ;
    p2 = -9.308e-05;
    p3 = -0.001177;
    p4 = 0.1113;
    p5 = 0.4977;

    C1 = p1*alpha^4 + p2*alpha^3 + p3*alpha^2 + p4*alpha + p5;

    ad0 = 7.596e-07;
    ad1 = -2.015e-06 ;
    ad2 = 7.429e-05;
    ad3 = -8.107e-05;
    ad4 = 0.007682;

    Cd = ad0*alpha^4 + ad1*alpha^3 + ad2*alpha^2 + ad3*alpha + ad4;

else
    msgbox('Fora da amostra')
    plot(Lamb,Cp);
    stop()
end
dT_R = @(r) 0.5*Pho*(sqrt((V_0_R^2+(Omega_R*r-
a_linha*Omega_R*r)^2)))^2*c*(C1*cosd(atan((V_0_R/(Omega_R*r-a_linha*Omega_R*r))+theta)))+
Cd*sind(atan((V_0_R/(Omega_R*r-a_linha*Omega_R*r))+theta)))*N;
dQ_R = @(r) 0.5*Pho*(sqrt((V_0_R^2+(Omega_R*r-
a_linha*Omega_R*r)^2)))^2*c*(C1*sind(atan((V_0_R/(Omega_R*r-a_linha*Omega_R*r))+theta)))+
Cd*cosd(atan((V_0_R/(Omega_R*r-a_linha*Omega_R*r))+theta)))*N*r;
T = integral(dT_R,0.01,R,'ArrayValued',true);
Q = integral(dQ_R,0.01,R,'ArrayValued',true);

F = @(a) [T - Pho*2*pi*R^2*U^2*(1+a(1))*a(1);
Q - Pho*pi*R^4*U^2*(1+a(1))*a(2)*Omega_R];
x0 = [a(1);a(2)];
options = optimoptions('fsolve','Display','iter','Algorithm','trust-region-
reflective');
[a,~,exitflag] = fsolve(F,x0,options);
if exitflag == 2 || exitflag == 1 || exitflag == 3 || exitflag == 4
    to1a = abs(a(1)-aa);
    to1a1 = abs(a(2)-a_linha);
    k = k +1;
else
    msgbox('sistema sem solução')
    stop()
end
end

V_0 = U + a(1)*U;
alpha = alpha;

CL = p1*alpha^4 + p2*alpha^3 + p3*alpha^2 + p4*alpha + p5;

CD = ad0*alpha^4 + ad1*alpha^3 + ad2*alpha^2 + ad3*alpha + ad4;

```

```

    DCp = @(lambda_r) (sind(atan(v_0/(lambda_r*U-
a_linha*lambda_r*U))+theta))^2*(cosd(atan(v_0/(lambda_r*U-a_linha*lambda_r*U))+theta)-
lambda_r*sind(atan(v_0/(lambda_r*U-a_linha*lambda_r*U))+theta))*(sind(atan(v_0/(lambda_r*U-
a_linha*lambda_r*U))+theta)+lambda_r*cosd(atan(v_0/(lambda_r*U-
a_linha*lambda_r*U))+theta))*(1-(CD/CL)*cotd(atan(v_0/(lambda_r*U-
a_linha*lambda_r*U))+theta))*lambda_r^2);
    vcp = integral(DCp,Lambda_h,Lambda,'ArrayValued',true);
    Cp(s+1) = ((8/Lambda^2)*vcp);
    Lambda = Lambda + increment;
    Lamb(s) = Lambda;
    s = s+1;
end
iter = s*k;
Optlambda = Lambda;
plot(Lamb,Cp);
end

```

[Published with MATLAB® R2013a](#)

7 APÊNDICE 2

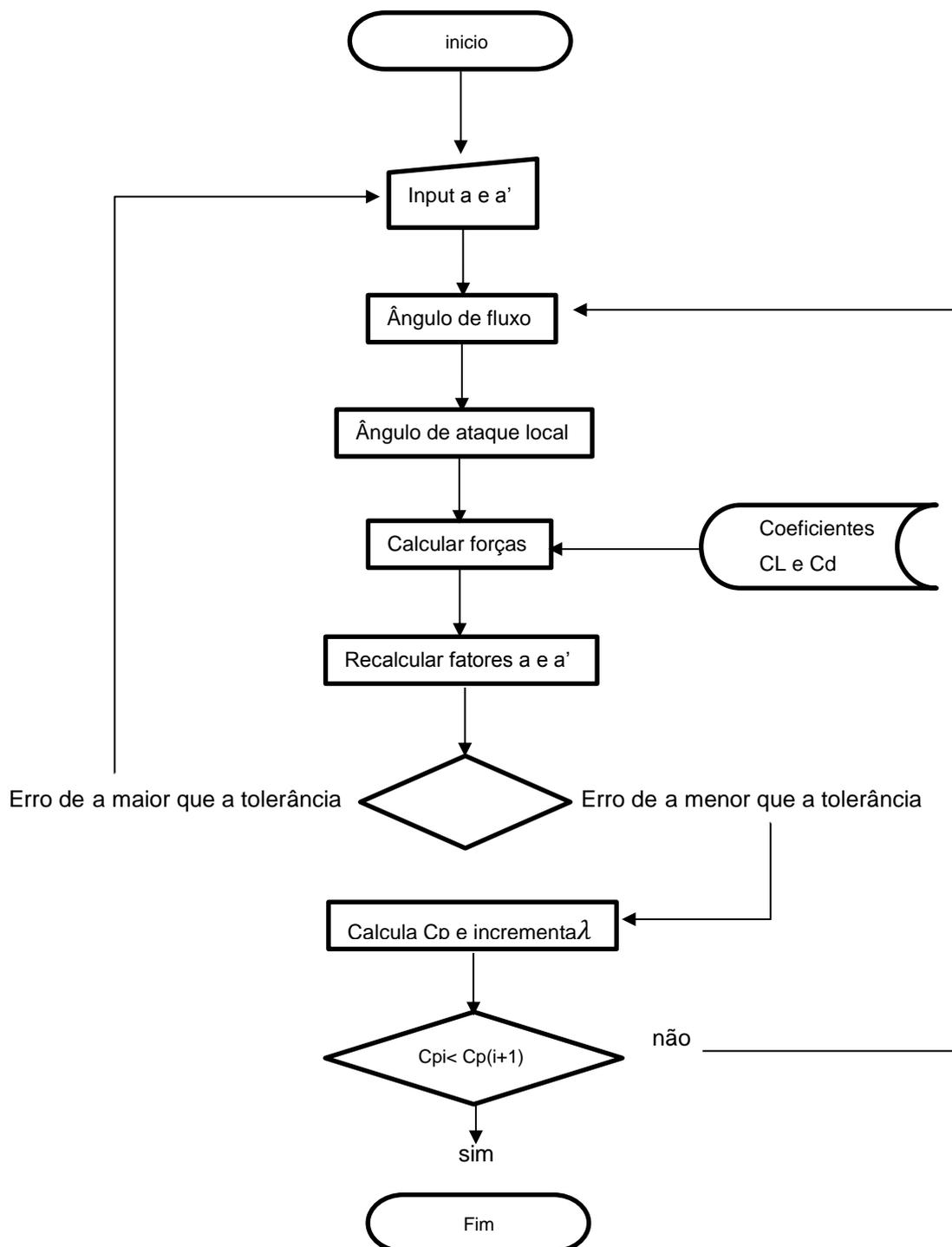
```

clear all
load('TCC_geo.mat');
naca = load('naca4412c.dat');
r=0:0.142:14;
z = zeros(35,1);
N = 98;
f = cellstr(num2str((1:N)', '%d.mat'));
for i =1:98
    xy = c(i).*naca;
    z(:,1) = r(i);
    blade = [xy(:,1) xy(:,2) z];
    name = f{i};
    save(name,'blade');
end
clear all

N = 98;
f = cellstr(num2str((1:N)', '%d.mat'));
k = 1;
twist = load('twist.dat');
for l =1:97
    load(f{l});
    while k == 1
        for u = 1:35
            for col = 1:3
                geo_global(u,col) = blade(u,col);
                k = k+1;
            end
        end
    end
    load(f{l+1});
    for i = 1:35
        m = size(geo_global,1);
        geo_global(1+m,1) =
cosd(atan2(blade(i,2)/blade(i,1))+twist(l))*(sqrt(blade(i,1)^2+blade(i,2)^2));
        geo_global(1+m,2) =
sind(atan2(blade(i,2)/blade(i,1))+twist(l))*(sqrt(blade(i,1)^2+blade(i,2)^2));
        geo_global(1+m,3) = blade(i,3);
    end
end
FID = dxf_open('pa_2.dxf');
dxf_point(FID,geo_global(:,1),geo_global(:,2),geo_global(:,3))

```

8 APÊNDICE 3



9 ANEXO 1

x	y
1.0000	0.0013
0.9500	0.0147
0.9000	0.0271
0.8000	0.0489
0.7000	0.0669
0.6000	0.0814
0.5000	0.0919
0.4000	0.0980
0.3000	0.0976
0.2500	0.0941
0.2000	0.0880
0.1500	0.0789
0.1000	0.0659
0.0750	0.0576
0.0500	0.0473
0.0250	0.0339
0.0125	0.0244
0.0000	0.0000
0.0125	-0.0143
0.0250	-0.0195
0.0500	-0.0249
0.0750	-0.0274
0.1000	-0.0286
0.1500	-0.0288
0.2000	-0.0274
0.2500	-0.0250
0.3000	-0.0226
0.4000	-0.0180
0.5000	-0.0140
0.6000	-0.0100
0.7000	-0.0065
0.8000	-0.0039
0.9000	-0.0022
0.9500	-0.0016
1.0000	-0.0013

Fonte: Airfoiltools.com