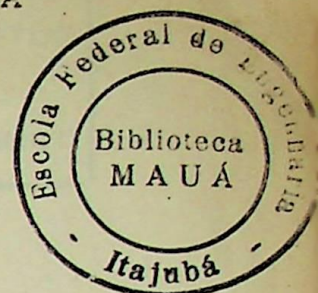


TESE

529

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ



MÉTODOS ADIMENSIONAIS PARA PROJETO AERODINÂMICO DAS PÁS  
DE TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL

E

CÁLCULO DA VELOCIDADE INDUZIDA

por

*Abbott, I. H. and Van Dornhoff  
Theory of wing sections  
London, MacGraw-Hill 1945*

JÚLIO SANTANA ANTUNES

Orientador. Prof. TAPAN KUMAR SEN

Dissertação apresentada para obtenção do Grau de Mestre em Ciências

Engenharia Mecânica

Itajubá

Fevereiro - 1968

CLASS. 533.6.001.63: 621.547(043.2)  
CUTT. A 627 W  
TOMBO 529

A G R A D E C I M E N T O S

Ao Prof. Tapan Kumar Sen pela orientação e dedica  
ção.

Aos Profs. Sebastião Varella e Júlio César Tibúr-  
cio por terem intercedido junto a CAPES, no fornecimento de  
bolsa de estudo.

Aos funcionários do Centro de Processamento de Da  
dos da EFEI.

A Célia de Oliveira pelos serviços de datilogra -  
fia.

Aos meus amigos e todos aqueles que de alguma ma  
neira me incentivaram.

Sinceramente

Júlio Santana Antunes

Aos meus pais, esposa e  
filhos

## RESUMO

Dentre os métodos para projeto aerodinâmico das pás de turbinas eólicas de eixo horizontal, pode-se citar o de Wilson et al., que é um método que precisa adotar valores dimensionais.

Baseado no método de Wilson et al., são desenvolvidos dois métodos adimensionais para projeto aerodinâmico de turbina eólica de eixo horizontal, a saber: um método iterativo e outro não iterativo. Ambos os métodos consideram o fator de perda de Prandtl ou Goldstein, como sendo um ( $F = 1$ ) para escoamento bidimensional e diferente de um ( $F \neq 1$ ) para escoamento tridimensional.

Um outro tema abordado trata de um método de solução para o modelo proposto por Nogueira, S.L.. E baseado no seu modelo, faz-se verificação da velocidade induzida em rotores de eixo horizontal em turbina eólica, ser dada por:  $V_i = V_\infty \cdot (1 - 2a)$ .

ABSTRACT

Of the existing methods, in order to design calculation of aerodynamical project of blade of wind turbine of horizontal axis, the most important method is due to Wilson et al; a method which inevitably requires dimensional parameters to be adapted.

Based on the method of Wilson et al, the following, two non-dimensional methods have been developed in order to design aerodynamical project of wind turbine of horizontal axis: The first one is iterative method and the other being non-iterative. Both the methods consider the loss-factor of PRANDTL or Goldstein, as being one ( $F = 1$ ) for two-dimensional flow and different than one ( $F \neq 1$ ) for tri-dimensional flow.

The another idea (theme) considered which deals with a method of solution to the model proposed by NOGUEIRA, S.L. Based on his model a verification of induced velocity in rotors of wind turbine of horizontal axis has been done and can be proved to be given by:  $V_i = V_\infty \cdot (1-2a)$ .

## NOMENCLATURA

$a = \frac{1}{2} \cdot (1 - \frac{V_s}{V_\infty})$	- fator de indução axial
$a' = \frac{w}{2 \Omega}$	- fator de perturbação rotacional
$a^+$	- fator de indução axial adimensional
$a'^+$	- fator de perturbação rotacional adimensional
$A_t$	- área da turbina eólica
$B$	- número de pás
$c$	- corda
$C_D$	- coeficiente de arrasto
$C_L$	- coeficiente de sustentação
$C_P = \frac{P_{ex}}{P_{disp}}$	- coeficiente de potência
$C_Q$	- coeficiente de torque
$C_T$	- coeficiente de empuxo
$d_A$	- elemento de área
$dD$	- elemento da força de arrasto
$dL$	- elemento da força de sustentação
$dQ$	- torque do elemento de pá

$dT$	- tração do elemento de pá
$D$	- força de arrasto
	$f = \frac{B}{2} \cdot \frac{(1-r/R)}{\sin \phi}$ e $F = \frac{2}{\pi} \cdot \cos^{-1}(e^{-f})$
$f, F$	- fator de perda de Prandtl ou Goldstein
$F_A$	- força axial
$F_Q$	- força de torque
$F_T$	- força de empuxo
$KT = 1/\bar{R}$	- coeficiente de arrasto/coeficiente de sustentação
$L$	- força de sustentação
$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot V_h$	- vazão em massa de ar
$N$	- rotação por segundo
$P$	- pressão
$P_a, P_b, P_c$	- pressões no disco atuador
$P_{disp} = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_\infty^3$	- potência disponível
$P_{ex}$	- potência extraída
$P_o$	- potência de saída
$P_{omax}$	- potência de saída máxima
$P_t$	- potência total
$R$	- raio da pá
$r$	- raio do elemento de pá

- $\bar{R} = C_L/C_D$  - coeficiente de sustentação/coeficiente de arrasto
- $RR = r/R$  - relação de raios
- $V_a, V_b$  - velocidades no disco atuador
- $V_h = (1-a) \cdot V_\infty$  - velocidade através da hãlice
- $V_i$  - velocidade induzida
- $V_R$  - velocidade relativa
- $V_s$  - velocidade de saída
- $V_\infty$  - velocidade livre
- $W$  - velocidade real da lâmina de vórtice
- $x = \frac{r\Omega}{V_\infty}$  - razão de velocidade local
- $x', x^+$  - parâmetros adimensionais de cálculo, eqs. (4-23), (5-2)
- $Y = \frac{V_i}{V_\infty}$  - velocidade induzida/velocidade livre
- $Y_{AD}$  - relação y obtida do Método Adimensional
- $Y_{GL}$  - relação y obtida do Método de Glauert
- $Y_{GR}$  - relação y obtida do Método de Griffiths
- $Y_{PR}$  - relação y obtida do Método Proposto
- $Y_{SH}$  - relação y obtida do Método de Shepherd

$Y', Y^+$  - parâmetros adimensionais de cálculo, eqs. (4-25) ,  
(5-5)

## LETRAS GREGAS

- $\alpha$  - ângulo de ataque
- $\alpha'$  - ângulo entre a linha neutra e a velocidade  $W$
- $\eta$  - rendimento da turbina
- $\eta_{omax}$  - rendimento máximo da turbina
- $\eta_R$  - rendimento do rotor
- $\theta$  - ângulo da pá (construtivo)
- $\theta$  - ângulo entre velocidade  $W$  e velocidade relativa,  $V_R$
- $\lambda$  - razão de velocidades (na ponta)
- $\phi$  - ângulo entre o plano horizontal e velocidade relativa  $V_R$  (ângulo do plano de rotação)
- $\phi'$  - ângulo total
- $\rho$  - massa específica do ar
- $\sigma = \frac{Bc}{2\pi r}$  - solidez
- $\overline{\sigma C_L}$  - produto solidez . coeficiente de sustentação corri -  
gido
- $\Omega$  - velocidade angular
- $\omega$  - velocidade rotacional do fluido

## ABREVIACOES

MEI	Método Experimental de Iwasaki
MG	Método de Glauert
MI, MIF1	Método Iterativo com $F = 1$
MNI, MNIF1	Método Não Iterativo com $F = 1$
MNIF, MNIF $\neq 1$	Método Não Iterativo com $F \neq 1$
MS	Método de Shepherd
TDA	Teoria do Disco Atuador
TEP	Teoria do Elemento de P
TVQM	Teoria da Variao da Quantidade de Movimento
VVI	Verificao da Velocidade Induzida

LISTA DE FIGURAS

	PÁG.
Figura 1. Representação esquemática dos diversos tipos de turbinas eólicas .....	16
Figura 2. Comparação entre os diversos tipos de rotores .....	16
Figura 3. Tipo de turbina eólica, rotor hélice :....	17
Figura 4. Diagrama de Velocidades (MG) .....	20
Figura 5. Triângulo de Velocidades .....	58
Figura 6. Triângulo de Velocidades (VVI) .....	67
Figura 7. Diagrama de Velocidades Reais.....	82

## LISTA DE GRÁFICOS

	PÁG.
Gráfico 1. Variação do Coeficiente de Potência em função da Razão de Velocidades - (MG) ..	27
Gráfico 2. Variação do Coeficiente de Potência em função da Razão de Velocidades para valores de $\bar{R}$ (MS) .....	32
Gráfico 3. Variação do Coeficiente de Potência em função da Razão de Velocidades (MEI) ..	34
Gráfico 4. Variação do Coeficiente de Potência em função da Razão de Velocidades para diversos valores de $\bar{R}$ , quando $F = 1$ (MI).	41
Gráfico 5. Variação do Coeficiente de Potência em função da Razão de Velocidades para diversos valores de $\bar{R}$ , considerando $F = 1$ (MNI) .....	46
Gráfico 6. Variação do Coeficiente de Potência em função da Razão de Velocidades para diversos valores de $\bar{R}$ , considerando $F \neq 1$ (MNIF) .....	47
Gráfico 7. Comparação entre o Método de Glauert e os Métodos Adimensionais Iterativos e Não Iterativo, para $\bar{R} = \infty$ e $F = 1$ ...	50
Gráfico 8. Comparação entre o Método de Shepherd e os Métodos Adimensionais Iterativo e Não Iterativo, para $\bar{R} = \infty$ e $F = 1$ .....	51
Gráfico 9. Comparação entre o Método de Griffiths e os Métodos Adimensionais Iterativo e Não Iterativo, para $\bar{R} = \infty$ e $F = 1$ ...	52

Gráfico 10.	Comparação entre os Métodos de Shepherd e Griffiths com os Métodos Adimensionais Propostos para $\bar{R} = 30$ e $F = 1$ ....	54
Gráfico 11.	Comparação entre o Método Experimental de Iwasaki e o Método Adimensional Não Iterativo para $\bar{R} = 30$ e $F \neq 1$ .....	55
Gráfico 12.	Comparação entre o Método Experimental de Iwasaki e o Método Adimensional Não Iterativo para $F \neq 1$ e vários valores de $\bar{R}$ .....	56
Gráfico 13.	Variação da relação $y$ em função da Razão de Velocidades local, através do Método de Solução Proposto .....	66
Gráfico 14.	Relação $y$ de diversos modelos em função da Razão de Velocidades local .....	79
Gráfico 15.	Relação $y$ dos Modelos de Griffiths, Nogueira e Proposto em função da Razão de Velocidades local .....	81

## LISTA DE TABELAS

	PÁG.
Tabela 1. Coeficiente de Potência em função da Razão de Velocidades - (MG) .....	26
Tabela 2. Coeficiente de Potência em função da Razão de Velocidades para diversos valores de $\bar{R}$ - (MS) .....	31
Tabela 3. Coeficiente de Potência em função da Razão de Velocidades - (MEI) .....	33
Tabela 4. Coeficiente de Potência em função da Razão de Velocidades para diversos valores de $\bar{R}$ - (MI) .....	40
Tabela 5. Coeficiente de Potência em função da Razão de Velocidades para diversos valores de $\bar{R}$ e $F = 1$ (MNI) .....	44
Tabela 6. Coeficiente de Potência em função de Razão de Velocidades para diversos valores de $\bar{R}$ e $F \neq 1$ (MNIF) .....	45
Tabela 7. Comparação de Coeficiente de Potência em função da Razão de Velocidades, para $\bar{R} = \infty$ e $F = 1$ .....	49
Tabela 8. Comparação de Coeficiente de Potência em função da Razão de Velocidades, para $\bar{R} = 30$ .....	53
Tabela 9. Variação de $y$ (velocidade induzida dividida pela velocidade livre) em função da Razão de Velocidades local .....	65

Tabela 10.	Comparaçãõ da relaçaõ y em funçaõ da Razãõ de Velocidades local .....	77
Tabela 11.	Valores de relaçaõ y obtidos dos Méto- dos de Griffiths, Nogueira e Proposto para diversos valores de Razãõ de Ve- locidades local .....	80

## ÍNDICE

	PÁG.
I - Introdução .....	01
II - Revisão Bibliográfica .....	03
III - Turbina Eólica .....	08
III.1. Histórico .....	08
III.2. Aplicações de Energia Eólica no Brasil..	11
III.3. Geração de Eletricidade .....	12
III.4. Tipos de Turbinas Eólicas .....	13
III.5. Rotores de Eixo Horizontal .....	17
IV - Métodos Existentes para Cálculo do Coeficiente de Potência em Turbina Eólica de Eixo Horizon - tal .....	19
IV.1. Modelo de Glauert .....	19
IV.2. Método de Wilson et al .....	27
IV.3. Método de Shepherd .....	30
IV.4. Método Experimental de Iwasaki .....	32
V - Métodos Propostos .....	35
V.1. Método Adimensional Iterativo .....	35
V.2. Método Adimensional Não Iterativo .....	42
V.3. Comparação dos Métodos Propostos com Ou- tros Métodos .....	48
VI - Velocidade Induzida em Turbina Eólica de Eixo Horizontal .....	57
VI.1. Um Método de Solução para o Modelo propos- to por Nogueira [ 7 ] .....	57

	PÁG.
VI.2. Verificação da Velocidade Induzida ser dada por: $V_i = V^\infty \cdot (1 - 2a)$ .....	67
VI.3. Comparação entre relação $y$ e outros <u>m</u> todos .....	74
VII - Comentários, Conclusões e Sugestões .....	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	88
APÊNDICES	
A - Teoria dos Modelos de Eixo Horizontal .....	90
I. Teoria da Variação da Quantidade de Movi- mento .....	90
II. Teoria do Elemento de Pá .....	101
III. Teoria do Elemento de Pá Combinado com a Teoria da Variação da Quantidade de Movi- mento .....	102
B - Solução da Equação da Energia .....	109
C - Diagramas de Blocos Simplificados e Listagens de Programas .....	112
I. Método de Glauert .....	112
II. Método de Shepherd .....	121
III. Método Experimental de Iwasaki .....	123
IV. Método Adimensional Iterativo .....	124
V. Método Adimensional Não Iterativo .....	127
VI. Solução do Método de Nogueira .....	130
D - Exemplo de Aplicação do Método Adimensional Não Iterativo .....	133

## CAPÍTULO I. INTRODUÇÃO

As turbinas eólicas são máquinas que possibilitam a extração da energia dos ventos, transformando-a de cinética em mecânica. A energia mecânica, então disponível no eixo da turbina pode ser transformada em energia elétrica.

No convênio estabelecido entre a EFEI e a PETROBRÁS, para o desenvolvimento de turbina eólica para a geração de energia elétrica, foi escolhida a turbina eólica de rotor de eixo horizontal pelas seguintes razões:

- tem uma alta relação de velocidade na ponta da pá (tangencial) pela velocidade do vento; desejável no caso de geração de energia elétrica;
- ser suficientemente conhecida toda a teoria sobre pás;
- suas perdas aerodinâmicas são pequenas, sendo o rotor que melhor apresenta rendimento o rotor de duas pás;
- vários são os modelos disponíveis para a análise teórica deste tipo de turbina eólica.

Para o desenvolvimento do projeto aerodinâmico das pás do rotor de eixo horizontal, foram estudados vários métodos, sendo que o método escolhido, foi o método de Wilson et al, por ser o método mais empregado em projetos aerodinâmicos de pás de turbina eólica. O método de Wilson et al., é um método dimensional que precisa de dados como: o raio e a corda de cada seção da pá; o ângulo construtivo, a velocidade livre (vento); o coeficiente de arrasto; e para a solução deste método, precisa-se de iterações para a determinação dos parâmetros como: ângulo do plano de rotação; fator de indução axial; fator de perturbação rotacional e ângulo de ataque.

A grande dificuldade que se encontrou no projeto aerodinâmico das pás, por este método, foi na determinação das condições ótimas de projeto. Levou-se muito tempo para esta determina-

ção, só depois de muitas tentativas, arbitrando vários valores para a corda é que se chegou a um rendimento ótimo.

A idéia proposta para o desenvolvimento deste trabalho, foi o de se conseguir um método que eliminasse as dificuldades encontradas no projeto aerodinâmico das pás, pelo método de Wilson et al..

Estas dificuldades seriam fazer modificações no método de Wilson et al., de modo que o método de Wilson et al. tornasse adimensional. Evitando adotar dados para se determinar as condições ótimas. E se possível eliminar as iterações encontradas no método de Wilson et al.. Com a eliminação destas iterações, diminuiria o tempo gasto para se encontrarem as condições ótimas de projeto.

Para determinação da potência extraída em turbina eólica de rotor de eixo horizontal, utiliza-se a velocidade induzida. O cálculo desta velocidade, dado por Nogueira, S.L., consta-se em resolver uma equação do 4º grau. A idéia proposta, é de se determinar um cálculo para velocidade induzida, que seja, bem mais simples de se resolver.

## CAPÍTULO II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Das teorias existentes sobre turbina eólica de eixo horizontal, pode-se informar a respeito das teorias de Glauert [1], Wilson et al. [2], Griffiths [3], Jones [4], Shepherd [5], Iwasaki [6], Nogueira [7] e outros.

Glauert [1], desenvolveu um modelo simples para turbina eólica ideal. É um modelo clássico para se determinar o coeficiente de potência teórico em turbinas eólicas de eixo horizontal. O método considera o rotor com um número infinito de pás, o coeficiente de arrasto como sendo nulo. Um método de solução para o modelo de Glauert é variar o fator de indução axial e para cada valor deste fator, calcular o fator de perturbação rotacional, a razão de velocidades local e na ponta, o ângulo do plano de rotação. Quando o valor do fator de indução alcançar um valor máximo, calcula-se o coeficiente de potência.

No modelo de Wilson et al. [2], para cálculo do fator de indução axial, usa-se de métodos iterativos onde precisa-se conhecer valores como: raio do elemento de pá, razão de velocidades, solidez, ângulo de pá e características aerodinâmicas do perfil da pá, e procede-se da seguinte maneira:

- assume-se um valor inicial para fator de indução axial e da perturbação rotacional.
- calcula-se o ângulo do plano de rotação e ângulo de ataque.
- determina-se os coeficientes de sustentação e arrasto (em função do ângulo de ataque).
- calcula-se novos valores do fator de indução axial e perturbação rotacional.
- repete-se os procedimentos anteriores até a convergência do fator de indução axial.

- calcula-se o coeficiente de potência.

O método proposto por Griffiths [3], consta do seguinte: para alguns valores da razão de velocidades e da relação coeficiente de sustentação pelo coeficiente de arrasto, de uma seção de um perfil de uma pá, os fatores de indução axial e perturbação rotacional podem ser determinados. Com estes valores calculamos o coeficiente de potência.

Jones [4] em seu trabalho propõe o seguinte método. Para uma dada geometria do elemento de pá, ângulos de ataque são selecionados arbitrariamente, e conhecendo-se os valores do raio do elemento de pá, da solidez e ângulo da seção da pá (dados do perfil da pá) é feito o procedimento inverso das outras teorias.

- seleciona-se um ângulo de ataque.
- determina-se os coeficientes de arrasto e sustentação, das características do perfil da pá.
- calcula-se os fatores de indução axial e perturbação rotacional, a razão de velocidades e o ângulo do plano de rotação.
- calcula-se o coeficiente de potência.

Shepherd [5] propõe um método simplificado para projeto e análise da performance de turbinas eólicas de eixo horizontal. O método parte da premissa que os fatores de indução axial e perturbação rotacional são independentes do efeito da viscosidade e adota para análise, modelo de turbina ideal. O método consiste em dar valores para a razão de velocidades (local), e através de iterações obter o valor do fator de indução axial, para cada valor de razão de velocidades (local).

Com estes valores determina-se os valores do ângulo do plano de rotação. De posse destes valores e dos valores do fator de indução axial, determina-se o coeficiente de potência. O método ainda considera como sendo uma constante que assume os valores de 25, 50 e 100 a relação coeficiente de sustentação dividido pelo coeficiente de arrasto.

Iwasaki [6] desenvolveu um método através de análise experimental. Este método consta em se determinar o coeficiente de potência utilizando apenas uma fórmula, que leva em consideração a razão de velocidades e o produto sólido pelo coeficiente de sustentação.

Nogueira [7] em seu modelo, fornece uma maneira de se projetar a geometria da pá da hélice de turbinas eólicas de eixo horizontal, de forma a se conseguir a máxima potência extraída do mesmo. O desenvolvimento é feito utilizando-se a teoria da pá da hélice considerando a velocidade induzida em cada seção.

A solução do método consiste em resolver uma equação polinomial do 4º grau.

Paralelamente ao trabalho de pesquisa bibliográfica, foi feita uma pesquisa através de cartas enviadas a diversas universidades do Brasil (às suas bibliotecas), procurando saber se em tais universidades existiam teses ou trabalhos relacionados com o assunto proposto para o desenvolvimento da tese e obteve-se as seguintes respostas:

O Instituto de Pesquisas Espaciais não possui publicação sobre o assunto, resposta datada de 14 de Março de 1984.

A Universidade de São Paulo não faz pesquisa bibliográfica, resposta datada de 22 de Março de 1984.

A Universidade Federal de Santa Catarina não dispõe de nada sobre o material pedido, resposta datada de 04 de Abril de 1984.

A Universidade Federal de Minas Gerais, não tem teses sobre o assunto, resposta datada de 28 de Abril de 1984.

A Universidade Federal Fluminense não possui nada sobre o assunto, resposta datada em 27 de Agosto de 1984.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul enviou vários temas de artigos, referências de [8] a [12].

E das outras Universidades não foram enviadas nenhuma

resposta.

Neste trabalho o autor apresenta duas propostas a saber:

A primeira consta em modificar o método de Wilson et al. [2] para o método adimensional. Este método poderá ser aplicado no projeto aerodinâmico das pás de turbinas eólicas de eixo horizontal. Para isto desenvolve-se um método adimensional iterativo e outro não iterativo. Os métodos consideram o fator de perda de Prandtl ou Goldstein (F). Nas equações dos métodos adimensionais, em que se precisa adotar valores apenas dimensionais (evitando a dificuldade de se adotar os valores dimensionais para um caso específico), é considerado, como uma constante, a relação: coeficiente de arrasto dividido pelo coeficiente de sustentação, que assume diversos valores.

O método adimensional iterativo é composto dos passos: (1) considera inicialmente os fatores de indução axial e perturbação rotacional como sendo iguais a zero. (2) Calcula-se, através de iterações, o ângulo do plano de rotação, fatores de indução axial e perturbação rotacional. (3) Com estes valores determina-se o coeficiente de potência.

O método adimensional não iterativo, se utiliza de uma equação, referência [5], para determinação do ângulo do plano de rotação para cada seção de pá. De posse destes valores determina-se os fatores de indução axial e perturbação rotacional, para depois determinar o coeficiente de potência.

O cálculo da velocidade induzida, dado por Nogueira, S. L., consta em resolver uma equação de 4º grau, cuja solução, Nogueira, S.L., não fornece em seu trabalho [7]. Propõe-se um método de solução para esta equação. O método consiste no seguinte: com o valor da relação produto solidez por coeficiente de sustentação, (obtido do modelo de Galuert) e com o valor do ângulo total, obtido através de uma equação desenvolvida no método de solu

ção proposto, resolve-se a equação polinomial de 4º grau em  $y$  (velocidade induzida dividida pela velocidade livre), [7]. Cujas soluções fornece apenas uma raiz com significado físico real.

Utilizando-se do princípio do método desenvolvido por Nogueira, S.L., encontra-se uma expressão para cálculo da velocidade induzida dada por  $V_i = V_\infty \cdot (1 - 2a)$ . Esta expressão vai nos permitir ter uma maior facilidade na determinação da potência extraída.

## CAPÍTULO III. TURBINA EÓLICA

### III.1. Histórico

A história mostra que as primeiras máquinas usadas pelo homem para a moagem de grãos e recalque de água, utilizavam tração humana e animal. Posteriormente foram substituídas pela atuação da preensão da água sobre as pás, representando uma evolução. Simultaneamente foram desenvolvidas as turbinas eólicas, onde esta executava a função da água, sendo que as primeiras turbinas eólicas eram de eixo vertical com velas que tracionavam a metade do tempo [13].

O aproveitamento da energia do vento já era realizado há milhares de anos. O rei Hammourabi utilizara essa energia para irrigar os campos da Mesopotâmica. Também na China e Pérsia a energia eólica foi muito utilizado na antiguidade.

Foi somente durante a Idade Média que as turbinas eólicas surgiram na Itália, França, Espanha e Portugal, tanto assim, que alguns autores atribuem às cruzadas a introdução destes moinhos na Europa. Os holandeses passaram a utilizá-los a partir de 1350 para bombeamento de água, que podia ser elevada até 5m, com rosca de Archimedes [14].

As turbinas eólicas evoluíram, apesar de seu baixo rendimento, e, em virtude dos limitados conhecimentos da época, restringiam-se a unidade de pequena potência. A construção das primeiras grandes turbinas eólicas, eixo horizontal, caracterizou-se por terem uma direção fixa, evoluindo posteriormente para o tipo móveis, cujo movimento era obtido com auxílio de uma turbina eólica de pequeno porte. Quanto ao número de pás, os tipos descritos eram de quatro, cinco seis ou oito pás.

Os estudos também, evoluíram, convenientemente, como por exemplo, os de John Smeaton em 1579, na Royal Society, com sua

publicação "On the Construction and Effects of Windmill Sails ", contendo a descrição de testes de laboratório com ótimas conclusões.

O progresso neste tipo de aproveitamento energético seguiu seu curso natural até que o rápido desenvolvimento dos conhecimentos tecnológicos e científicos da humanidade, com a invenção da máquina a vapor e o uso da conversão da energia química dos combustíveis fósseis em outras formas de maior utilidade, determinaram grandes mudanças, cujos efeitos sente-se até hoje [ 13 ].

Os aeromotores lentos só apareceram mais tarde, e assim, encontra-se em 1724, um projeto de Leupold Jacob, na Alemanha, de um aeromotor de oito pás, e que acionava uma bomba a pistão.

Foi entretanto na América do Norte, a partir de 1870, que os aeromotores se popularizaram, retornando à Europa em 1876.

No começo do século atual, aparecem na França os primeiros aerogeradores rápidos. O surgimento do motor a combustão e os baixos preços do petróleo deslocaram os aerogeradores à utilização marginal [ 14 ].

Ficaram, assim, os barcos a vela, e as turbinas eólicas, que modificaram a história de muitos países, possibilitando seus desenvolvimentos, relegados a um segundo plano, e encarados como equipamentos que tiveram seu papel e que cumpriram com sua finalidade.

Parece ironia que os moinhos d'água, precursores das turbinas eólicas, tenham prosseguido sua evolução, chegando, em nossos dias, às moderníssimas turbinas de grande potência, tanto com acionamento por queda d'água, como vapor e gás. É de se pensar: qual seria hoje o estágio de desenvolvimento das turbinas eólicas, tivessem estas sido alvo dos mesmos incentivos que as antigas rodas d'água.

Como evidência do declínio do prestígio das turbinas eólicas, há hoje, na Holanda, 750 velhas turbinas que sobreviveram graças à ação de entidades de preservação, que iniciaram seus trabalhos em 1923. Nos países Baixos, haviam, em 1750, cerca de 6.000 a 8.000 turbinas eólicas. Em 1953 este número baixou para 1.143 unidades. Na antiga Alemanha haviam 18.242 em 1895, 17.000 em 1907, 11.366 em 1914 e entre 4.000 e 5.000 em 1933. Nos Estados Unidos, dos 6 milhões de turbinas eólicas construídas a partir do século XIX, para bombeamento d'água e geração de eletricidade, restaram apenas cerca de 15.000 unidades. Situação idêntica é encontrada no Brasil, onde, guardadas as proporções, ainda encontramos em locais não servidos por redes de distribuição de eletricidade, as turbinas eólicas que há muito vêm desempenhando o papel de fonte principal de energia, como acontece nas regiões Sul e Oeste do Rio Grande do Sul.

Após as duas grandes guerras, as mudanças no quadro energético mundial trouxeram um novo alento ao aproveitamento da energia dos ventos. Diversos fatores, no entanto, determinaram a criação, em muitos países, de organizações voltadas para a dinamização dos estudos nesta área. Entre eles:

- a) o rápido crescimento da demanda de eletricidade, acompanhado pelos crescentes custos do suprimento de petróleo e carvão, além dos recursos hidroelétricos, na maioria dos países, esgotados ou economicamente inviáveis;
- b) o alto custo da geração de vapor e de novas hidroelétricas, sendo que as segundas, além do custo inicial, têm a transmissão incrementada pela distância à carga;
- c) as dificuldades econômicas e condições políticas que a dependência do combustível importado acarreta;
- d) a descoberta de novos processos para dar ao carvão e ao óleo usos mais nobres a que a simples queima;
- e) o aumento dos conhecimentos na área de aerodinâmica aplicada

ã navegação aérea, e que tem grande utilidade no aproveitamento eólico;

- f) os usos de diversas formas de geração alimentado a mesma malha elétrica,
- g) o atendimento de regiões remotas, onde a rede de transmissão é anti-econômica.

Hoje este tipo de energia é visto com grande interesse, já que, além dos motivos anteriores, trata-se de uma forma renovável e não poluente, pois origina-se a partir da energia solar, a grande fonte energética gratuita e eterna em termos de duração da história humana. Por isso os estudos para seu aproveitamento, a partir das máquinas antigas, modificadas e aprimoradas em função do adiantado conhecimento tecnológico e dos novos materiais existentes, vêm crescendo em ritmo acelerado.

Neste sentido, a UN Conference New and Renewable Sources of Energy, Nairobi, 16 a 21 de Agosto de 1981, discutiu e elaborou um plano global para o aproveitamento da Energia Eólica, como uma alternativa de energia para o futuro, estando a viabilidade econômica de seu emprego para a alimentação da rede existente estimada para o prazo entre 5 e 10 anos [13].

### III.2. Aplicações da Energia Eólica no Brasil

A energia eólica no Brasil pode ser aplicada [15] em:

- eletrificação rural.
- bombeamento de água.
- aproveitamento da força mecânica para movimentação de máquinas.
- instalação de geradores para alimentação das repetidoras da rede de Telebrás, Embratel, etc.
- fazendas de turbinas eólicas, etc.

- suprimento energético de equipamentos da torre das plataformas marítimas de prospecção de petróleo da Petrobrás ( em fase experimental).
- dessalinização da água do mar.
- produção de hidrogênio e amônia através da eletrólise, no Rio Grande do Norte (fase experimental), no campo de lançamento de foguetes da Barreira do Inferno, em Natal. Onde também são executados testes de avaliação da viabilidade do uso do sistema de bombeamento de água de centenas de poços artesianos, paralizados por falta de energia elétrica. Que possibilitará o armazenamento de água para irrigação de regiões semi-áridas, principalmente do Polígono das Secas.

### III.3. Geração de Eletricidade

As turbinas eólicas são máquinas que possibilitam a extração da energia dos ventos, transformando-as de cinética em mecânica, diretamente. A energia mecânica, então disponível no eixo da turbina, pode ter aproveitamento diversos, desde o uso direto como energia mecânica ou transformando-a em energia elétrica, ambas para uso imediato ou armazenamento.

A eletricidade gerada deve ser consumida de imediato ou armazenada. Os problemas atuais de armazenamento são ainda grandes, porém se a potência for injetada diretamente na rede elétrica, poder-se-á deixar de gastar combustível das termo-elétricas e/ou água das hidro-elétricas, o que é uma economia. Este é um dos critérios que podem e devem ser adotados, pois representa uma maneira prática do aproveitamento energético, por dois motivos principais:

- a) é uma maneira de atender às mais diversificadas cargas usando um sistema já implantado, lembrando que a eletricidade é

uma forma universal de energia;

- b) a malha elétrica cobre uma grande área, podendo-se afirmar que uma grande parte dos locais propícios para a instalação de turbinas ficam relativamente próximos à rede, além do que a injeção de potência seria na parte da distribuição, o que não sobrecarregaria a transmissão que atualmente é o ponto de estrangulamento do sistema.

Transformar a energia eólica em elétrica é necessária e viável tecnicamente. Como melhor fazê-lo?

Há geradores de corrente contínua que se adaptam bem às oscilações das turbinas, mas que requerem inversores para se compatibilizarem com a rede elétrica. Este fator representa atualmente um grande incremento no custo, constituindo-se numa limitação econômica ao seu emprego como injetor de potência na rede, mas não o descarta como carregador de baterias ou outros usos em locais afastados da rede.

Os geradores síncronos são equipamentos de ótimo desempenho quando a máquina motriz apresenta condições de operação a rotação fixa, como em termo-elétricas e hidro-elétricas. São todavia máquinas de custo elevado.

Em contraposição, os geradores assíncrono ou de indução são máquinas elétricas que apresentam menor custo construtivo, maior robustez mecânica e elétrica, tecnologia amplamente dominada, e não necessitam de equipamentos sofisticados de controle e operação [16].

#### III.4. Tipos de Turbinas Eólicas

Desde 1920 tem havido numerosas tentativas de projeto de turbinas eólicas para geração de potência a partir da energia eólica, usando modernas teorias [2].

Há atualmente diversos tipos de turbinas eólicas , sendo que alguns são empregados desde a antiguidade. Outros são de construção recente, havendo modelos mais sofisticados em fase de testes e alguns apenas em projetos [6].

É conveniente classificar as turbinas eólicas em dois grupos básicos, conforme colocação do eixo do rotor em relação ao solo [14]:

As de eixo horizontal que são máquinas em que o eixo de rotação é paralelo a direção do vento [2], tem como tipos: hélice com uma, duas ou três pás, tipo múltiplas-pás fazenda ou raiada, sendo que podem trabalhar com o vento incidindo por trás ou pela frente, havendo variantes como multi-rotor, duplas pás opostas, podendo também usar velas no lugar das pás [13].

As de eixo vertical que são máquinas em que o eixo de rotação é perpendicular a direção do vento [2], tem-se uma subdivisão: as que usam o arraste ou atrito como princípio de funcionamento e as que usam a sustentação ou levantamento, além das que combinam os dois tipos. Entre as que usam o arraste estão: tipo Savonius que pode ser singular ou de múltiplas pás, com ou sem excentricidade, tipo pá ou remos, tipo copo e tipo turbinas. Entre as que usam levantamento estão: o tipo Darrieus troposkien ou Ø, Darrieus Giromill, etc.

As turbinas citadas podem sofrer variações com o uso de acessórios que proporcionam melhores ou apenas diferentes condições de funcionamento, como: difusores, concentradores, planos guias, defletores, torres de aquecimento, tubo de venturi, torre para vortex confinado, etc. Também devem ser citados, dentro dos usos da energia eólica, os barcos a vela, com suas variantes, e os carros a vela movidos com auxílio de aerofólios ou usando o efeito magnus [13].

A figura 1 mostra os diversos tipos de turbinas citados [15].

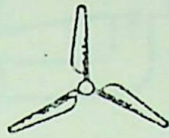
EIXO HORIZONTAL



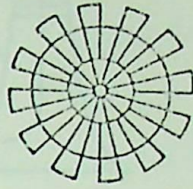
uma pá



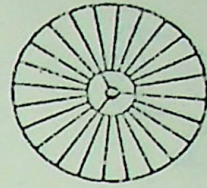
duas pás



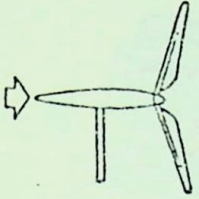
três pás



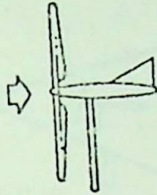
múltiplas pás



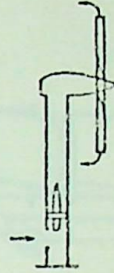
roda de bicicleta



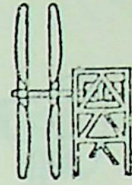
vento por trás



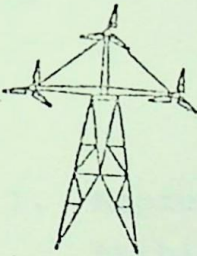
vento pela frente



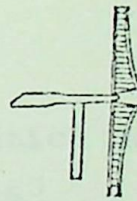
enfield  
andreaeu



pás contrárias



multi-rotor



velas

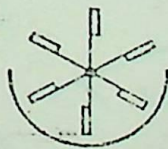
EIXO VERTICAL



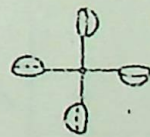
savonius



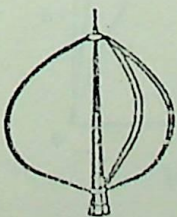
savonius mlti-  
tiplas pás



placas

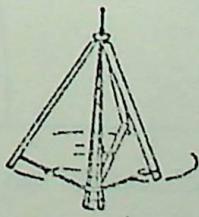


copos



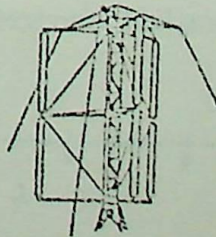
darrieus

Ø

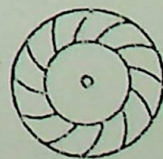


darrieus

Δ



giromill



turbina

CÔMBINAÇÕES

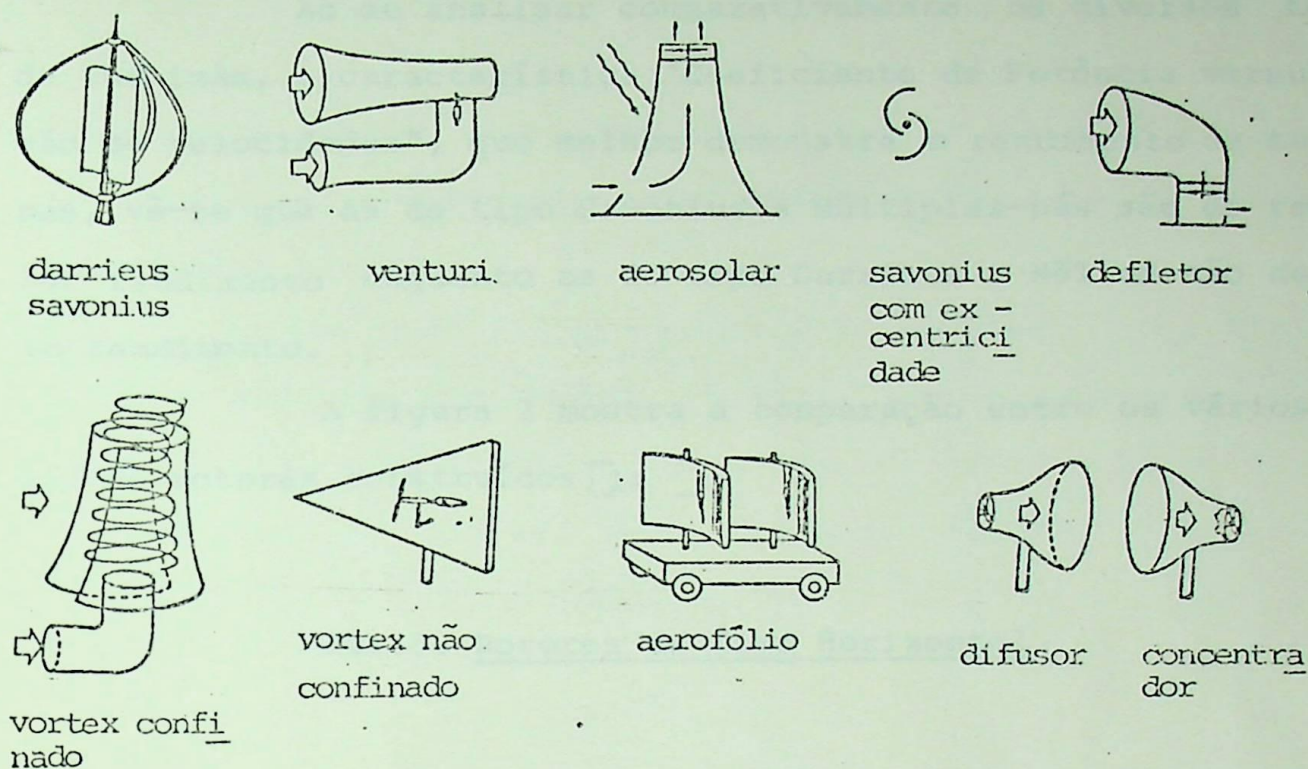


FIGURA 1. Representação esquemática dos diversos tipos de turbinas eólicas. [15]

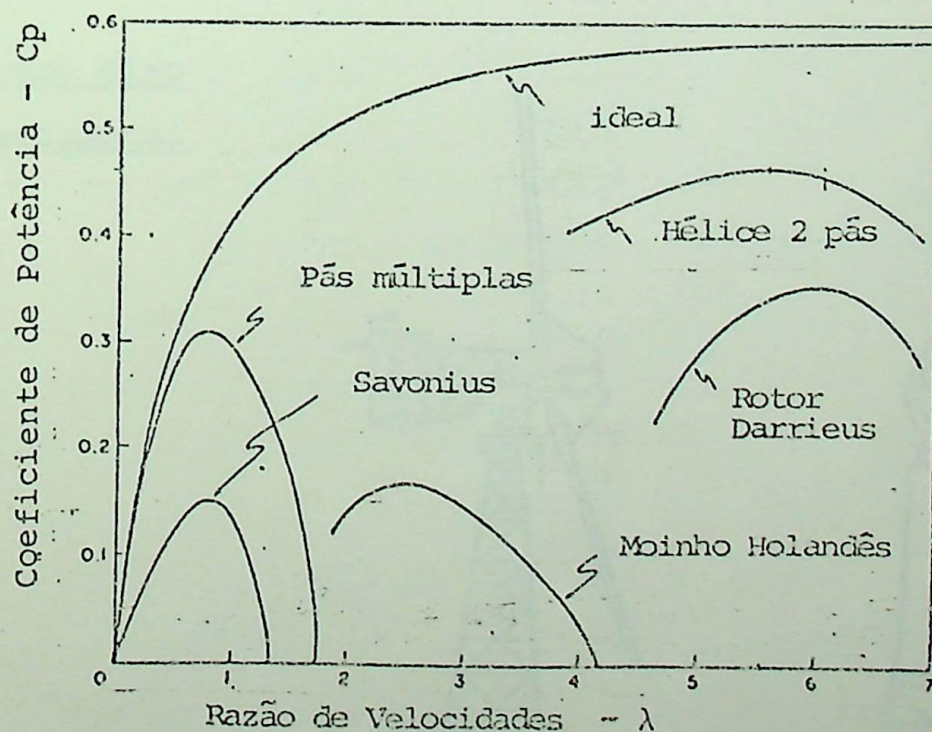


FIGURA 2. Comparação entre os diversos tipos de rotores [14]

Ao se analisar comparativamente os diversos tipos de turbinas, a característica "Coeficiente de Potência versus razão de velocidades", que melhor demonstra o rendimento de turbinas, vê-se que as do tipo Savonius e Múltiplas-pás são de regular rendimento enquanto as do tipo Darrieus e Hélice são de alto rendimento.

A figura 2 mostra a comparação entre os vários tipos de rotores construídos [14].

### III.5. Rotores de Eixo Horizontal

#### Introdução

Como foi visto, há diversos tipos de turbinas eólicas, que podem ser estudadas. Este trabalho está voltado para o desenvolvimento de análise mais teórica dos rotores de eixo horizontal.

#### Rotor Eixo

#### Horizontal

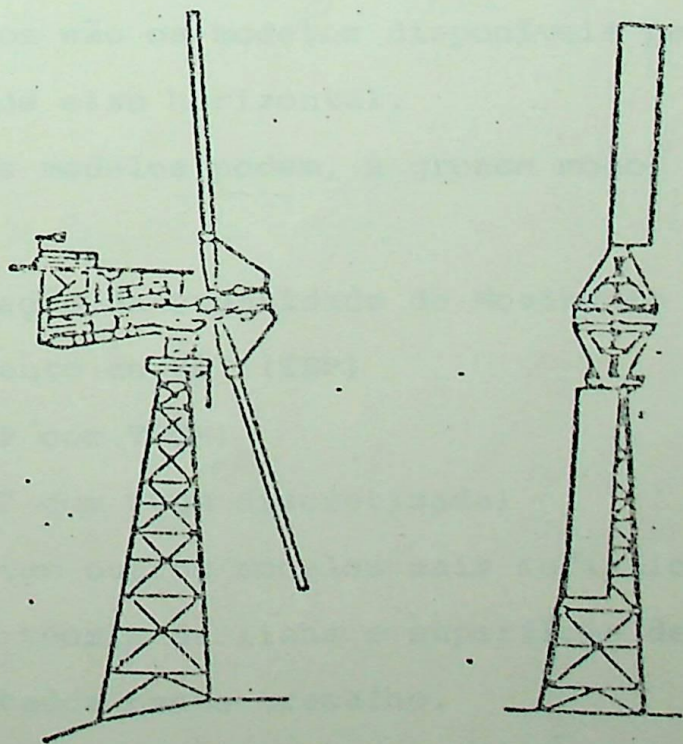


Figura 3 Tipo de turbina eólica rotor eixo horizontal

### Vantagens

- a) é suficientemente conhecida toda a teoria sobre hélices, nos aspectos aerodinâmicos, vibrações, distribuições de tensões, fabricação, etc.
- b) podem ter uma alta relação velocidade na ponta da pá (tangencial)/ velocidade do vento, desejável em geração elétrica.
- c) suas perdas aerodinâmicas são pequenas, sendo atualmente a turbina eólica mais eficiente (duas ou três pás) [ 2 ].

### Desvantagens

- a) necessita ser montada em torre (nível mínimo 9m) que eleva o custo e dificulta a manutenção, podendo também introduzir vibrações adicionais.
- b) a hélice deve ficar perpendicular ao vento, e portanto, acompanhar a sua mudança de direção.

### Modelos

Vários são os modelos disponíveis para a análise teórica de rotores de eixo horizontal.

Esses modelos podem, a grosso modo, ser agrupados como segue:

1. Teoria da Variação da Quantidade de Movimento (TVQM)
2. Teoria do Elemento de Pá (TEP)
3. Combinação (TEP com TVQM)
4. Combinação (TEP com TVQM discretizada)

Existem outros modelos mais sofisticados, baseados principalmente em teoria da linha e superfície de sustentação e que não serão tratados neste trabalho.

A teoria dos modelos citados neste item se encontra no APÊNDICE [ A ] [17].

## CAPÍTULO IV. MÉTODOS EXISTENTES PARA CÁLCULO DE COEFICIENTE DE POTÊNCIA EM TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL

Neste capítulo faz-se um estudo de vários métodos existentes para cálculo do Coeficiente de Potência em Turbina Eólica de Eixo Horizontal. Os métodos vistos são: Modelos de Glauert (modelo clássico), Método de Wilson et al (método dimensional), Método de Shepherd (método mais recente) e Método de Iwasaki (método experimental).

### IV.1. Modelo de Glauert

Glauert desenvolveu um modelo simples para uma turbina eólica ideal, que é o modelo clássico para se determinar o Coeficiente de Potência Teórico.

O método usado, considera o rotor com um número de pás infinito e ausência de arrasto [2].

#### Equações do modelo de Glauert

Considerando o triângulo de velocidades abaixo, para a pá, e assumindo o fluxo ser uniforme no tubo de corrente.

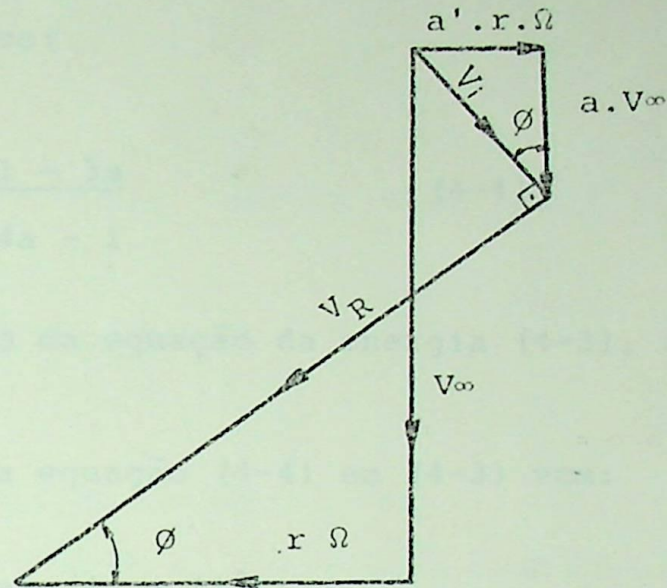


Figura 4 Diagrama de Velocidades (MG)

Considerando ausência de arrasto, isto é, considerando que velocidade induzida é perpendicular a velocidade relativa vem:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{(1 - a) \cdot V_{\infty}}{(1 + a') \cdot r\Omega} = \frac{a' \cdot r\Omega}{a \cdot V_{\infty}} \quad (4-1)$$

Sabe-se que a razão de velocidades local,  $x$  é dada por

$$x = \frac{r\Omega}{V_{\infty}} \quad (4-2)$$

Substituindo (4-2) em (4-1) vem:

$$\frac{a \cdot (1 - a)}{a' \cdot (1 + a')} = x^2$$

$$\therefore a' \cdot (1 + a') \cdot x^2 - a \cdot (1 - a) = 0 \quad (4-3)$$

A equação (4-3) é a chamada equação da energia [3] cuja solução nos fornece:

$$a' = \frac{1 - 3a}{4a - 1} \quad (4-4)$$

A solução da equação da energia (4-3), se encontra no APÊNDICE [B].

Levando a equação (4-4) em (4-3) vem:

$$x^2 = \frac{(1-a) \cdot (4a - 1)^2}{(1 - 3a)} \quad (4-5)$$

Desenvolvendo em termos do fator de indução axial, a:

$$x^2 \cdot (1 - 3a) = (1 - a) \cdot (4 - 1)^2$$

$$x^2 - 3ax^2 = (1 - a) \cdot (16a^2 - 8a + 1)$$

$$x^2 - 3ax^2 = 16a^2 - 8a + 1 - 16a^3 + 8a^2 - a$$

$$16a^3 - 24a^2 + 9a - 3x^2a + x^2 - 1 = 0$$

$$16a^3 - 24a^2 + (9 - 3x^2)a + x^2 - 1 = 0 \quad (4-6)$$

Para cálculo do ângulo  $\varnothing$ , da equação (4-1) vem:

$$\operatorname{tg} \varnothing = \frac{a'}{a} \cdot x \quad (4-7)$$

e substituindo a equação (4-4) e (4-5) em (4-6), temos:

$$\operatorname{tg} \varnothing = \frac{1}{a} \cdot \left[ (1 - a) \cdot (1 - 3 \cdot a) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4-8)$$

ou

$$\phi = \text{tg}^{-1} \left\{ \frac{1}{a} \left[ (1-a) \cdot (1-3a) \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (4-9)$$

Por outro lado, sabe-se ainda que  $x$  é dado por:

$$x = \frac{r}{R} \cdot \lambda \quad \lambda = \frac{vR}{c} = \frac{\rho v R}{\rho_0 c} = \frac{\rho R}{\rho_0 c} \quad (4-10)$$

Substituindo em (4-5), vem:

$$\frac{r}{R} = \frac{1}{\lambda} \cdot (4a - 1) \cdot \left[ \frac{1 - a}{1 - 3a} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4-11)$$

Com a primeira equação fundamental (APÊNDICE A eq. 45), e considerando  $C_D = 0$ , vem:

$$\frac{a}{1 - a} = \frac{\text{B.c.C}_L}{8 \pi r} \cdot \frac{\cos \phi}{\sin^2 \phi} \quad (4-12)$$

Desenvolvendo (4-12), tem-se

$$\frac{\text{B.c.C}_L}{8 \pi r} = \frac{a}{1 - a} \cdot \sin \phi \cdot \text{tg} \phi \quad (4-13)$$

Substituindo respectivamente as equações (4-8), (4-9), em (4-13), vem:

$$\frac{\text{B.c.C}_L}{8 \pi r} = \left[ \frac{1 - 3a}{1 - a} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \sin \left\{ \text{tg}^{-1} \left[ \frac{1}{a} \cdot ((1-a) \cdot (1-3a))^{\frac{1}{2}} \right] \right\} \quad (4-14)$$

Utilizando-se a definição de solidez:

$$\sigma = \frac{B \cdot c}{2 \pi r}$$

Multiplicando ambos os lados por  $4 \sigma C_L$ :

$$\sigma C_L = 4 \cdot \frac{B \cdot c \cdot C_L}{8 \pi r} \quad (4-15) \text{ que é a relação}$$

do produto de solidez pelo coeficiente de sustentação.

O Coeficiente de Potência é obtido considerando:

$$C_P = \frac{P_{ex}}{P_{disp}} \quad (4-16)$$

Do APÊNDICE [A], equação (59), vem:

$$\frac{dP}{dr} = 4 \cdot \rho \cdot \pi \cdot r^3 \cdot V_\infty^3 \cdot \left(\frac{\lambda}{R}\right)^2 \cdot a' \cdot (1-a)$$

$$P_{ex} = 4 \cdot \rho \cdot \pi \cdot V_\infty^3 \cdot \lambda^2 \cdot \int_0^1 a' \cdot (1-a) \cdot \left(\frac{1}{R}\right)^2 \cdot r^3 \cdot dr \quad (4-17)$$

Utilizando-se a definição de  $P_{disp}$ ,

$$P_{disp} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_\infty^3 \quad (4-18)$$

Substituindo (4-17) e (4-18) em (4-16), vem:

$$C_P = \int_0^1 8 \cdot \frac{\lambda^2}{R} \cdot r^3 \cdot a' \cdot (1-a) \, dr, \text{ ou}$$

$$C_P = 8 \cdot \lambda^2 \cdot \int_0^1 a' \cdot (1-a) \cdot \frac{r^3}{R^3} \cdot d\left(\frac{r}{R}\right) \quad (4-19)$$

ou considerando que  $\frac{x}{\lambda} = \frac{r}{R}$ , vem:

$$C_P = \frac{8}{\lambda^2} \cdot \left\{ \begin{array}{l} x = \lambda = \frac{R \cdot \Omega}{V_\infty} \\ a' \cdot (1-a) \cdot x^3 \cdot dx \\ x = \frac{r \cdot \Omega}{V_\infty} = 0 \end{array} \right. \quad (4-20)$$

Procedimento para solução do modelo de Glauert

A. Dados de entrada

Valor de entrada  $\lambda$

Valor inicial de  $\lambda$

Valor final de  $\lambda$

Incremento de  $\lambda$

B. Faz-se  $x$  (razão de velocidade local) variar de 0 até o valor de " $\lambda$ ", com um incremento que dependerá do número de intervalos (N)

$$x_i = \lambda/N$$

C. Para cada valor de " $x_i$ ", de um determinado " $\lambda$ " (dado em A), calcula-se o valor do fator de indução axial, pela equação (4-6).

O fator de indução axial deverá variar de um valor inicial de 0,25 até um valor final de 0,33 e o método utilizado para a solução da equação (4-6) é o método de Newton-Raphson.

D. O valor do integrando para cada " $a$ " e " $x_i$ ", será dado por.

$$INT = \frac{1 - 3a}{4a - 1} \cdot (1 - a) \cdot x^3$$

E. O valor do fator de perturbação rotacional será obtido da

equação (4-4)

- F. O valor do ângulo do plano de rotação será obtido da equação (4-9)
- G. O valor da relação  $\sigma C_L$ , isto é, produto da solidez pelo coeficiente de sustentação é obtido pelas equações (4-14) e (4-15)
- H. O Coeficiente de Potência é obtido pela equação

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \cdot \int_{x=0}^{x=\lambda} INT dx$$

O método utilizado para a solução da integral é o método dos trapézios.

#### Diagrama de blocos

O diagrama de blocos, a listagem do programa em linguagem FORTRAN se encontram em APÊNDICE [C].

#### Resultados

Para cada valor de razão de velocidades local, tem-se o valor do Coeficiente de Potência, como é mostrado na tabela 1.

Razão de Velocidades na ponta ( $\lambda$ )	Coefficiente de Potência ( $C_p$ )
0,5	0,28977
1,0	0,41591
1,5	0,47756
2,0	0,51159
2,5	0,53227
3,0	0,54579
3,5	0,55513
4,0	0,56187
4,5	0,56690
5,0	0,57077
5,5	0,57480
6,0	0,57721
6,5	0,57916
7,0	0,58076
7,5	0,58405
8,0	0,58503
8,5	0,58813
9,0	0,58861
9,5	0,58901
10,0	0,58935

Tabela 1. Coeficiente de Potência em função  
Razão de Velocidades (MG).

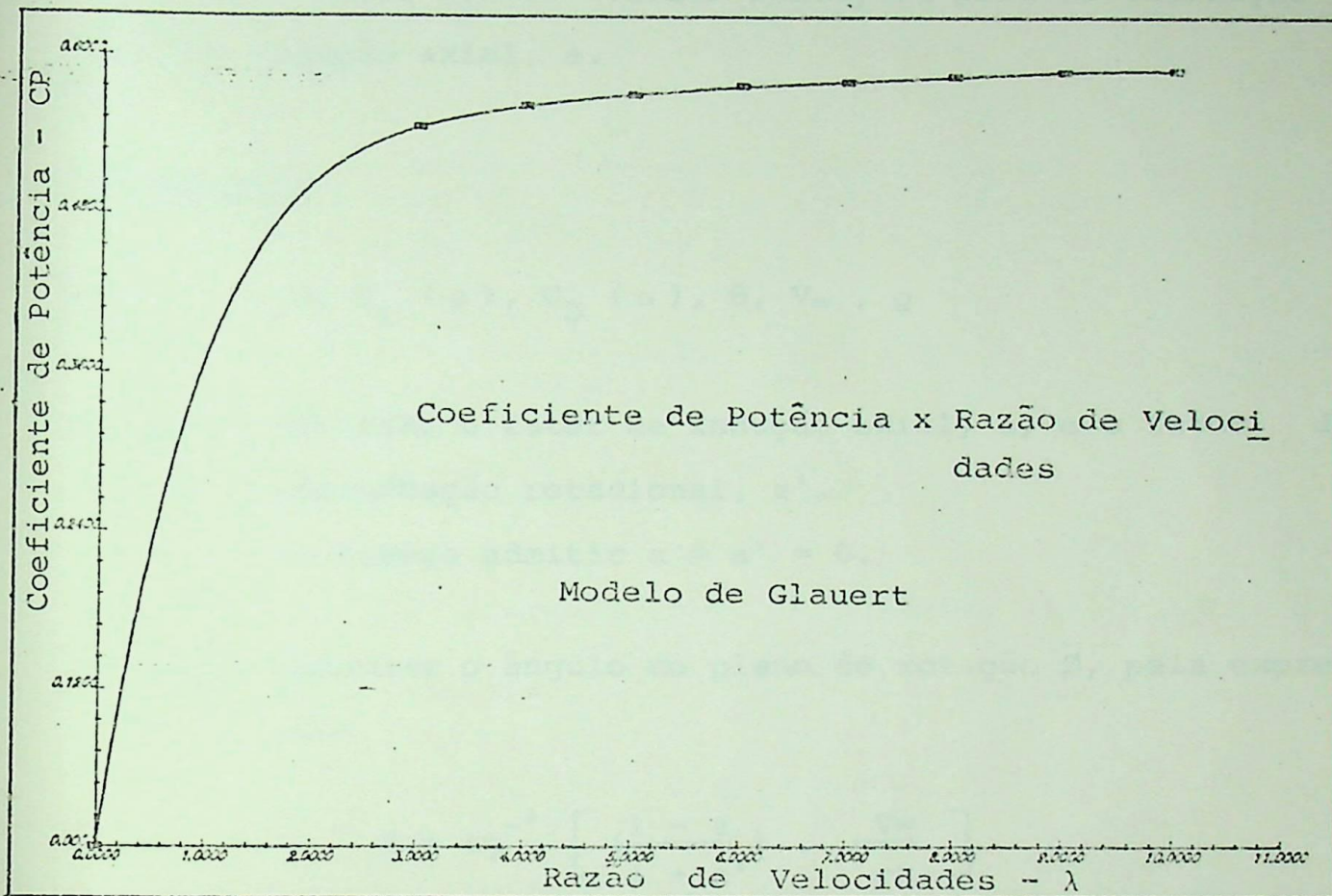


Gráfico 1. Variação do Coeficiente de Potência em função da razão de velocidades (MG)

IV.2. Método de Wilson et al

É um método dimensional que precisa de dados como: raio e corda de um elemento de pá, dos coeficientes de sustentação e arrasto, ângulo construtivo, velocidade livre e rotação.

Método de Wilson et al, utiliza as equações desen -

volvidas na Teoria do Elemento de Pá em combinação com a teoria da variação da quantidade de movimento.

Este método utiliza iterações para determinação do fator de indução axial,  $a$ .

### Procedimento

Dados:  $r, c, C_L(\alpha), C_D(\alpha), \theta, V_\infty, \Omega$

1º Passo: Arbitrar o fator de indução axial,  $a$ , e o fator de perturbação rotacional,  $a'$ .

No começo admitir  $a = a' = 0$ .

2º Passo: Calcular o ângulo do plano de rotação  $\phi$ , pela expressão:

$$\phi = \operatorname{tg}^{-1} \left[ \left( \frac{1 - a}{1 + a'} \right) \cdot \frac{V_\infty}{r\Omega} \right]$$

3º Passo: Calcular o ângulo de ataque,  $\alpha$ , pela equação:

$$\alpha = \phi - \theta \quad (4-21)$$

4º Passo: Calcular os coeficientes de sustentação e arrasto

$$C_L(\alpha) \text{ e } C_D(\alpha)$$

5º Passo: Calcular  $C_Q$  e  $C_T$  pelas equações

$$C_Q = C_L \cdot \sin \phi - C_D \cdot \cos \phi$$

$$C_T = C_L \cdot \cos \phi + C_D \cdot \sin \phi$$

6º Passo: Calcular fator de indução axial,  $a$ , pela equação:

$$a = \frac{X'}{X' + 1} \quad (4-22)$$

$$\text{onde: } X' = \frac{B.c.C_L}{8 \pi r} \cdot \frac{1}{\sin \phi \cdot \text{tg } \phi} \cdot \left( 1 + \frac{C_D}{C_L} \cdot \text{tg } \phi \right) \quad (4-23)$$

7º Passo: Calcular fator de perturbação rotacional, a', pela equação:

$$a' = \frac{Y'}{1 - Y'} \quad (4-24)$$

$$\text{onde: } Y' = \frac{B.c.C_L}{8 \pi r} \cdot \frac{1}{\cos \phi} \cdot \left( 1 - \frac{C_D}{C_L} \cdot \text{cotg } \phi \right) \quad (4-25)$$

8º Passo: Voltar ao passo 2, até convergir

9º Passo: Calcular o Coeficiente de Potência, utilizando a equação:

$$C_p = 8 \cdot \lambda^2 \cdot \int_0^1 a' \cdot (1-a) \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^3 \cdot d\left(\frac{r}{R}\right)$$

Este método apresenta o inconveniente de precisar de dados como coeficiente de sustentação e arrasto que são tirados de tabelas que para efeito de comparação com outros métodos não serve. Este método é muito bom quando tem-se a turbina eólica instalada e em funcionamento e precisa-se verificar qual o coeficiente de potência. Para projetar uma turbina eólica por este método, levaria muito tempo para encontrar quais as condições ótimas de construção da turbina eólica, como por exemplo, a determinação da corda da pá, que no projeto desenvolvido pela EFEI em convênio com a Petrobrás [19], levou-se muitas tentativas e muitos dias para encontrar a corda ideal que levasse ao coeficiente de potência ótimo.

IV.3. Método de Shepherd

Shepherd [5], em seu trabalho, um dos mais recente, publicado em 1984, propõe um método simplificado para projeto e análise da performance de turbinas eólica de rotores de eixo horizontal. O método considera para análise, modelo de turbina ideal.

Equações

- Razão de velocidade local,  $x$

$$x^2 = \frac{(1-a) \cdot (4a-1)^2}{(1-3a)} \quad (4-26)$$

- Ângulo do plano de rotação,  $\phi$

$$\cos \phi = \frac{a}{1-2a} \quad (4-27)$$

$$\text{ou } \operatorname{tg} \phi = \frac{(1-4a+3a^2)^{1/2}}{a} \quad (4-28)$$

- Coeficiente de Potência

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \cdot \int_0^\lambda a \cdot (1-a) \cdot \operatorname{tg} \phi \cdot \left(1 - \frac{C_D/C_{L1}}{\operatorname{tg} \phi}\right) \cdot x^2 dx \quad (4-29)$$

Procedimento

A. Para um dado valor de  $\lambda$ , e  $x$  variando de 0 até  $\lambda$ , com um incremento de 0.2, determina-se o valor do fator de indução axial, através da equação [4-26], para cada valor de  $x$ . Os valores do fator de indução axial, foram obtidos diretamente da referência [5], e foram armazenados em um arquivo de dados.

- B. Com o valor do fator de indução axial, obtém-se o valor do ângulo do plano de rotação, para todos valores de  $x$ , utilizando-se a equação (4-28).
- C. Para cada valor de  $\bar{R} = C_L/C_D$ , que assume os valores 30, 50, 100,  $\infty$ , determina-se o coeficiente de potência para cada  $\lambda$ , utilizando-se a equação (4-29), e para solução da integral, usa-se o método dos trapézios.

### Diagrama de blocos

O diagrama de blocos e a listagem do programa em linguagem FORTRAN, se encontram no APÊNDICE [C].

### Resultados

Os resultados se encontram na tabela (2), que apresenta o valor do coeficiente de potência em função da razão de velocidades para cada valor de  $\bar{R}$ .

		Coeficiente de Potência			
		30	50	100	$\infty$
$\lambda$	$\bar{R}$				
1,0		.409854	.417580	.423374	.429168
2,0		.477900	.493515	.505227	.516939
3,0		.489040	.512587	.530248	.547909
4,0		.484093	.515567	.539173	.562729
5,0		.472555	.511950	.541496	.571042
6,0		.458025	.505335	.540818	.576301
7,0		.441573	.496796	.538213	.579630
8,0		.424247	.487380	.534730	.582080
9,0		.406102	.477144	.530425	.583706
10,0		.387428	.466377	.525589	.584800

Tabela 2. Coeficiente de Potência em função da razão de Velocidade para diversos valores de  $\bar{R}$  (MS)

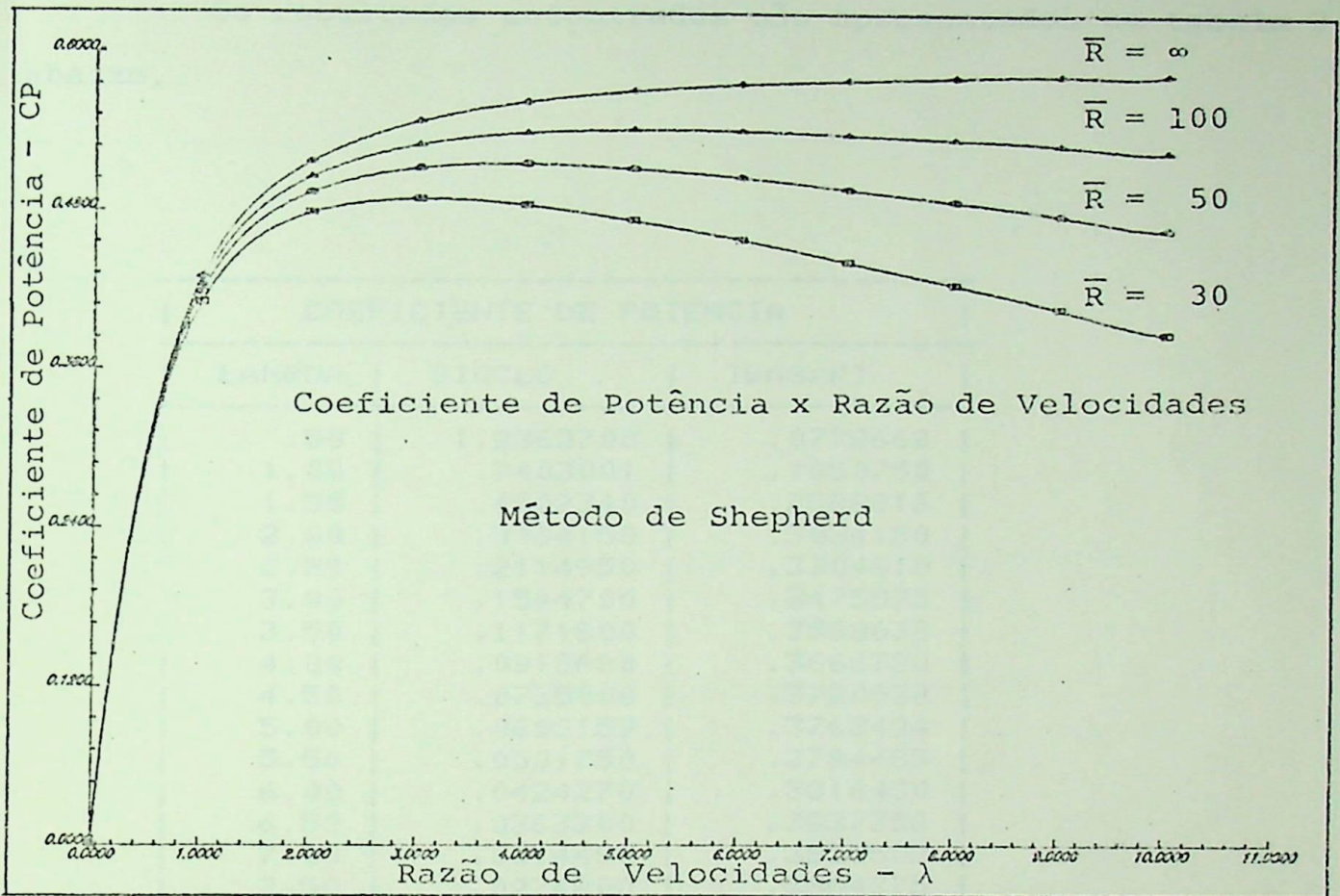


Gráfico 2. Variação do Coeficiente de Potência em função da razão de velocidades para valores de  $\bar{R}$  (MS)

#### IV.4. Método Experimental de Iwasaki

Este método foi desenvolvido por Iwasaki [6] através de análise experimental.

Em suas análises, Iwasaki chegou a uma fórmula para o cálculo do Coeficiente de Potência, fórmula esta dada por:

$$CP = 0,25 \cdot \lambda^2 \cdot \overline{\sigma C_L} \quad (4-30)$$

onde  $\overline{\sigma C_L}$  - corresponde ao valor de  $\sigma C_L$  quando  $x$  igual a 75% do valor de  $x$ .

Os resultados encontrados são apresentados na tabela 3 ,

abaixo.

COEFICIENTE DE POTENCIA		
LAMBDA	SIGCLO	IWASAKI
.50	1.2362700	.0772669
1.00	.7403001	.1850750
1.50	.4602340	.2588816
2.00	.3034150	.3034150
2.50	.2114950	.3304610
3.00	.1544700	.3475575
3.50	.1171800	.3588638
4.00	.0916680	.3666720
4.50	.0735000	.3720938
5.00	.0602159	.3763494
5.50	.0501750	.3794485
6.00	.0424270	.3818430
6.50	.0363300	.3837356
7.00	.0314490	.3852502
7.50	.0274800	.3864375
8.00	.0242190	.3875040
8.50	.0215000	.3883438
9.00	.0192100	.3890025
9.50	.0172700	.3896544
10.00	.0156070	.3901750

Tabela 3. Coeficiente de Potência em função da razão de velocidades (MEI)

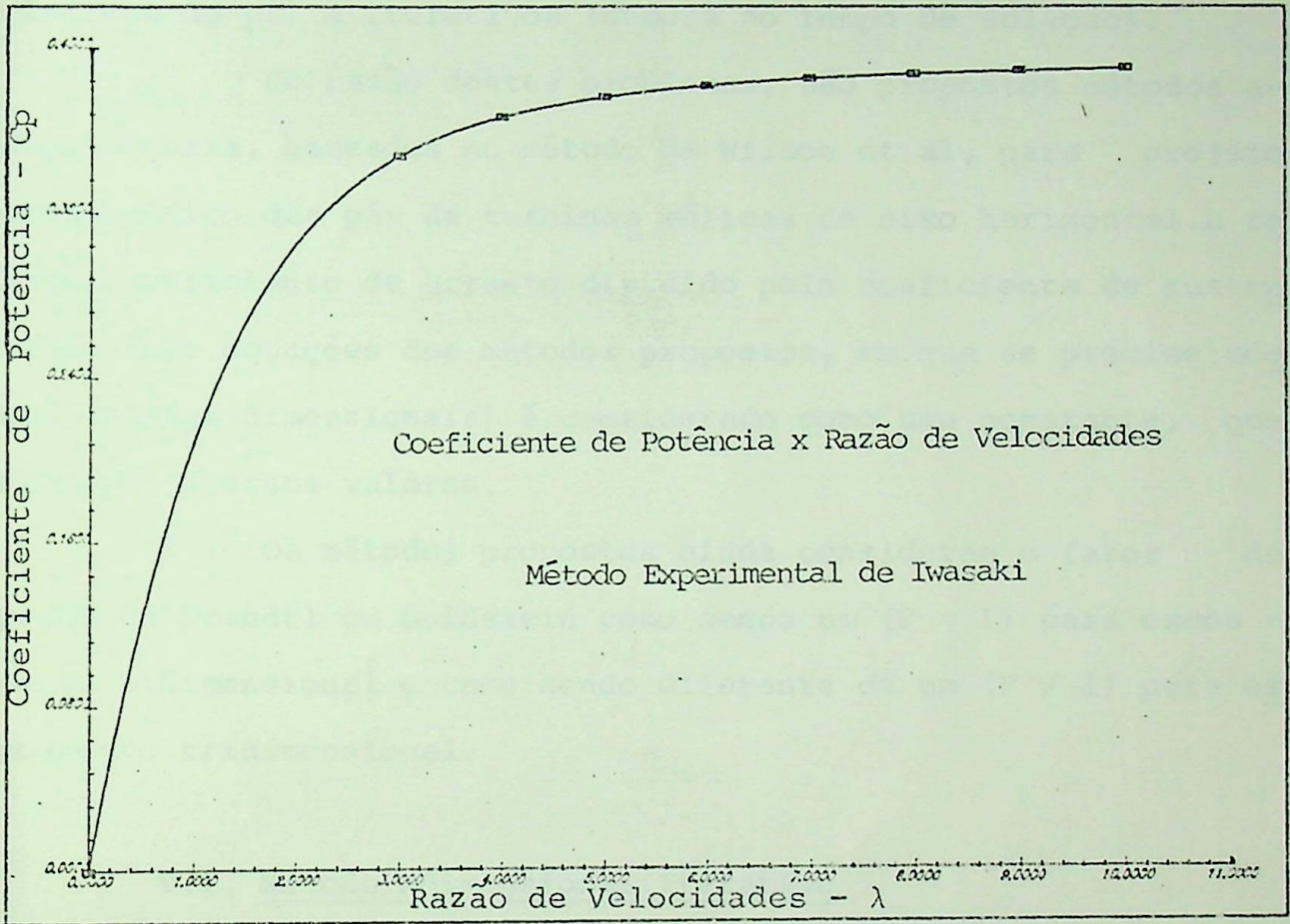


Gráfico 3. Variação do Coeficiente de Potência em função Razão de Velocidades (MEI)

## CAPÍTULO V. MÉTODOS PROPOSTOS

Os métodos descritos anteriormente, apresentam como características comuns, serem dimensionais (precisam das características da pá) e iterativos (demora no tempo de solução).

Em razão destes problemas, são propostos métodos adimensionais, baseados no método de Wilson et al, para projeto aerodinâmico das pás de turbinas eólicas de eixo horizontal. A relação coeficiente de arrasto dividido pelo coeficiente de sustentação (nas equações dos métodos propostos, em que se precise adotar valores dimensionais) é considerado como uma constante, que assumirá diversos valores.

Os métodos propostos ainda consideram o fator de perda de Prandtl ou Goldstein como sendo um ( $F = 1$ ) para escoamento bidimensional e como sendo diferente de um ( $F \neq 1$ ) para escoamento tridimensional.

### V.1. Método Adimensional Iterativo

Neste método, começa-se com ângulo do plano de rotação inicial, considerando inicialmente, os fatores de indução axial e de perturbação rotacional como sendo iguais a zero. Em seguida, calcula-se o ângulo do plano de rotação final, através das equações propostas e compara-se com o valor do ângulo do plano de rotação inicial. Faz-se o ângulo do plano de rotação inicial assumir o valor do ângulo do plano de rotação final e repete-se este procedimento até quando ângulo do plano de rotação inicial igual a ângulo do plano de rotação final, dentro de certa tolerância.

EquaçõesCálculo do ângulo do plano de rotação inicial,  $\phi_{\text{inicial}}$ 

Da equação (58) APÊNDICE [A], chamando de RR a relação de raios  $r/R$  e fazendo no início  $a = a' = 0$ , vem:

$$\phi_{\text{início}} = \text{tg}^{-1} \left[ \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{1}{RR} \right] \quad (5-1)$$

Cálculo do fator de indução axial,  $a^+$ 

Da primeira equação fundamental (45), chamando de  $\bar{R}$  a relação coeficiente de sustentação dividido pelo coeficiente de arrasto,  $\bar{R} = C_L/C_D$  e de KT a relação inversa,  $KT = 1/\bar{R}$ . Fazendo

$$\frac{\sigma C_L}{4} = \frac{B.c.C_L}{8 \pi r}, \text{ chamando de}$$

$$X^+ = \frac{B.c.C_L}{8 \pi r} \cdot \frac{\text{cotg } \phi}{\text{sen } \phi} \cdot \left( 1 + \frac{C_D}{C_L} \cdot \text{tg } \phi \right) \quad (5-2) \text{ e}$$

desenvolvendo a equação (5-2), vem:

$$X^+ = \frac{\sigma C_L}{4 \cdot \text{sen } \phi \cdot \text{tg } \phi} \cdot (1 + KT \cdot \text{tg } \phi) \quad (5-3)$$

Substituindo a equação (5-3) na equação (45), vem:

$$a^+ = \frac{X^+}{1 + X^+} \quad (5-4)$$

Cálculo do fator de perturbação rotacional,  $a'^{+}$

Da segunda equação fundamental (51), com as mesmas considerações feitas anteriormente, chamando de:

$$Y^+ = \frac{B.c.C_L}{8 \pi r} \cdot \frac{1}{\cos \phi} \cdot \left(1 - \frac{C_D}{C_L} \cdot \cotg \phi\right) \quad (5-5)$$

desenvolvendo a equação (5-5), temos:

$$Y^+ = \frac{\sigma C_L}{4 \cdot \cos \phi} \cdot \left(1 - \frac{KT}{\tg \phi}\right) \quad (5-6)$$

Substituindo a equação (5-6) na equação (51), temos:

$$a'^{+} = \frac{Y^+}{1 - Y^+} \quad (5-7)$$

Cálculo do ângulo do plano de rotação final ,

$\phi_{\text{final}}$

Do APÊNDICE [A], equação (58), vem:

$$\phi_{\text{final}} = \tg^{-1} \left[ \frac{(1 - a^+)}{(1 + a'^+)} \cdot \frac{1}{RR} \cdot \frac{1}{\lambda} \right] \quad (5-8)$$

Cálculo do fator de Prandtl ou Goldstein, F

Para calcular o fator F, usa-se as equações:

$$F = \frac{2}{\pi} \cdot \cos^{-1} (e^{-f}) \quad \text{Referência [1]} \quad (5-9)$$

$$f = \frac{B}{2} \cdot \left( \frac{1 - RR}{\text{sen } \phi} \right) \quad (5-10)$$

Onde o número de pás, B, é considerado como sendo igual a 2.

Considerando o fator de perda de Prandtl, as equações (5-3) e (5-6) ficam:

$$X^+ = \frac{\sigma C_L}{4 \cdot \text{sen } \phi \cdot \text{tg } \phi} \cdot (1 + KT \cdot F \cdot \text{tg } \phi) \quad (5-11)$$

$$Y^+ = \frac{\sigma C_L}{4 \cdot \text{cos } \phi} \cdot \left( 1 - \frac{KT \cdot F}{\text{tg } \phi} \right) \quad (5-12)$$

#### Cálculo do Coeficiente de Potência, Cp

É dado pela equação:

$$C_p = 8 \cdot \lambda^2 \cdot \int_0^1 a'^+ \cdot (1 - a'^+) \cdot F \cdot RR^3 \cdot d(RR) \quad (5-13)$$

#### Procedimento

Para um determinado valor de razão de velocidades na ponta,  $\lambda$ , e com os valores do produto solidez pelo coeficiente de sustentação,  $\sigma C_L$  (para o mesmo  $\lambda$ ), obtidos da solução do modelo de Glauert, valores estes que se encontram armazenados num arquivo, fazendo a relação de raios, RR, variar de 0 até 1, e atribuindo os seguintes valores a  $\bar{R}$ : 30, 40, 50, 70, 100,  $\infty$ , vem: (os passos de A a E, fazem parte da iteração para determinação do ângulo do plano de rotação).

- A. Cálculo do ângulo do plano de rotação inicial, pela equação (5-1).
- B. Cálculo do fator de indução axial, pelas equações: (5-3) e (5-4).
- C. Cálculo do fator de perturbação rotacional, pelas equações (5-6) e (5-7).
- D. Cálculo do ângulo do plano de rotação final, pela equação (5-8).
- E. Compara-se  $\varnothing_{\text{inicial}} = \varnothing_{\text{final}}$  dentro de uma tolerância pré-estabelecida, se não for igual dentro desta tolerância, volta-se ao passo B, e repete-se os cálculos.
- F. Se a opção escolhida for  $F \neq 1$ , calcula-se o fator de Prandtl ou Goldstein,  $F$ , através das equações: (5-9) e (5-10). Se a opção escolhida for  $F = 1$ , faz-se  $F = 1$ .
- G. Calcula-se os novos valores dos fatores de indução axial e perturbação rotacional, considerando o fator  $F$ , pelas equações: (5-11), (5-12), (5-4) e (5-7).
- H. Calcula-se o Coeficiente de Potência pela equação (5-13). A integral é resolvida pelo método dos trapézios.

#### Diagrama de blocos

O diagrama de blocos e a listagem do programa em linguagem FORTRAN, deste método, encontram-se no APÊNDICE [C].

#### Resultados

Para cada valor de razão de velocidades, é atribuído os seguintes valores a  $\bar{R}$ : 30, 40, 50, 70, 100,  $\infty$  e para cada um desses valores de  $\bar{R}$ , obtém-se o Coeficiente de Potên

cia para  $F = 1$ , conforme tabela 2.

Para  $F \neq 1$ , o único valor encontrado para Coeficiente de Potência, foi para razão de velocidades 10, em razão de problemas que serão discutidos posteriormente.

		Coeficiente de Potência					$F = 1$
$\lambda$ \ $\bar{R}$	30	40	50	70	100	$\infty$	
3,0	0,482948	0,498139	0,507288	0,517776	0,524917	0,543083	
3,5	0,483029	0,500635	0,511216	0,5219 *	0,532478	0,553587	
4,0	0,480993	0,501007	0,513052	0,526850	0,536661	0,560930	
4,5	0,476311	0,498746	0,512242	0,527702	0,538821	0,565999	
5,0	0,470343	0,495190	0,510136	0,5269 *	0,540111	0,570195	
5,5	0,463758	0,491044	0,507451	0,526236	0,540348	0,573355	
6,0	0,456806	0,486534	0,504487	0,524866	0,539861	0,575800	
6,5	0,448964	0,481132	0,500468	0,522889	0,539518	0,578389	
7,0	0,440836	0,475448	0,496250	0,5203 *	0,537943	0,579620	
7,5	0,432737	0,469798	0,492071	0,517561	0,536705	0,581448	
8,0	0,424131	0,463641	0,487373	0,514542	0,534941	0,582628	
8,5	0,4153 *	0,457114	0,482314	0,511164	0,532813	0,583436	
9,0	0,406493	0,450901	0,477577	0,508106	0,530777	0,584332	
9,5	0,397472	0,444324	0,472477	0,504689	0,528862	0,585372	
10,0	0,388483	0,437788	0,467416	0,501309	0,526747	0,586201	
$F \neq 1$							
10,0	0,370943	0,416511	0,443892	0,475223	0,498730	0,553713	

Tabela 4. Coeficiente de Potência em função da razão de velocidade para diversos valores de  $\bar{R}$  (MI)

NOTA: Significado do asterisco

\* No início da iteração, o valor de  $x$  é muito pequeno, e ao calcular o valor da equação (5-1), o arco tangente é calculado sobre o inverso de  $x$ , sendo o valor apresentado

muito alto, e aproximando-se muito de  $\pi/2$ , cujo valor o computador não consegue chegar a um resultado.

\* Para a confecção do gráfico os asteriscos são substituídos por valores que são obtidos por interpolação.

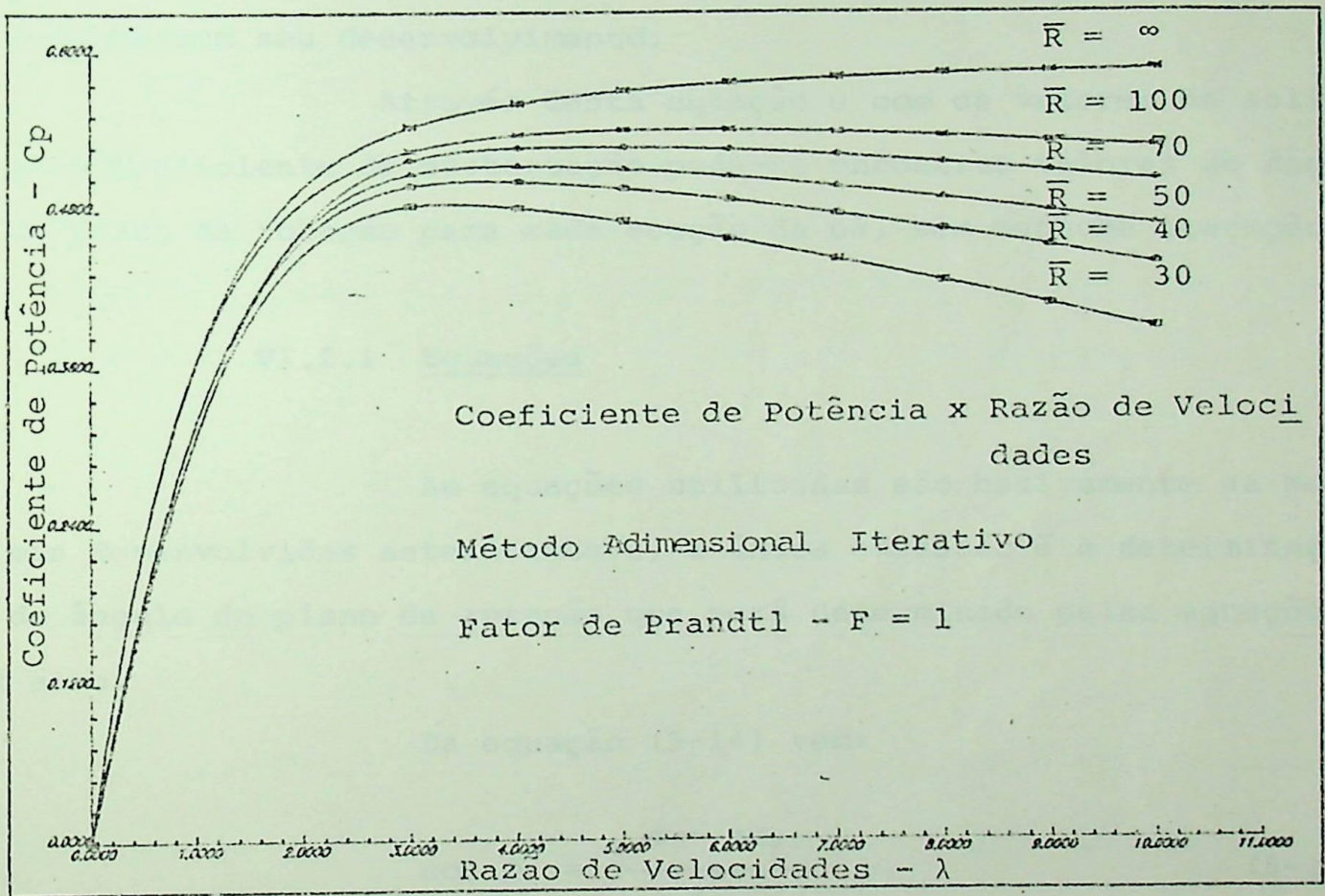


Gráfico 4. Variação do Coeficiente de Potência em função da razão de velocidades para diversos de  $\bar{R}$ , quando  $F = 1$  (MI).

## V.2. Método Adimensional Não Iterativo

Este método emprega uma equação para o produto so lidez pelo coeficiente de sustentação. A equação utilizada é a seguinte:

$$\sigma C_L = 4 \cdot (1 - \cos \phi) \quad (5-14)$$

Esta equação é encontrada na referência [5], juntamente com seu desenvolvimento.

Através desta equação e com os valores de solidez pelo coeficiente de sustentação pode-se encontrar valores do ângulo do plano de rotação para cada secção da pá, sem nenhuma iteração.

### VI.2.1 Equações

As equações utilizadas são basicamente as mesmas desenvolvidas anteriormente, a única exceção é a determinação do ângulo do plano de rotação que será determinado pelas equações a b abaixo.

Da equação (5-14) vem:

$$\cos \phi = \frac{4 - \sigma C_L}{4} \quad (5-15)$$

E da trigonometria com a equação (5-15) tem-se:

$$\sin \phi = \frac{(8 - \sigma C_L)^{1/2} \cdot (\sigma C_L)^{1/2}}{4} \quad (5-16)$$

E com os valores das equações (5-3), (5-4), (5-6), (5-7) desenvolvidas anteriormente, calcula-se  $\phi$  pela equação (4-1).

$$\phi = \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{a'^+ \cdot r\Omega}{a^+ \cdot V_\infty} \right) = \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{a'^+}{a^+} \cdot x \right) \quad (5-17)$$

onde

$$x = \frac{r}{R} \cdot \lambda \quad \text{ou} \quad x = RR \cdot \lambda$$

### Procedimento

Para um determinado valor de razão de velocidades,  $\lambda$ , e com os valores do produto de solidez pelo coeficiente de sustentação,  $\sigma C_L$  obtidos do modelo de Glauert, e que se encontram armazenados num arquivo, atribuí-se os seguintes valores a  $\bar{R}$ : 30, 40, 50, 70, 100,  $\infty$ , vem os seguintes passos:

- A. Cálculo do ângulo do plano de rotação pelas equações: (5-15), (5-16), (5-3), (5-4), (5-6), (5-7), (5-17) respectivamente.
- B. Se a opção for  $F \neq 1$ , calcular o fator  $F$ , pelas equações (5-9) e (5-1), se não, fazer  $F = 1$ .
- C. Calcular fator de indução axial, pela equação (5-11) e (5-4).
- D. Calcular fator de perturbação rotacional, pela equação (5-12) e (5-7).
- E. Calcular Coeficiente de Potência pela equação (5-13).

A integral é resolvida aplicando o método dos trapézios.

### Diagrama de blocos

O diagrama de blocos e a listagem do programa em linguagem FORTRAN para o método adimensional não iterativo, encontram-se no APÊNDICE [C].

Resultados

Para cada valor de razão de velocidades ,  
 é atribuído os seguintes valores a  $\bar{R}$ : 30, 40, 50, 70, 100,  $\infty$  e  
 para cada um dos valores de  $\bar{R}$ , obtêm-se o coeficiente de potên -  
 cia, para  $F = 1$  e  $F \neq 1$ , conforme mostram as tabelas 5 e 6.

		Coeficiente de Potência					
		$\bar{R}$	30	40	50	70	100
$\lambda$							
3,0		0,481719	0,497536	0,507060	0,517975	0,526183	0,545409
3,5		0,481728	0,499880	0,510804	0,523320	0,532728	0,554754
4,0		0,479032	0,499544	0,511884	0,526018	0,536640	0,561497
4,5		0,474550	0,497441	0,511209	0,526974	0,538820	0,566531
5,0		0,468841	0,494126	0,509330	0,526737	0,539814	0,570397
5,5		0,462258	0,489949	0,506596	0,525652	0,539965	0,573435
6,0		0,455035	0,485140	0,503236	0,523948	0,539503	0,575869
6,5		0,447331	0,479858	0,499407	0,521779	0,538579	0,577851
7,0		0,439260	0,474214	0,495219	0,519255	0,537304	0,579489
7,5		0,430900	0,468287	0,490751	0,516456	0,535756	0,580859
8,0		0,422313	0,462136	0,486063	0,513438	0,533990	0,582017
8,5		0,413543	0,455806	0,481196	0,510245	0,532052	0,583007
9,0		0,404623	0,449329	0,476185	0,506909	0,529972	0,583858
9,5		0,395581	0,442732	0,471056	0,503456	0,527777	0,584598
10,0		0,386437	0,436036	0,465828	0,499906	0,525487	0,585244

Tabela 5. Coeficiente de Potência em função da razão de  
 velocidades para diversos valores de  $\bar{R}$  e  $F = 1$ ,  
 (MNI)

		Coeficiente de Potência					
		30	40	50	70	100	$\infty$
$\lambda$	$\bar{R}$						
3,0		0,427597	0,441197	0,463512	0,454018	0,461591	0,477787
3,5		0,431739	0,446120	0,454742	0,464648	0,472095	0,489815
4,0		0,433171	0,450314	0,460181	0,471392	0,479736	0,499252
4,5		0,435549	0,454342	0,466798	0,474746	0,485394	0,507809
5,0		0,434441	0,455075	0,467425	0,481522	0,492073	0,517737
5,5		0,432097	0,455012	0,468698	0,484252	0,495853	0,522872
6,0		0,428676	0,453946	0,468986	0,486099	0,498869	0,528489
6,5		0,424294	0,451982	0,468460	0,487159	0,501128	0,533472
7,0		0,419106	0,449272	0,467204	0,487534	0,502711	0,537823
7,5		0,413222	0,445923	0,465332	0,487348	0,503735	0,541669
8,0		0,405572	0,441950	0,462911	0,486608	0,504269	0,545046
8,5		0,400523	0,459600	0,459723	0,485382	0,504327	0,548030
9,0		0,393166	0,433546	0,457668	0,490634	0,503585	0,550596
9,5		0,385557	0,428445	0,453893	0,482779	0,504368	0,552235
10,0		0,377695	0,377695	0,423130	0,450067	0,480595	0,555937

Tabela 6. Coeficiente de Potência em função da razão de velocidades para diversos valores de  $\bar{R}$  e  $F \neq 1$ , (MNIF).

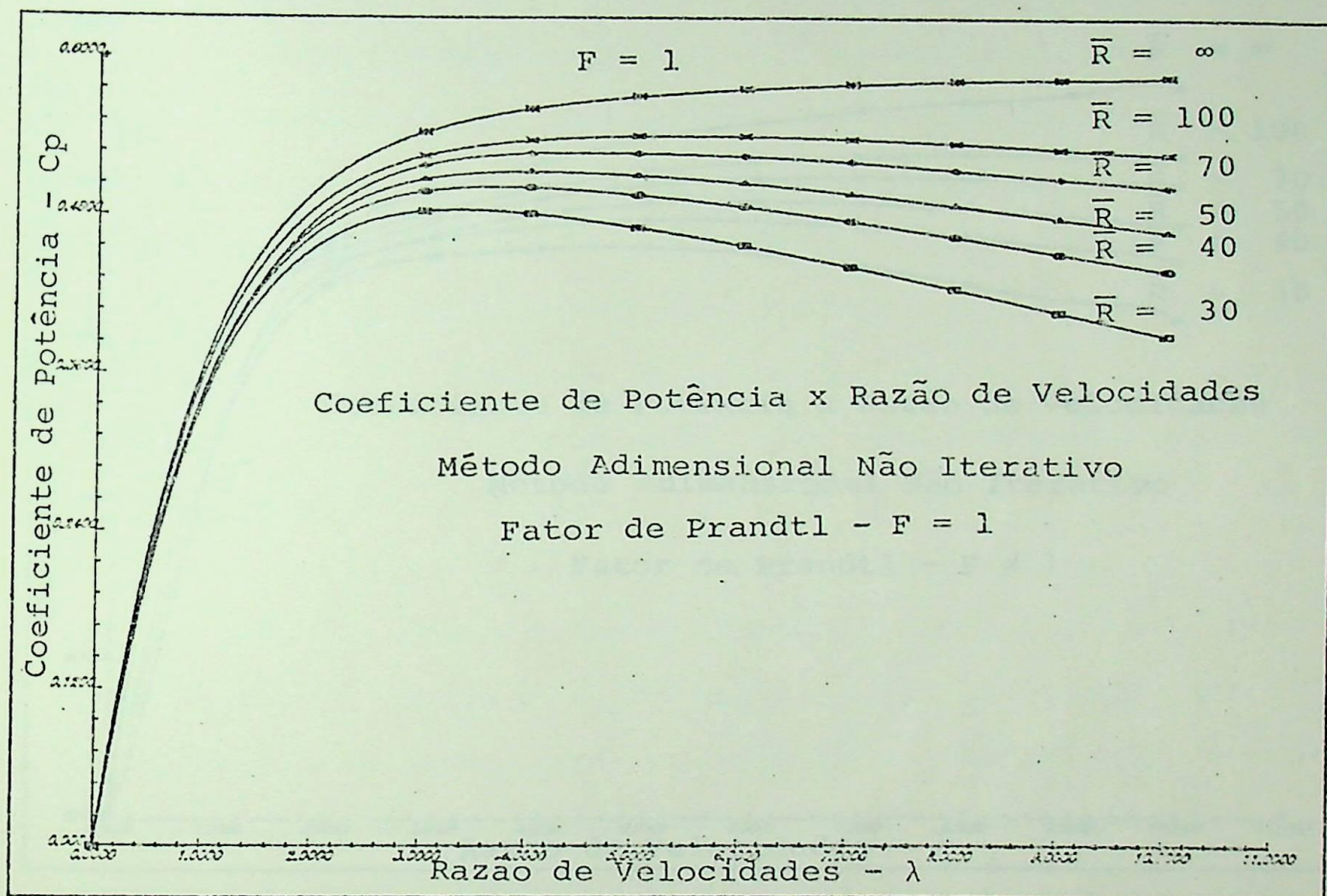


Grafico 5. Variação do Coeficiente de Potência em função da razão de velocidades para diversos valores de  $\bar{R}$ , considerando  $F = 1$  (MNI)

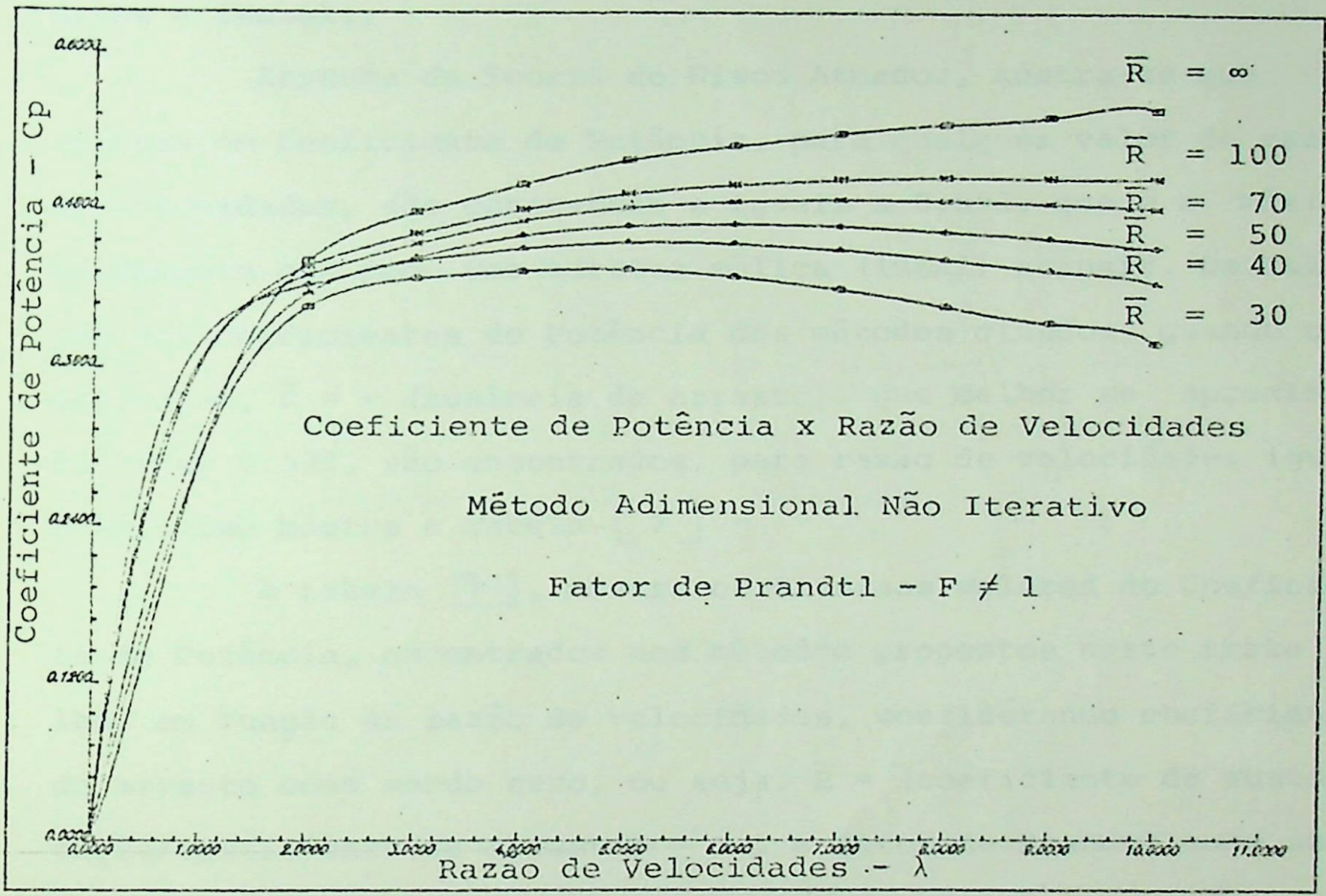


Gráfico 6. Variação do Coeficiente de Potência em função da razão de velocidades para diversos valores de  $\bar{R}$ , considerando  $F \neq 1$  (MNIF)

### V.3. Comparações dos Métodos Propostos com Outros Métodos

Neste item faz-se comparações dos resultados encontrados nos Métodos Adimensionais Iterativo e Não Iterativo (desenvolvidos pelo autor), com os métodos de Glauert, Shepherd, Griffiths e Iwasaki.

Através da Teoria do Disco Atuador, mostra-se que os valores do Coeficiente de Potência, para qualquer valor de razão de velocidades, são constantes e iguais a 0.593, que é o máximo rendimento que pode uma turbina eólica (ideal) atingir. Os valores dos Coeficientes de Potência dos métodos citados, quando considera-se,  $\bar{R} = \infty$  (ausência de arrasto), que melhor se aproximam do valor 0.593, são encontrados, para razão de velocidades igual a 10, como mostra a tabela [ 7 ].

A tabela [ 7 ], mostra os diversos valores do Coeficiente de Potência, encontrados nos métodos propostos neste trabalho, em função da razão de velocidades, considerando coeficiente de arrasto como sendo zero, ou seja,  $\bar{R} = (\text{coeficiente de sustentação/coeficiente de arrasto}) = \infty$ , e fator de Prandtl como sendo igual a um ( $F = 1$ ).

		Coeficiente de Potência, $\bar{R} = \infty$ , $F=1$				
$\lambda$	TDA	GLAUERT	SHEPHERD	GRIFFITHS *	MIF1	MNIF1
2	0.593	0.5116	0.5169	0.50	0.5073	0.5112
3	0.593	0.5458	0.5479	0.54	0.5431	0.5454
4	0.593	0.5619	0.5628	0.56	0.5609	0.5615
5	0.593	0.5708	0.5710	0.57	0.5702	0.5704
6	0.593	0.5772	0.5763	0.577	0.5758	0.5759
7	0.593	0.5808	0.5796	0.58	0.5796	0.5795
8	0.593	0.5850	0.5821	0.585	0.5826	0.5820
9	0.593	0.5886	0.5837	0.587	0.5843	0.5834
10	0.593	0.5894	0.5840	0.589	0.5862	0.5852

\* Os valores do coeficiente de potência deste método, foram obtidos diretamente do gráfico da referência [3].

Tabela 7. Comparação de coeficiente de potência, em função da razão de velocidades, para  $\bar{R} = \infty$  e  $F = 1$ .

Analisando a tabela [7], observa-se que os valores do coeficiente de potência encontrados no Método Adimensional Não Iterativo, apresentam os melhores resultados, quando comparados com o Método de Shepherd, para praticamente todos os valores de razão de velocidades, e com o Método de Glauert, para razão de velocidades menores que 6. O Método Adimensional Iterativo apresentam os melhores resultados quando comparado com o Método de Griffiths, para praticamente todos valores de razão de velocidades, e do Método de Glauert, para razão de velocidades maiores que 6.

Embora todos os valores dos dois métodos propostos, se aproximem dos valores dos métodos referenciados.

Estas análises podem ser melhores verificadas quando comparadas separadamente, como mostram os gráficos [7], [8] e [9].

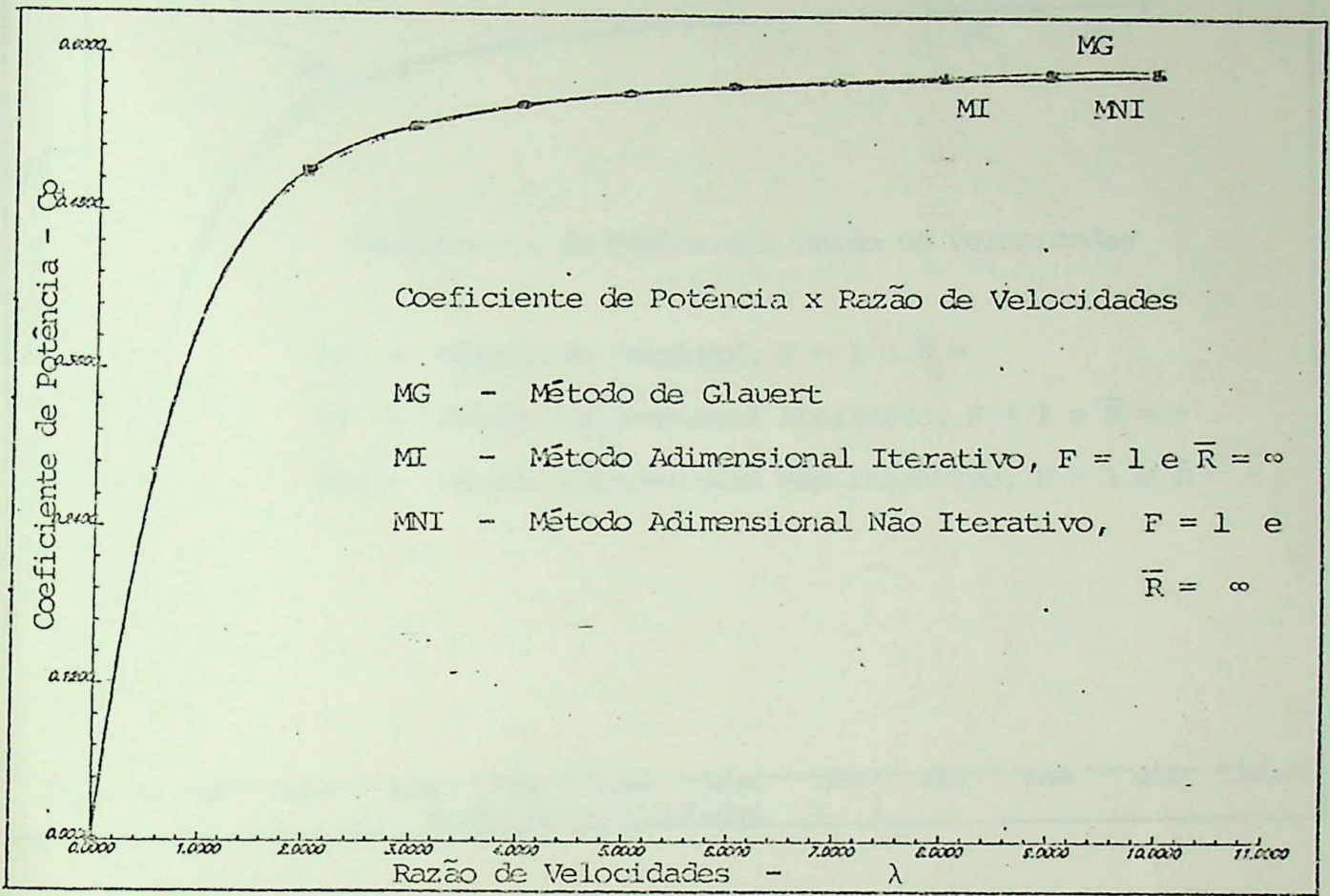


Gráfico 7. Comparação entre o Método de Glauert e os Métodos Adimensionais Iterativo e Não Iterativo, para  $\bar{R} = \infty$  e  $F = 1$ .

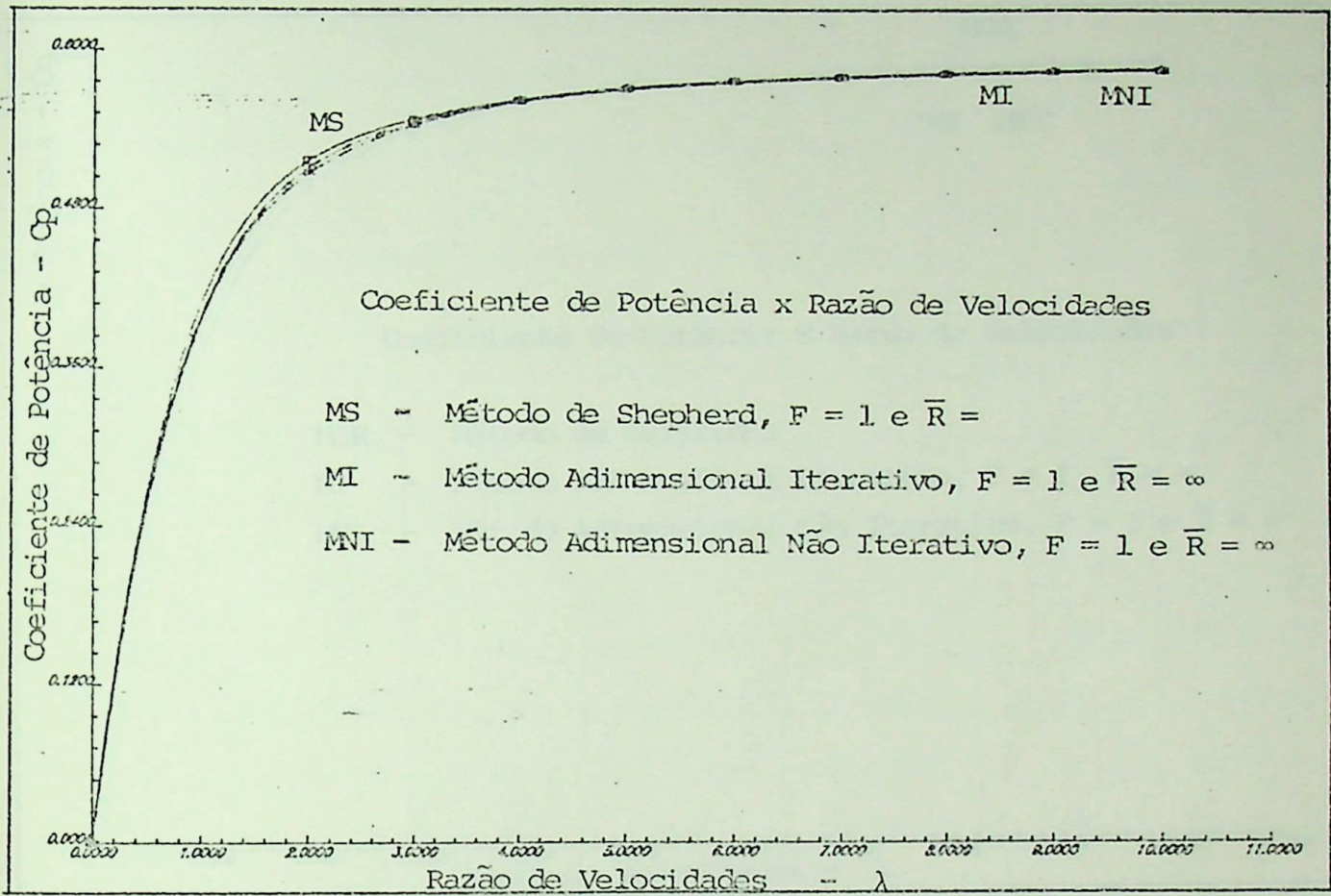


Gráfico 8. Comparação entre o Método de Shepherd e os Métodos Adimensionais Iterativo e Não Iterativo, para  $\bar{R} = \infty$  e  $F = 1$ .

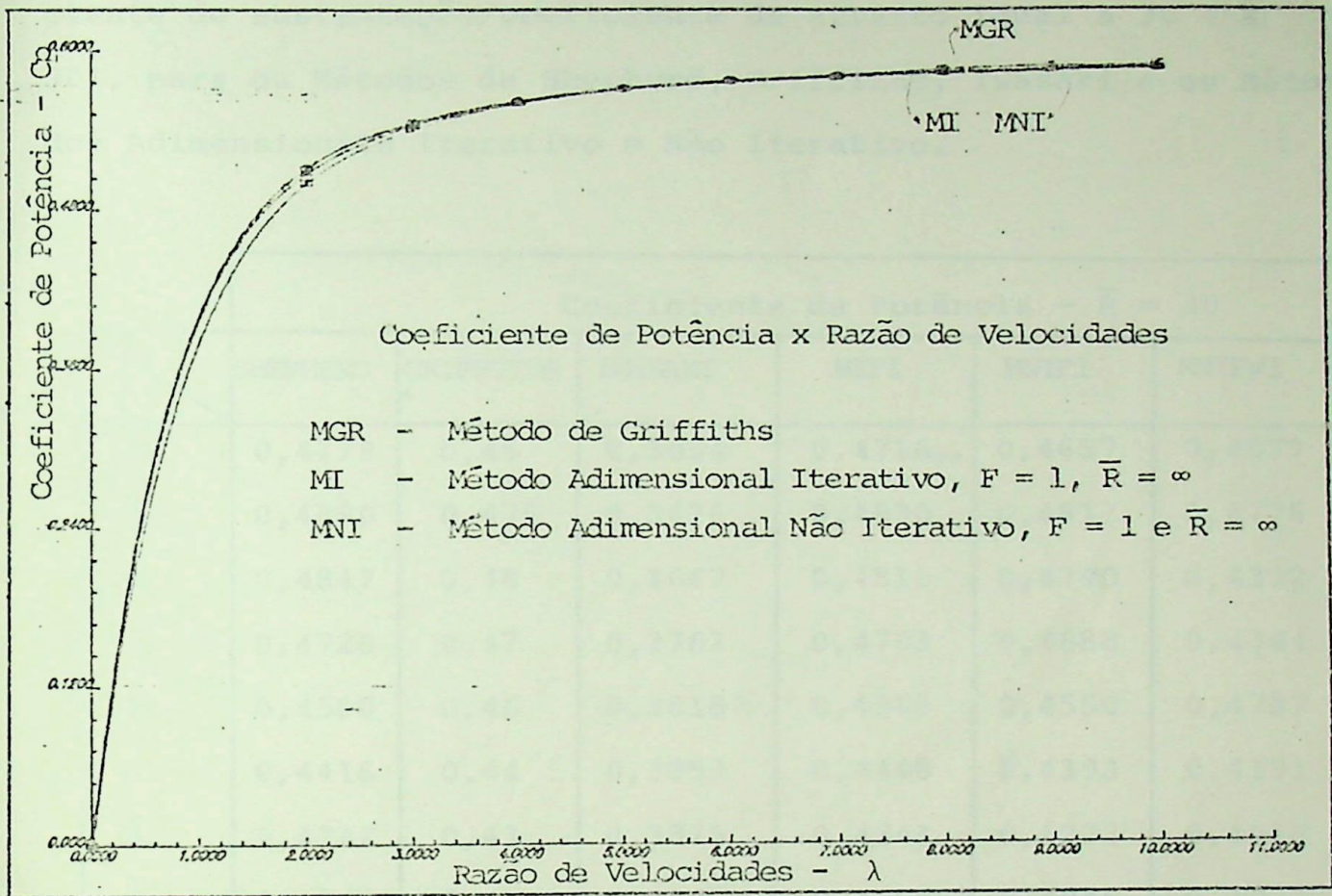


Gráfico 9. Comparação entre o Método de Griffiths e os Métodos Adimensionais Iterativo e Não Iterativo, para  $\bar{R} = \infty$  e  $F = 1$

A tabela [ 8 ], mostra os valores do coeficiente de potência em função da razão de velocidades, para relação coeficiente de sustentação/coeficiente de arrasto igual a 30 ( $\bar{R} = 30$ ), para os Métodos de Shepherd, Griffiths, Iwasaki e os Métodos Adimensionais Iterativo e Não Iterativo,

Coeficiente de Potência - $\bar{R} = 30$						
$\lambda$	SHEPHERD	GRIFFITHS*	IWASAKI	MIF1	MNIF1	MNIF1
2	0,4779	0,45	0,3034	0,4716**	0,4657	0,4079
3	0,4890	0,475	0,3476	0,4830	0,4817	0,4776
4	0,4847	0,48	0,3667	0,4810	0,4790	0,4332
5	0,4726	0,47	0,3763	0,4703	0,4688	0,4344
6	0,4580	0,46	0,3818	0,4568	0,4550	0,4787
7	0,4416	0,44	0,3853	0,4408	0,4393	0,4191
8	0,4242	0,43	0,3875	0,4241	0,4223	0,4056
9	0,4061	0,41	0,3890	0,4065	0,4046	0,3932
10	0,3874	0,397	0,3902	0,3885	0,3864	0,3777

\* Valores obtidos diretamente do gráfico da referência [ 3 ]

\*\* Valor obtido por interpolação

Tabela 8. Comparação de Coeficiente de Potência em função da razão de velocidades, para  $\bar{R} = 30$

Analisando a tabela [ 8 ], observa-se que os valores do Coeficiente de Potência do Método Adimensional Iterativo, melhor se aproximam do Método de Shepherd, para todos os valores de razão de velocidades, e do Método de Griffiths para razão de velocidades maiores que 4. Embora os valores obtidos nos dois métodos propostos estejam muito próximos dos Métodos de Shepherd e de Griffiths, como mostra o gráfico [ 10 ].

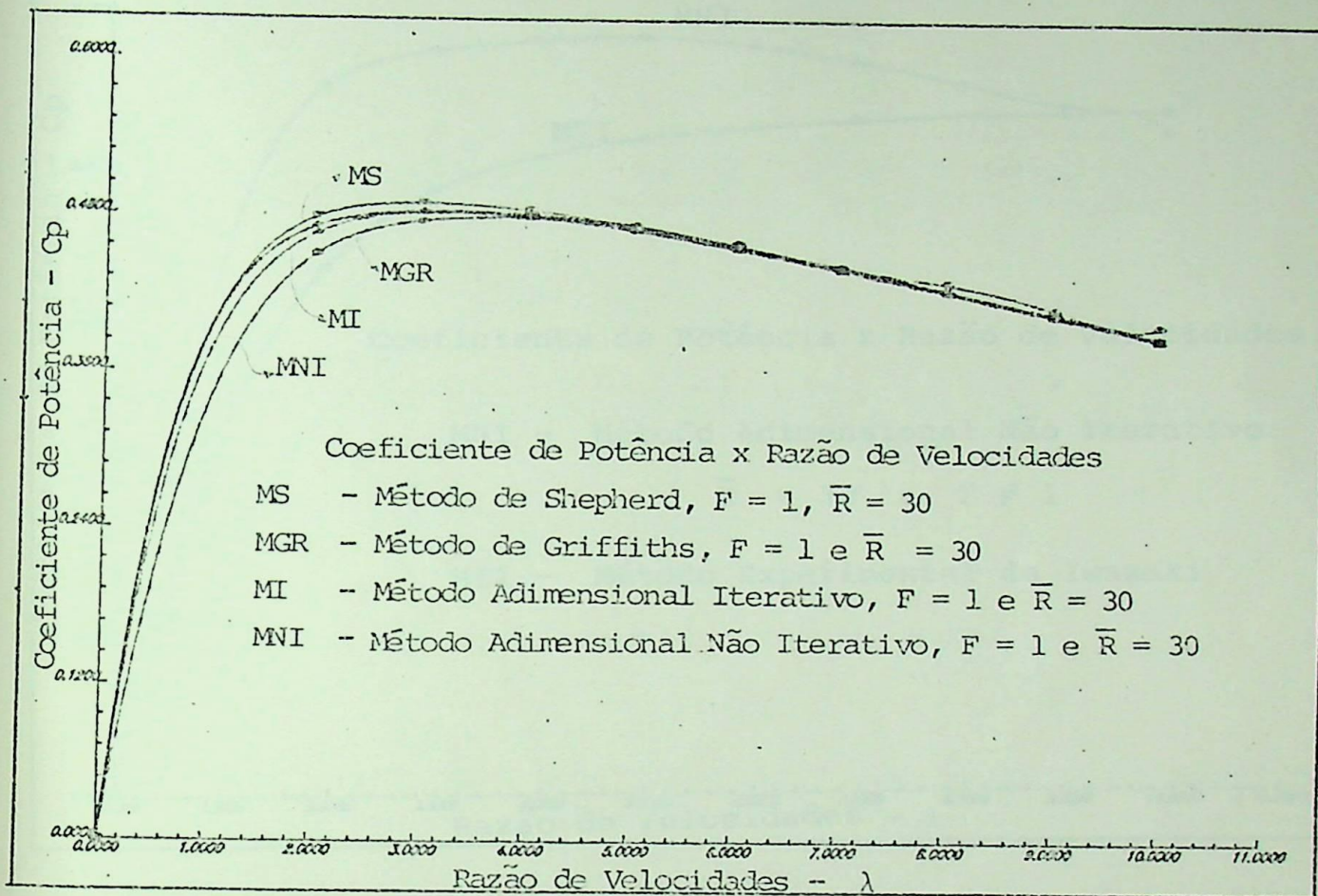


Gráfico 10. Comparação entre os Métodos de Shepherd e Griffiths com os Métodos Adimensionais propostos, para  $\bar{R} = 30$  e  $F = 1$

Ao se comparar os valores do coeficiente de potência, obtidos no Método Adimensional Não Iterativo, para fator de Prandtl diferente de um ( $F \neq 1$ ) e  $\bar{R} = 30$ , com o Método Experimental de Iwasaki, verifica-se que a medida que a razão de velocidades aumenta de valor, os valores do coeficiente de potência do Método Adimensional Não Iterativo, se aproximam dos valores do Método Experimental de Iwasaki, chegando esses valores a ficarem iguais entre razão de velocidades 9 e 10, como mostra o gráfico [11].

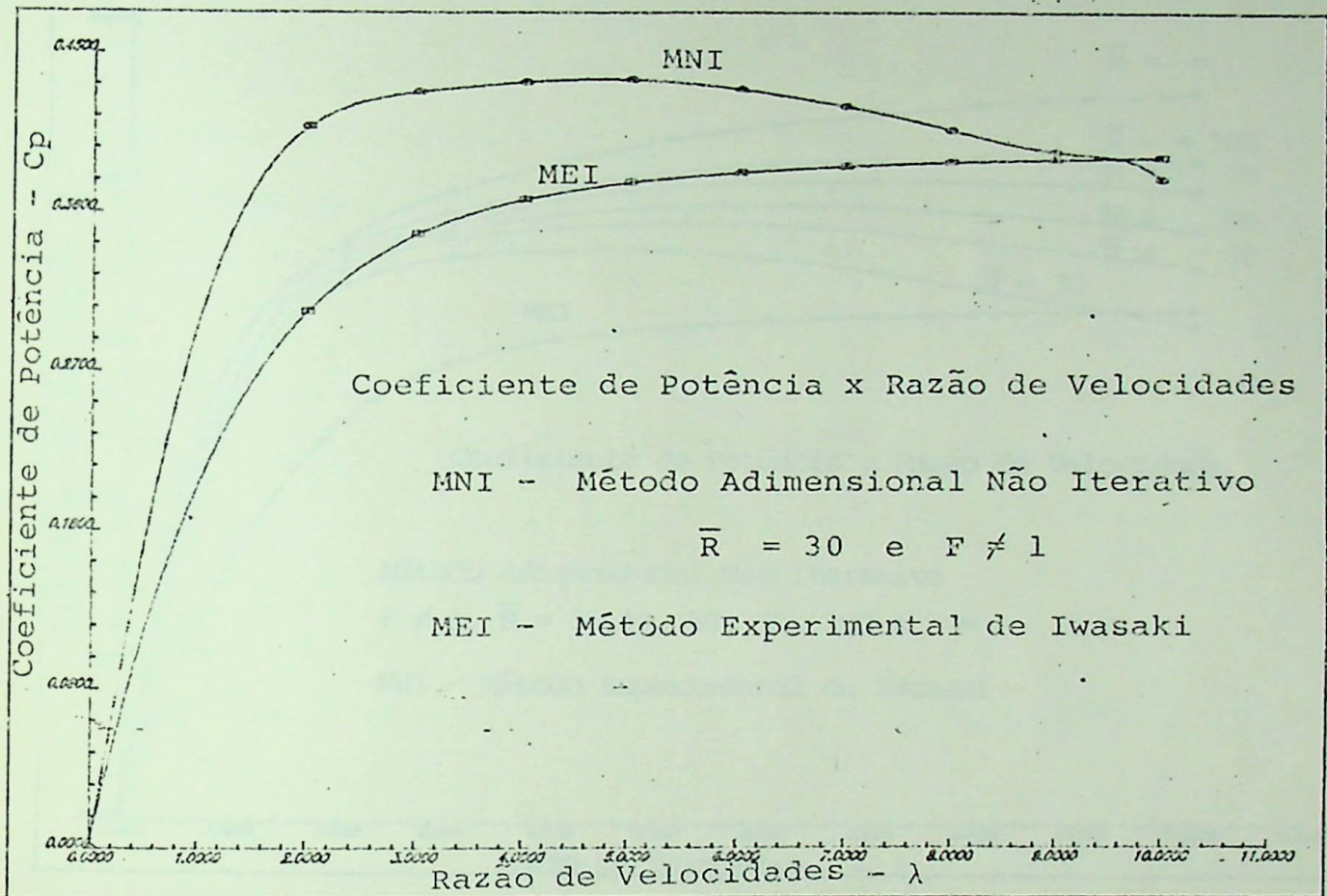


Gráfico 11. Comparação entre o Método Experimental de Iwasaki e o Método Adimensional Não Iterativo para  $\bar{R} = 30$  e  $F \neq 1$ .

O Gráfico [12], mostra que quanto menor for a relação  $\bar{R}$  do Método Adimensional Não Iterativo para fator de Prandtl diferente de um ( $F \neq 1$ ), mais os valores do coeficiente de potência se aproximam do Método Experimental de Iwasaki.

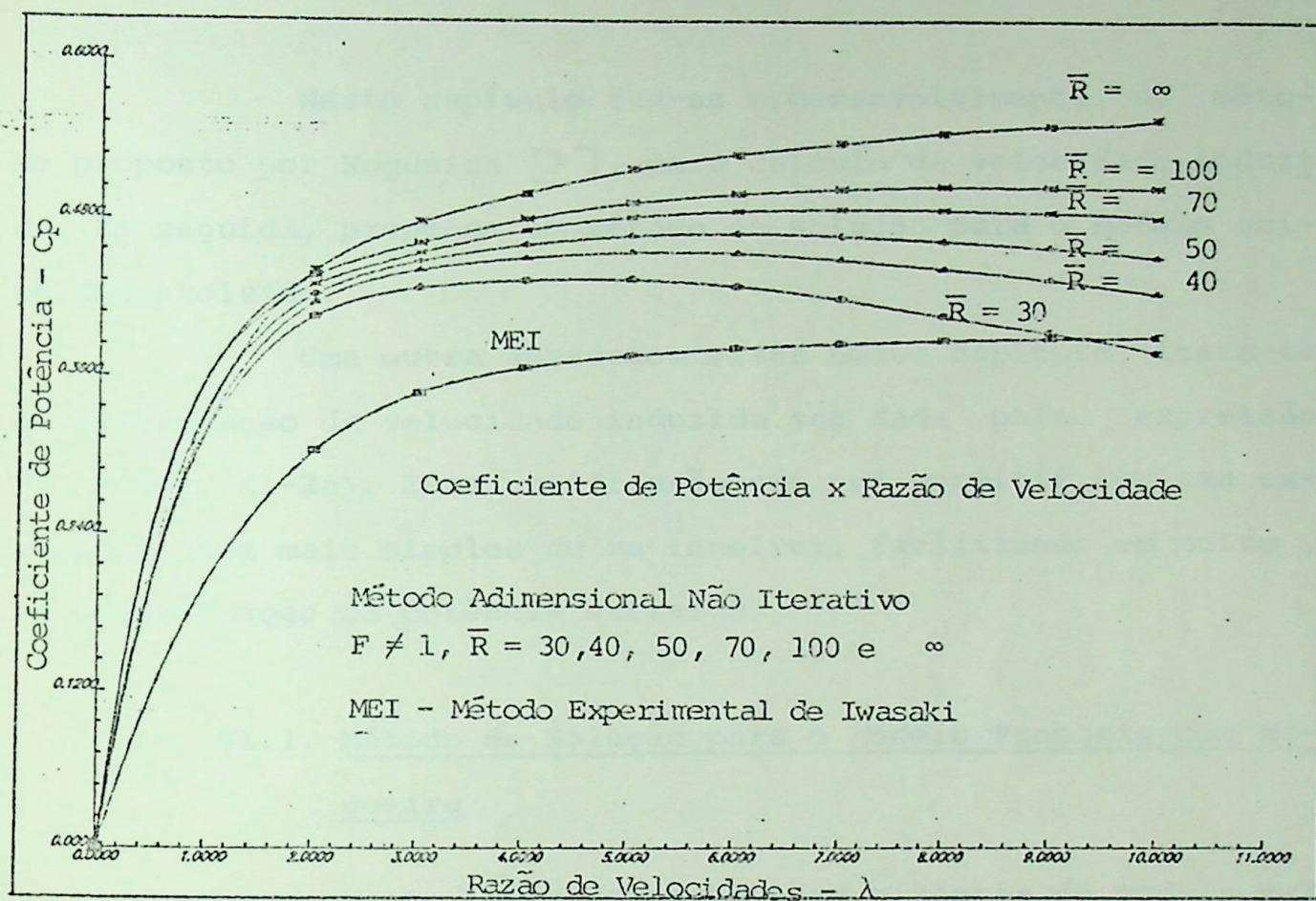


Gráfico 12. Comparação entre o Método Experimental de Iwasaki e o Método Adimensional Não Iterativo para  $F \neq 1$  e vários valores de  $\bar{R}$ .

## CAPÍTULO VI. VELOCIDADE INDUZIDA EM TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL

Neste capítulo faz-se o desenvolvimento do método proposto por Nogueira [7], para cálculo da velocidade induzida. Em seguida, propõe-se um método de solução para o modelo acima desenvolvido.

Uma outra abordagem vista neste capítulo, trata-se da verificação da velocidade induzida ser dada pela expressão  $V_i = V_\infty \cdot (1-2a)$ . Esta verificação vai nos permitir ter uma expressão, bem mais simples de se resolver, facilitando em muito, na determinação da potência extraída.

### VI.1. Método de Solução para o Modelo Proposto por Nogueira

Neste ítem, desenvolve-se a teoria do modelo proposto por Nogueira [7], modelo este obtido combinando-se a Teoria da Pã, com o Princípio da Conservação da Quantidade de Movimento. Propõem-se um método de solução para este modelo, visto que Nogueira em seu trabalho [7], não propõe nenhum método de solução.

#### Desenvolvimento do Método de Nogueira

Utilizando-se a Teoria do Momentum é possível calcular a velocidade induzida para um elemento de pã da hélice e com isto na Teoria do Elemento de Pã levar em conta tal efeito, obtendo resultados mais precisos.

A figura (5), representa o triângulo de velocidades de uma hélice retirando energia do ar numa dada seção ao longo da pã.

As forças aerodinâmicas e a velocidade induzida,  $V_i$ ,



Substituindo (6-5) e (6-6) em (6-3) e (6-4) temos:

$$dT = \frac{B}{2} \cdot \rho \cdot V_R^2 \cdot c \cdot (C_L \cdot \cos \phi + C_D \cdot \sin \phi) dr \quad (6-7)$$

$$dQ = \frac{B}{2} \cdot \rho \cdot V_R^2 \cdot c \cdot (C_L \cdot \sin \phi - C_D \cdot \cos \phi) \cdot r dr \quad (6-8)$$

Sendo a Potência extraída do vento, e  $\Omega$  a velocidade angular da hélice, temos:

$$dP = \Omega \cdot dQ$$

Substituindo (6-8) em (6-9),

$$dP = \frac{B}{2} \cdot \Omega \cdot \rho \cdot V_R^2 \cdot c \cdot (C_L \cdot \sin \phi - C_D \cdot \cos \phi) \cdot r dr \quad (6-10)$$

Para calcular  $V_R$  e  $\phi$  precisa-se calcular a velocidade de induzida,  $V_i$  o que far-se-á com uso da Teoria do Momentum.

A velocidade através da hélice:

$$V_h = (1 - a) \cdot V_\infty = V_\infty - a \cdot V_\infty \quad (6-11)$$

Através da referência [18] comprova-se que:

$$a \cdot V_\infty = V_i \cdot \cos \phi$$

Substituindo em (6-11), vem:

$$V_h = V_\infty - V_i \cdot \cos \phi \quad (6-12)$$

O fluxo de ar através da seção considerada

$$d\dot{m} = \rho \cdot dA \cdot V_h \quad (6-13)$$

substituindo (6-12) em (6-13),

$$d\dot{m} = \rho \cdot (V_{\infty} - V_i \cdot \cos \phi) \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \quad (6-14)$$

Pela Teoria do Momentum e da Pá, considerando que para efeito de comparar a tração nas duas teorias, o arrasto não deve ser considerado, tem-se:

$$dT = d\dot{m} \cdot (V_{\infty} - V_s) = d\dot{m} \cdot 2 \cdot a \cdot V_{\infty} \quad (6-15)$$

Substituindo  $a \cdot V_{\infty} = V_i \cdot \cos \phi$  e (6-14) em (6-15) vem,

$$dT = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \rho \cdot (V_{\infty} - V_i \cdot \cos \phi) \cdot 2 \cdot V_i \cdot \cos \phi \cdot dr \quad (6-16)$$

Por outro lado, da figura (5) tem-se:

$$dT = dL \cdot \cos \phi \quad (6-17)$$

Substituindo (6-5) em (6-17),

$$dT = \frac{B}{2} \cdot \rho \cdot V_R^2 \cdot C_L \cdot c \cdot \cos \phi \cdot dr \quad (6-18)$$

Igualando a equação (6-18) com a equação (6-16) e cancelando os termos em comum vem:

$$\cos \phi \cdot V_i^2 - V_{\infty} \cdot V_i + \frac{B \cdot V_R^2 \cdot C_L \cdot c}{8 \pi r} = 0 \quad (6-19)$$

Ainda da figura (5)

$$\cos \phi = \cos (\phi' - \theta') = \cos \phi' \cdot \cos \theta' + \sin \phi' \cdot \sin \theta' \quad (6-20)$$

$$\sin \theta' = V_i / W \quad (6-21)$$

Desenvolvendo  $\cos \theta'$  em s\u00e9rie de Taylor at\u00e9 o 2\u00b0 membro tem-se:

$$\cos \theta' = (1 - \text{sen}^2 \theta')^{\frac{1}{2}} = 1 - \frac{\text{sen}^2 \theta'}{2} \quad (6-22)$$

e substituindo a equa\u00e7\u00e3o (6-21) em (6-22) e levando-a em (6-20) tem-se:

$$\cos \phi = \cos \phi' - \frac{1}{2} \cdot \frac{V_i^2}{W^2} \cdot \cos \phi' + \frac{V_i}{W} \cdot \text{sen } \phi' \quad (6-23)$$

substituindo a equa\u00e7\u00e3o (6-23) na equa\u00e7\u00e3o (6-19), e ainda, fazendo:  $V_R^2 = W^2 - V_i^2$ , vem:

$$\begin{aligned} & \frac{\cos \phi'}{2} \cdot V_i^4 - \frac{\text{sen } \phi'}{W} \cdot V_i^3 - \left( \cos \phi' - \frac{B.c.C_L}{8 \pi r} \right) \cdot V_i^2 + \\ & + V_\infty \cdot V_i - \frac{B.c.C_L}{8 \pi r} \cdot W^2 = 0 \end{aligned} \quad (6-24)$$

Utilizando a defini\u00e7\u00e3o de solidez, e dividindo a equa\u00e7\u00e3o (6-24) por  $W^2$ , vem:

$$\begin{aligned} & 2 \cdot \cos \phi' \cdot \frac{V_i^4}{W^4} - 4 \cdot \text{sen } \phi' \cdot \frac{V_i^3}{W^3} - \left( 4 \cdot \cos \phi' - \sigma C_L \right) \cdot \frac{V_i^2}{W^2} + \\ & + 4 \cdot V_\infty \cdot \frac{V_i}{W^2} - \sigma C_L = 0 \end{aligned} \quad (6-25)$$

Da figura (5), sabe-se que  $\text{sen } \phi' = \frac{V_\infty}{W}$  e chamando de "y" a rela\u00e7\u00e3o  $V_i/V_\infty$ , vem que:

$$\frac{V_i}{W} = y \cdot \text{sen } \phi' \quad (6-26)$$

Substituindo a equação (6-26) em (6-25) vem:

$$2 \cdot \cos \phi' \cdot \sin^4 \phi' \cdot y^4 - 4 \cdot \sin^4 \phi' \cdot y^3 - (4 \cdot \cos \phi' - \sigma C_L) \cdot \sin^2 \phi' \cdot y^2 + 4 \cdot \sin^2 \phi' \cdot y - \sigma C_L = 0 \quad (6-27)$$

A equação (6-27) é a expressão utilizada para a determinação de velocidade induzida,  $V_i$ , para isto basta resolver a equação polinomial do 4º grau em  $y$  (velocidade induzida/velocidade livre).

A seguir propõem-se um método para a solução de equação (6-27).

#### Um Método de Solução para o Modelo

O método proposto consta em se calcular o ângulo total,  $\phi'$ , para cada secção da pá, através de uma equação que se obtém do modelo, e com valor do produto solidez pelo coeficiente de sustentação, obtidos da solução do modelo de Glauert, resolve-se a equação polinomial de 4º grau, aplicando-se o método de Newton - Raphson.

#### Cálculo do Ângulo Total, $\phi'$

Da figura (5) e com o auxílio da trigonometria vem:

$$\operatorname{tg} \phi' = \frac{V_\infty}{r\Omega} \quad (6-28)$$

Por outro lado, sabe-se que a razão de velocidade local,  $x$ , é dada por:

$$x = \frac{r\Omega}{V_\infty}$$

e substituindo na equação (6-28) vem:

$$\operatorname{tg} \phi' = \frac{1}{x}$$

$$\therefore \phi' = \operatorname{arctg} (x^{-1}) \quad (6-29)$$

#### Equação Polinomial Usada

$$R = C_4 \cdot y^4 + C_3 \cdot y^3 + C_2 \cdot y^2 + C_1 \cdot y^1 + C_0$$

onde os coeficientes:  $C_1, C_2, C_3, C_4$  e  $C_0$  são dados por:

$$C_4 = 2 \cdot \cos \phi' \cdot \operatorname{sen}^4 \phi'$$

$$C_3 = -4 \cdot \operatorname{sen}^4 \phi'$$

$$C_2 = - (4 \cdot \cos \phi' - \sigma C_L) \cdot \operatorname{sen}^2 \phi'$$

$$C_1 = 4 \cdot \operatorname{sen}^2 \phi'$$

$$C_0 = -\sigma C_L$$

#### Procedimento

- A. Dados de entrada: razão de velocidade local e seu respectivo produto solidez por coeficiente de sustentação obtidos da solução do Modelo de Glauert e que se encontram armazenados em arquivo.
- B. Cálculo do ângulo total,  $\phi'$  pela equação (6-29).
- C. Faz-se  $y$  variar de 0 até 1, com um certo incremento, calculando-se o valor de  $R$  para cada  $y$  e se houver mudança de sinal de  $R$ , existe uma raiz neste intervalo, caso contrário, não

existe raiz com significado físico real.

- D. Em havendo raiz, aplica-se o método de Newton-Raphson, neste intervalo.
- E. Repete-se este procedimento para valores de razão de velocidade de local variando de 0.2 até 10.0 com um incremento de 0.2.

### Diagrama de Blocos

O diagrama de blocos e a listagem do programa em linguagem FORTRAN, para o método da solução proposto, encontram-se no APÊNDICE [C].

### Resultados

Para cada valor de razão de velocidades local ( $x$ ), com o respectivo valor do produto solidez pelo coeficiente de sustentação ( $\sigma C_L$ ) e com o valor calculado do ângulo total ( $\phi'$ ), determina-se a raiz para a equação dada.

A equação apresenta apenas um único valor de  $y$  (uma raiz) com significado físico real.

A tabela a seguir apresenta para cada valor de  $x$ , variando de 0.2 a 10, de  $\sigma C_L$  e de  $\phi'$  o valor da raiz encontrado.

x	SIGCL	FILGRAUS	YSIDNEY
.2000	1.56274199	78.69006	.4510676
.4000	1.19465685	68.19859	.4165645
.6000	.90718305	59.03624	.3929923
.8000	.69272947	51.34019	.3770388
1.0000	.53589833	45.00000	.3661581
1.2000	.42141736	39.80556	.3586032
1.4000	.33711916	35.53767	.3532373
1.6000	.27417219	32.00539	.3493356
1.8000	.22640809	29.05461	.3464336
2.0000	.18956712	26.56505	.3442290
2.2000	.16069987	24.44396	.3425220
2.4000	.13774434	22.61987	.3411772
2.6000	.11923982	21.03751	.3401009
2.8000	.10413647	19.65382	.3392276
3.0000	.09166852	18.43495	.3385100
3.2000	.08126929	17.35403	.3379142
3.4000	.07251355	16.38954	.3374144
3.6000	.06507805	15.52411	.3369909
3.8000	.05871401	14.74356	.3366296
4.0000	.05322779	14.03624	.3362184
4.2000	.04846703	13.39250	.3360491
4.4000	.04431065	12.80427	.3358142
4.6000	.04066157	12.26477	.3356087
4.8000	.03744124	11.76829	.3354276
5.0000	.03458561	11.30993	.3352665
5.2000	.03204206	10.88553	.3351237
5.4000	.02976707	10.49148	.3349959
5.6000	.02772438	10.12467	.3348816
5.8000	.02588360	9.78241	.3347780
6.0000	.02421915	9.46232	.3346848
6.2000	.02270933	9.16235	.3346002
6.4000	.02133567	8.88066	.3345231
6.6000	.02008234	8.61565	.3344531
6.8000	.01893578	8.36589	.3343888
7.0000	.01788424	8.13010	.3343302
7.2000	.01691754	7.90716	.3342757
7.4000	.01602684	7.69605	.3342262
7.6000	.01520441	7.49586	.3341804
7.8000	.01444347	7.30576	.3341378
8.0000	.01373805	7.12502	.3340986
8.2000	.01308291	6.95296	.3340619
8.4000	.01247340	6.78898	.3340278
8.6000	.01190538	6.63251	.3339962
8.8000	.01137518	6.48307	.3339667
9.0000	.01087953	6.34019	.3339389
9.2000	.01041549	6.20345	.3339130
9.4000	.00998046	6.07246	.3338888
9.6000	.00957205	5.94686	.3338663
9.8000	.00918815	5.82634	.3338445
10.0000	.00882683	5.71059	.3338245

Tabela 9. Variação de  $y$  (velocidade induzida dividida pela velocidade livre) em função da Razão de velocidade de local.

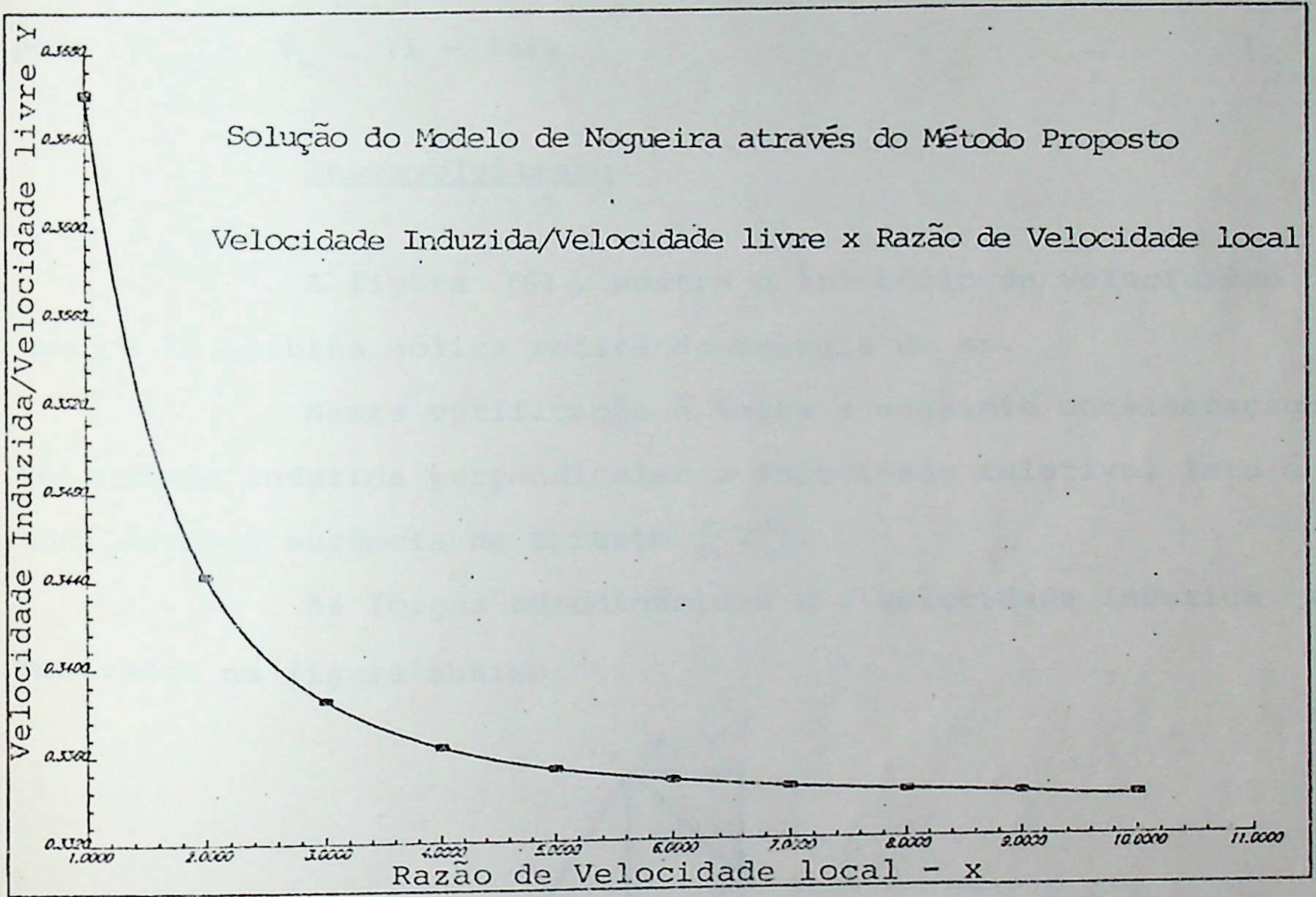


Gráfico 13. Variação da relação y em função da razão de velocidades local através do Método de Solução Proposto.



$$dQ = r \cdot (dL \cdot \sin \phi - dD \cdot \cos \phi) \quad (6-4)$$

Pela teoria do Elemento de Pá, temos:

$$dL = B \cdot \frac{1}{2} \cdot V_R^2 \cdot \rho \cdot C_L \cdot c \cdot dr \quad (6-30)$$

$$dD = B \cdot \frac{1}{2} \cdot V_R^2 \cdot \rho \cdot C_D \cdot c \cdot dr \quad (6-31)$$

Substituindo (6-30) e (6-31) em (6-3) e (6-4), respectivamente:

$$dT = B \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_R^2 \cdot c \cdot (C_L \cdot \cos \phi + C_D \cdot \sin \phi) dr \quad (6-32)$$

$$dQ = B \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_R^2 \cdot c \cdot r \cdot (C_L \cdot \sin \phi - C_D \cdot \cos \phi) dr \quad (6-33)$$

Pela Teoria do Momentum, velocidade através da hélice, será:

$$V_h = (1 - a) \cdot V^\infty$$

$$V_h = V^\infty - a \cdot V^\infty \quad (6-11)$$

O fluxo de ar através da seção considerada será:

$$dm = \rho \cdot V_h \cdot dA$$

Com auxílio da relação  $a \cdot V^\infty = V_i \cdot \cos \phi$ , referência [18] vem que o fluxo através da seção será:

$$d\dot{m} = \rho \cdot 2\pi \cdot r \cdot (V_{\infty} - V_i \cos \phi) dr \quad (6-34)$$

Pela Teoria do Momentum e da Pá, e considerando que para efeito de comparar o torque nas duas teorias, o arrasto não deve ser considerado, ou seja, Coeficiente de Arrasto,  $C_D$ , igual a zero, vem:

$$Q = 2 \cdot \dot{m} \cdot a' \cdot \Omega \cdot r^2$$

$$dQ = 2 \cdot \rho \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot a' \cdot \Omega \cdot r^2 \cdot (V_{\infty} - V_i \cos \phi) dr$$

$$dQ = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \rho \cdot (V_{\infty} - V_i \cos \phi) \cdot a' \cdot \Omega \cdot r dr \quad (6-35)$$

Através da relação, referência [18], vem:

$$a' \cdot r \cdot \Omega = V_i \cdot \sin \phi$$

substituindo em (6-35) vem:

$$dQ = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \rho \cdot (V_{\infty} - V_i \cos \phi) \cdot V_i \cdot \sin \phi dr \quad (6-36)$$

Igualando as expressões (6-36) e (6-33) e cancelando os termos em comum, vem:

$$V_i \cdot V_{\infty} - V_i^2 \cos \phi = \frac{B \cdot c \cdot C_L \cdot V_R^2}{8 \pi r}$$

$$\therefore \cos \phi \cdot V_i^2 - V_{\infty} \cdot V_i + \frac{B \cdot c \cdot C_L \cdot V_R^2}{8 \pi r} = 0 \quad (6-37)$$

Utilizando a definição de solidez,  $\sigma$ , e substituindo em (6-37) vem:

$$\frac{V_R^2 \cdot \sigma C_L}{4} + V_i^2 \cdot \cos \phi - V_\infty \cdot V_i = 0 \quad (6-38)$$

Dividindo a expressão pela velocidade,  $V_R^2$ , vem:

$$\frac{\sigma C_L}{4} + \frac{V_i^2}{V_R^2} \cdot \cos \phi - \frac{V_\infty}{V_R} \cdot \frac{V_i}{V_R} = 0 \quad (6-39)$$

Chamando de "y" a relação velocidade induzida pela velocidade livre, ou seja:

$$y = \frac{V_i}{V_\infty}$$

e substituindo em (6-39) vem:

$$\frac{\sigma C_L}{4} + \frac{V_i^2}{V_R^2} \cdot \cos \phi - \frac{V_i^2}{V_R^2} \cdot \frac{1}{y} = 0 \quad (6-40)$$

Colocando o termo  $\frac{V_i^2}{V_R^2}$  em evidência:

$$\left(\frac{V_R}{V_i}\right)^2 \cdot \frac{\sigma C_L}{4} + \cos \phi - \frac{1}{y} = 0 \quad (6-41)$$

Multiplicando por y, vem:

$$\left(\frac{V_R}{V_i}\right)^2 \cdot \frac{\sigma C_L}{4} \cdot y + y \cdot \cos \phi - 1 = 0 \quad (6-42)$$

Da figura (6) e com auxílio da trigonometria vem:

$$\text{sen } \phi = \frac{V_{\infty}}{V_R} \cdot (1-a)$$

$$\therefore \frac{V_{\infty}}{V_R} = \frac{\text{sen } \phi}{1-a} \quad (6-43)$$

Da relação  $y = \frac{V_i}{V_{\infty}}$ , vem que:

$$V_{\infty} = \frac{V_i}{y} \quad (6-44)$$

Substituindo (6-44) em (6-43), vem:

$$\frac{V_i}{V_R \cdot y} = \frac{\text{sen } \phi}{1-a} \quad (6-45)$$

ou seja:

$$\frac{V_i}{V_R} = \frac{y \cdot \text{sen } \phi}{1-a} \quad (6-46)$$

Substituindo a relação (6-46) na equação (6-42) vem:

$$\frac{(1-a)^2}{y^2 \cdot \text{sen}^2 \phi} \cdot \frac{\sigma C_L}{4} \cdot y + y \cdot \cos \phi - 1 = \phi \quad (6-47)$$

Multiplicando o numerador, pela expressão  $4 \cdot \text{sen}^2 \phi \cdot y$

$$4 \cdot \cos \varnothing \cdot \text{sen}^2 \varnothing \cdot y^2 - 4 \cdot \text{sen}^2 \varnothing \cdot y + \\ + (1 - a)^2 \cdot \sigma C_L = 0 \quad (6-49)$$

Da referência [5], vem:  $\sigma C_L = 4 \cdot (1 - \cos \varnothing)$  que substituída em (6-49) vem:

$$4 \cdot \cos \varnothing \cdot \text{sen}^2 \varnothing \cdot y^2 - 4 \cdot \text{sen}^2 \varnothing \cdot y + \\ + (1 - a)^2 \cdot 4 \cdot (1 - \cos \varnothing) = 0 \\ \cos \varnothing \cdot (1 - \cos \varnothing) \cdot (1 + \cos \varnothing) \cdot y^2 - (1 - \cos \varnothing) \cdot \\ \cdot (1 + \cos \varnothing) \cdot y + (1 - a)^2 \cdot (1 - \cos \varnothing) = 0 \\ \cos \varnothing \cdot (1 + \cos \varnothing) \cdot y^2 - (1 + \cos \varnothing) \cdot y + (1 - a)^2 = 0 \quad (6-50)$$

Por outro lado, utilizando-se da relação:

$a \cdot V_\infty = V_i \cdot \cos \varnothing$ , vem:

$$\cos \varnothing = a \cdot \frac{V_\infty}{V_i} \quad (6-51) \quad \text{e} \quad y = \frac{a}{\cos \varnothing} \quad (6-52)$$

Substituindo (6-52) em (6-50) tem-se:

$$\cos \varnothing \cdot (1 + \cos \varnothing) \cdot \frac{a^2}{\cos^2 \varnothing} - (1 + \cos \varnothing) \cdot \frac{a}{\cos \varnothing} + \\ + (1 - a)^2 = 0 \\ (1 + \cos \varnothing) \cdot a^2 - (1 + \cos \varnothing) \cdot a + (1 - a)^2 \cdot \cos \varnothing = 0 \quad (6-53)$$

Supõem-se que  $y$  seja dado por:  $y = 1 - 2 \cdot a$ , logo,  
 $(1 - a)^2 = y + a^2$  e substituindo em (6-53) tem-se:

$$(1 + \cos \phi) \cdot a^2 - (1 + \cos \phi) \cdot a + (y + a^2) \cdot \cos \phi = 0 \quad (6-54)$$

e substituindo (6-52) em (6-54), vem:

$$(1 + \cos \phi) \cdot a^2 - (1 + \cos \phi) \cdot a + \left(\frac{a}{\cos \phi} + a^2\right) \cdot \cos \phi = 0$$

$$a^2 + a^2 \cdot \cos \phi - a - a \cdot \cos \phi + a + a^2 \cdot \cos \phi = 0$$

$$a^2 + 2a^2 \cdot \cos \phi - a \cdot \cos \phi = 0$$

$$a + 2a \cdot \cos \phi - \cos \phi = 0$$

$$a \cdot (1 + 2 \cdot \cos \phi) = \cos \phi$$

$$\therefore a = \frac{\cos \phi}{1 + 2 \cdot \cos \phi} \quad (6-55)$$

Substituindo (6-51) em (6-55), vem:

$$a = \frac{a \cdot V_{\infty} / V_i}{1 + 2 a \cdot V_{\infty} / V_i}$$

$$\therefore a = \frac{a \cdot V_{\infty}}{V_i + 2 a \cdot V_{\infty}}$$

$$\therefore V_i = V_{\infty} \cdot (1 - 2a) \quad (6-56)$$

ou seja, velocidade induzida é dada pela expressão (6-56), que é

a expressão que se propôs a demonstrar.

Dividindo ambos os lados por  $V_\infty$  e sabendo-se que  $y = \frac{V_i}{V_\infty}$ , vem da equação (6-56) que:

$$y = 1 - 2a,$$

logo, a suposição feita anteriormente, está correta.

Pode-se com auxílio da referência [5], dar o fator de indução axial em termos do produto solidez pelo coeficiente de sustentação.

$$a = \frac{4 - \sigma C_L}{2 \cdot (6 - \sigma C_L)} \quad (6-57)$$

ou

$$y = \frac{2}{6 - \sigma C_L} \quad (6-58)$$

### VI.3. Comparação entre relação $y$ , e outros métodos

Neste ítem, faz-se diversas comparações entre os resultados do Método de Solução Proposto para o Modelo de Nogueira e os resultados obtidos quando se aplica a relação  $y = 1 - 2a$  para os Métodos de: Glauert, Shepherd, Griffiths, Adimensional Iterativo e relação  $y$  verificado neste trabalho.

#### a) Relação $y$ , do Método de Solução do Modelo de Nogueira

A relação  $y$ , pode ser obtida diretamente, através do Método de Solução Proposto neste trabalho, para a equação:

$$2 \cdot \cos \phi' \cdot \sin^4 \phi \cdot y^4 - 4 \cdot \sin^4 \phi' \cdot y^3 - (4 \cdot \cos \phi' - \sigma C_L)$$

$$\sin^2 \phi' \cdot y^2 + 4 \cdot \sin^2 \phi \cdot y - \sigma C_L = 0$$

b) Relação  $y$ , do método verificado neste trabalho.

É dada pela expressão (6-58)

$$Y_{PR} = \frac{2}{6 - \sigma C_L}$$

c) Relação  $y$ , do Método Adimensional Iterativo

Considera-se nas equações do Método Adimensional Iterativo, (Modelo de Wilson et al modificado), coeficiente de arrasto como sendo nulo, e obtém-se relação  $y$ .

O fator de indução axial, é dado por:

$$a^+ = \frac{X^+}{1 + X^+} \quad \text{onde } X^+ = \frac{\sigma C_L}{4 \cdot \sin \phi \cdot \text{tg } \phi}$$

Considerando que  $\sigma C_L = 4 \cdot (1 - \cos \phi)$ , referência [5], que substituído em  $X^+$ , tem-se:

$$X^+ = \frac{1 - \cos \phi}{\sin \phi \cdot \text{tg } \phi}$$

que substituído em  $a^+$ , vem:

$$a^+ = \frac{1 - \cos \phi}{\sin \phi \cdot \text{tg } \phi + (1 - \cos \phi)}$$

cujo desenvolvimento fornece:

$$a^+ = \frac{\cos \phi}{1 + 2 \cdot \cos \phi}$$

Utilizando-se de que  $y = 1 - 2a^+$ , e da referência [5], tem-se que:  $Y_{ADMS} = \frac{2}{(6 - \sigma C_L)}$

d) Relação  $y$ , da solução do Modelo de Glauert

A relação  $y$ , é obtida diretamente da solução do Modelo de Glauert, para isto basta fazer:

$$Y_{GL} = 1 - 2a$$

onde  $a$  - fator de indução axial do Modelo de Glauert

e) Relação  $y$ , do Método de Shepherd

Para a obtenção da relação  $y$ , faz-se:

$$Y_{SH} = 1 - 2a$$

Os valores do fator de indução axial,  $a$ , são obtidos diretamente da referência [5].

f) Relação  $y$ , do modelo de Griffiths

É obtida da solução do método proposto por Griffiths [3], cujos valores do fator de indução axial,  $a$ , são obtidos da mesma referência e para se encontrar a relação  $y$ , faz-se:

$$Y_{GR} = 1 - 2a$$

x	YGLAUERT	YSHEPERD	YADMENS.	YSIDNEY	YPROPOSTO
.2000	.45072877	.45072	.4507288	.4510630	.4507288
.4000	.41620339	.41620	.4162033	.4165650	.4162033
.6000	.39270997	.39270	.3927100	.3929920	.3927100
.8000	.37694155	.37684	.3769415	.3770390	.3769415
1.0000	.36602545	.36602	.3660254	.3661580	.3660254
1.2000	.35851395	.35852	.3585140	.3586030	.3585140
1.4000	.35317707	.35318	.3531771	.3532370	.3531771
1.6000	.34929442	.34930	.3492944	.3493360	.3492944
1.8000	.34640479	.34640	.3464048	.3464340	.3464048
2.0000	.34420848	.34420	.3442085	.3442290	.3442085
2.2000	.34250677	.34250	.3425068	.3425220	.3425068
2.4000	.34116586	.34116	.3411656	.3411770	.3411656
2.6000	.34009208	.34010	.3400921	.3401010	.3400921
2.8000	.33922088	.33922	.3392209	.3392280	.3392209
3.0000	.33850503	.33850	.3385050	.3385100	.3385050
3.2000	.33791029	.33790	.3379103	.3379140	.3379103
3.4000	.33741117	.33742	.3374112	.3374140	.3374112
3.6000	.33699845	.33698	.3369984	.3369910	.3369984
3.8000	.33662748	.33662	.3366274	.3366300	.3366274
4.0000	.33631694	.33632	.3363169	.3363180	.3363169
4.2000	.33604789	.33604	.3360478	.3360490	.3360478
4.4000	.33581340	.33582	.3358133	.3358140	.3358133
4.6000	.33560777	.33560	.3356077	.3356090	.3356077
4.8000	.33542645	.33542	.3354264	.3354280	.3354264
5.0000	.33526587	.33526	.3352659	.3352670	.3352659
5.2000	.33512306	.33512	.3351230	.3351240	.3351230
5.4000	.33499527	.33500	.3349953	.3349960	.3349953
5.6000	.33488071	.33488	.3348807	.3348820	.3348807
5.8000	.33477759	.33478	.3347775	.3347780	.3347775
6.0000	.33468425	.33468	.3346843	.3346850	.3346843
6.2000	.33459973	.33460	.3345997	.3346000	.3345997
6.4000	.33452284	.33452	.3345229	.3345230	.3345229
6.6000	.33445275	.33446	.3344527	.3344530	.3344527
6.8000	.33438861	.33438	.3343887	.3343890	.3343887
7.0000	.33432984	.33432	.3343299	.3343300	.3343299
7.2000	.33427584	.33428	.3342758	.3342760	.3342758
7.4000	.33422613	.33422	.3342261	.3342260	.3342261
7.6000	.33418012	.33418	.3341802	.3341800	.3341802
7.8000	.33413768	.33414	.3341377	.3341380	.3341377
8.0000	.33409834	.33410	.3340983	.3340990	.3340983
8.2000	.33406174	.33406	.3340617	.3340620	.3340617
8.4000	.33402777	.33402	.3340277	.3340280	.3340277
8.6000	.33399606	.33400	.3339961	.3339960	.3339961
8.8000	.33396649	.33396	.3339665	.3339670	.3339665
9.0000	.33393884	.33394	.3339388	.3339390	.3339388
9.2000	.33391297	.33392	.3339130	.3339130	.3339130
9.4000	.33388877	.33388	.3338887	.3338890	.3338887
9.6000	.33386600	.33386	.3338659	.3338660	.3338659
9.8000	.33384454	.33384	.3338445	.3338450	.3338445
10.0000	.33382440	.33382	.3338245	.3338250	.3338245

Tabela 10. Relação  $y$  em função da razão de velocidades

A tabela [10], mostra a relação velocidade induzida/velocidade livre,  $y$ , obtida dos diversos métodos citados anteriormente, em função da razão de velocidades local.

Através da tabela [10], observa-se que os valores da relação  $y$ , obtida no desenvolvimento do Método Adimensional Iterativo,  $\bar{R} = \infty$ , é o mesmo que os valores da relação  $y$ , obtido na verificação da velocidade induzida ser dada por:  $V_i = V_\infty \cdot (1 - 2a)$ , equação (6-58).

Ainda da tabela [10], nota-se que a relação  $y$ , obtida no Método de Solução para o Método de Nogueira, é aproximadamente a mesma que as encontradas nos Métodos de Glauert, Shepherd e nos Métodos Propostos.

O gráfico [14] mostra a relação  $y$  obtida dos Métodos de Glauert, Shepherd, Adimensional Iterativo, Proposto e de Nogueira, em função da razão de velocidades local,  $x$ .

Neste gráfico, observa-se que todos os valores da relação  $y$ , dos métodos em comparação, sobrepõem-se um ao outro, tendo em consequência uma só curva, mostrando assim, que o Método de solução para o Método de Nogueira, apresentam ótimos resultados.

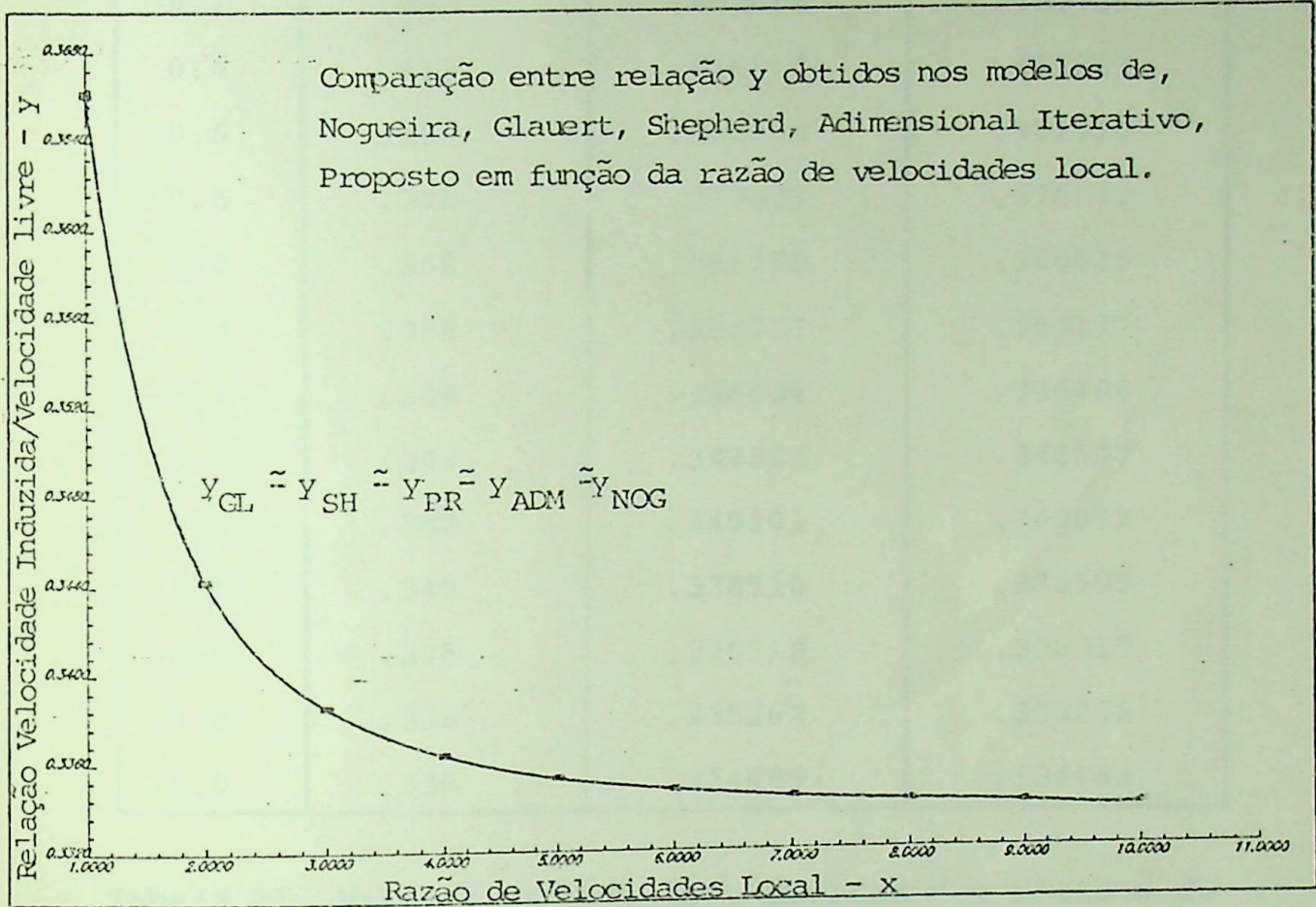


Gráfico 14. Relação  $y$  de diversos modelos em função da razão de velocidades local.

x	yGRIFFITHS	ySIDNEY	yPROPOSTO
0.2	.452	.451068	.450729
0.4	.418	.416565	.416203
0.6	.394	.392992	.392710
0.8	.378	.377039	.376842
1.0	.368	.366158	.366025
1.4	.352	.353237	.353177
1.8	.348	.346434	.346404
2.2	.344	.342522	.342507
2.6	.342	.340101	.340092
3.0	.340	.338510	.338505
4.0	.338	.336318	.336317
5.0	.336	.335267	.335266
6.0	.336	.334685	.334684

Tabela 11. Valores da relação  $y$  obtidos dos Métodos de Griffiths, Nogueira e Proposto para diversos valores de razão de velocidade local.

Analisando a tabela [ 11 ], verifica-se que os resultados obtidos no Método de Solução do Método de Nogueira, aproximam-se muito do resultado do Método de Griffiths, para razão de velocidades local menores que 1.8, e a medida que a razão de velocidades local aumenta, os valores do Método de Solução do Método de Nogueira e do Método Proposto se afastam um pouco, do Método de Griffiths. Tal verificação pode ser visto no gráfico 15.

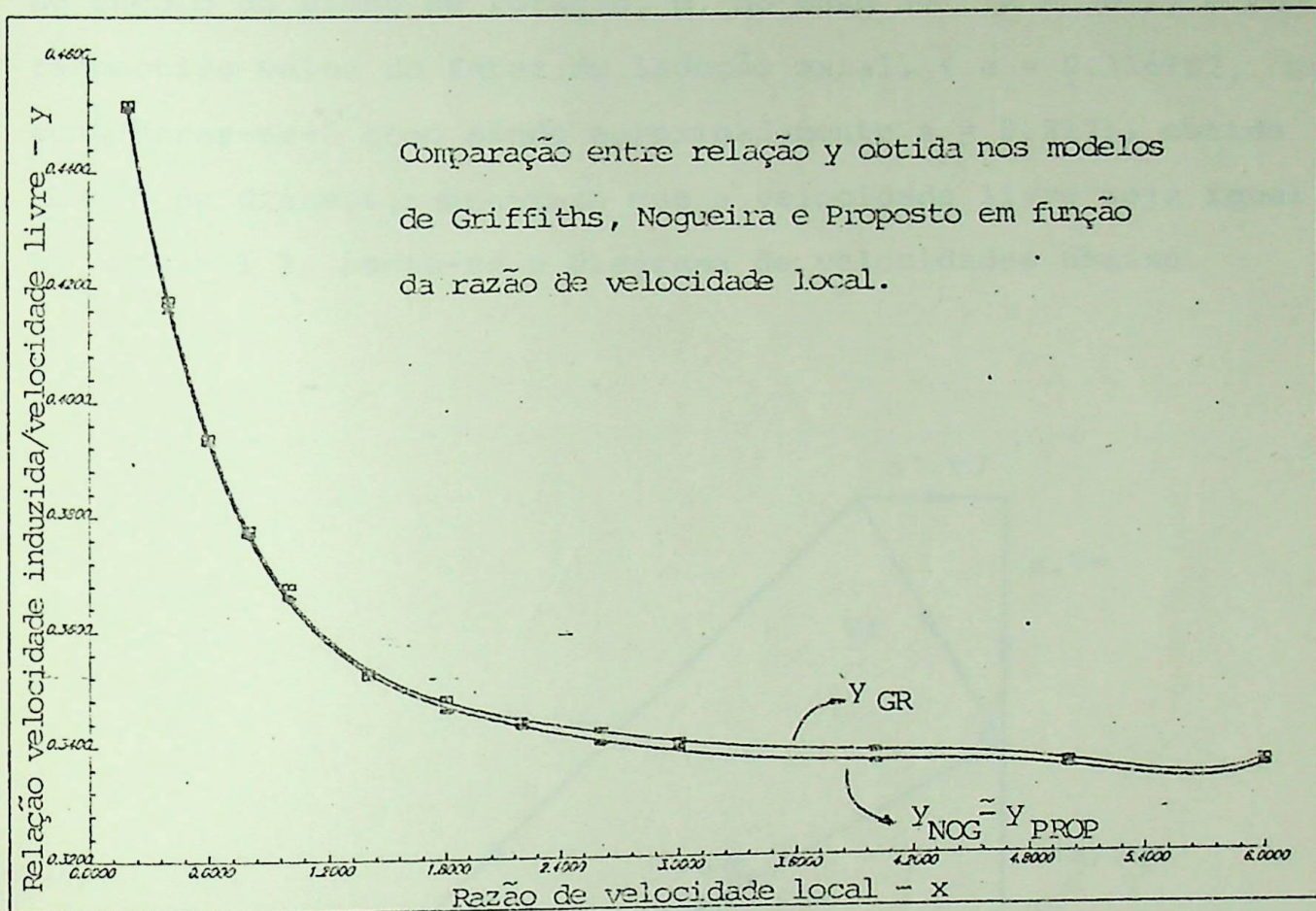


Gráfico 15. Relação  $y$  dos Modelos de Griffiths, Nogueira e Proposto, em função da razão de velocidades local

Até agora foram feitas várias comparações em termos de resultados obtidos dos métodos citados. Em seguida far-se-á uma comparação através da geometria, isto é, para um determinado ângulo do plano de rotação,  $\phi$ , no caso  $30^\circ$  ( $\phi = 30^\circ$ ), e com o respectivo valor do fator de indução axial, ( $a = 0.316987$ , que considerar-se-á como sendo aproximadamente  $a = 0.317$ ), obtido do Modelo de Glauert, e supondo-se que a velocidade livre seja igual a um ( $V^\infty = 1$ ), monta-se o diagrama de velocidades abaixo.

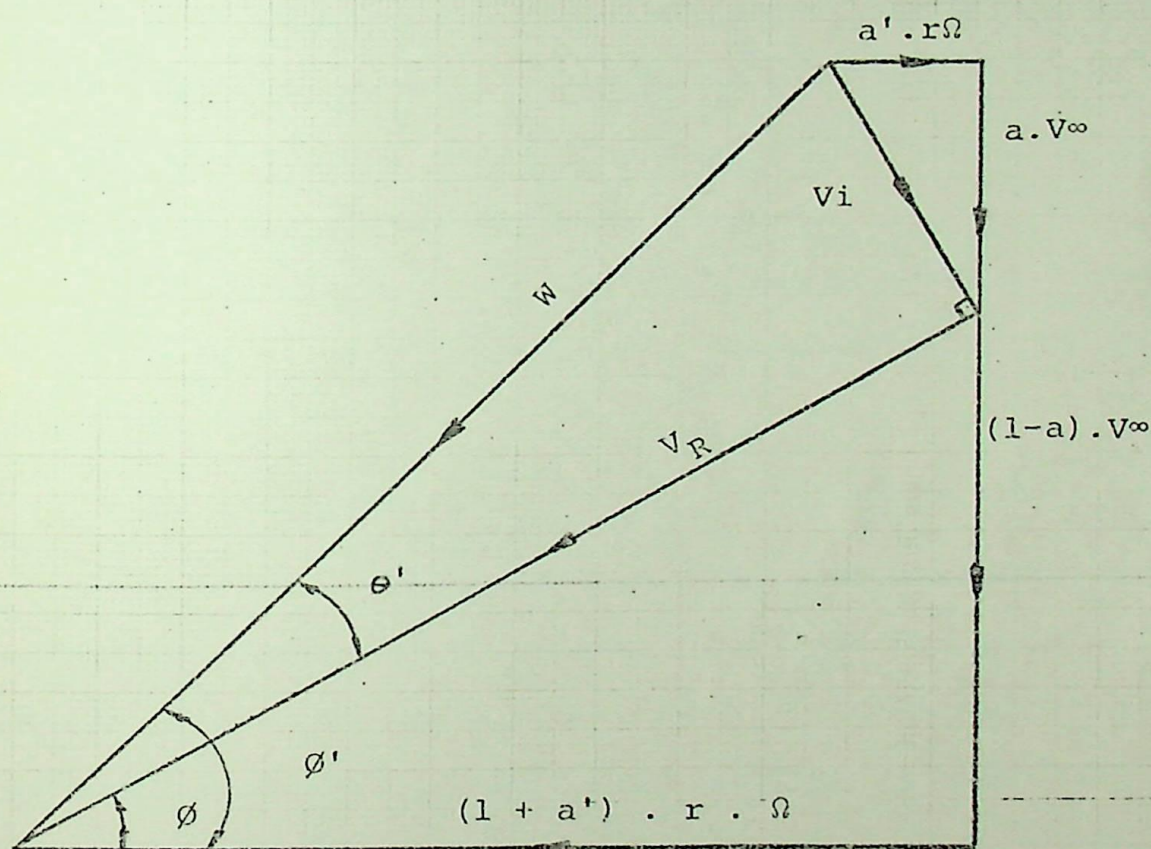


Figura 7. Diagrama de Velocidades Reais

A velocidade induzida sendo dada por  $V_i = V^\infty \cdot (1 - 2a)$ , e substituindo os valores supostos acima, vem a velocidade induzida calculada é dada por  $V_i = 0.366$ . E a velocidade induzida obtida da solução do Método de Nogueira é aproximadamente  $V_i = 0.366$ .

A velocidade induzida, que obtém-se medindo diretamente no diagrama de velocidades, é aproximadamente igual  $V_i = 0.365$ , cujo resultado é aproximadamente igual aos obtidos anteriormente.

Com isto, comprova-se que a velocidade induzida é realmente dada pela expressão:  $V_i = V_{\infty} \cdot (1-2a)$ , como ficou comprovada nos vários itens deste trabalho.

## CAPÍTULO VII. COMENTÁRIOS, CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O método de Wilson et al., para projeto aerodinâmico das pás de turbina eólica de eixo horizontal, é um método iterativo, visto que para se descobrir quais os parâmetros ótimos que levem o coeficiente de potência a uma melhor condição, precisa-se de muitas tentativas e muitas iterações; é um método dimensional que precisa de dados como parâmetros geométricos da pá e características aerodinâmicas do perfil da pá.

Em virtude deste método ser dimensional e iterativo, foram propostos os métodos adimensionais iterativo e não iterativo, que consistem em fazer modificações no método de Wilson et al. As modificações feitas foram as seguintes:

1. a relação coeficiente de sustentação dividido pelo coeficiente de arrasto passou a ser uma constante, que assume diversos valores.

2. a relação  $\frac{B c C_L}{8 \pi r}$  foi substituída para  $\frac{\sigma C_L}{4}$ , onde o produto solidez pelo coeficiente de sustentação  $\sigma C_L$ , são valores obtidos do modelo de Glauert (valores ótimos), com isso não precisa-se mais de dados como: corda, raio da secção de pá, do coeficiente de sustentação e coeficiente de arrasto.

O método adimensional iterativo, embora sendo iterativo como o método de Wilson et al., sua grande vantagem sobre este método é que quando se obtém os valores dos parâmetros, estes já são valores ótimos, o que não acontece com o método de Wilson et al.

No método adimensional não iterativo, as iterações do método de Wilson et al. são substituídas pela equação (5-14), o que elimina todo processo iterativo. Sua grande vantagem sobre os outros métodos, além de ser adimensional é que não sendo iterativo, elimina-se problemas como de se precisar de um computa -

dor com uma capacidade maior de memória, com uma simples calculadora, pode-se fazer os cálculos, obtendo valores ótimos; elimina-se problemas de erros que surgem em métodos iterativos (erros numéricos); enfim através deste método obtém-se grandes facilidades e sugere-se a sua aplicação em projeto aerodinâmico de pás de turbinas eólicas de eixo horizontal.

Através das comparações efetuadas com os outros métodos referenciados, os métodos adimensionais iterativo e não iterativo mostraram-se que seus resultados foram ótimos, como se pode observar através dos gráficos (7), (8), (9), (10), (11) e (12).

No outro assunto abordado, mostrou-se um cálculo de velocidade induzida em turbina eólica de eixo horizontal. Foi desenvolvido um método de solução para o modelo de Nogueira [7], já que em seu trabalho não constava de nenhuma proposta para a solução de seu modelo. Na proposta desenvolvida neste trabalho encontrou-se uma única solução com significado físico real ( $1/3 < y < 1/2$ ), onde  $y$  é a relação velocidade induzida/velocidade livre.

Para verificar se esta solução estava correta, foi desenvolvida uma nova expressão para o cálculo da velocidade induzida, expressão esta dada por  $V_i = V_\infty \cdot (1-2a)$ .

Atribuindo-se valores para o fator de indução, a , de vários métodos, pode-se comparar estes resultados obtidos com o método proposto para a solução do modelo de Nogueira; e através destas comparações chegou-se a conclusão que o método proposto estava correto, e que a velocidade induzida é dada pela expressão  $V_i = V_\infty \cdot (1-2a)$ .

Esta expressão é mais simples de se resolver que o modelo de Nogueira, que consta de se resolver uma equação do 4º grau que é função do produto solidez pelo coeficiente de sustentação e ângulo total, enquanto que a verificada neste trabalho é função apenas do fator de indução axial ou do produto solidez pelo

coeficiente de sustentação.

O cálculo da velocidade induzida vai nos permitir ter uma previsão da potência extraída, cujo desenvolvimento deixo como sugestão para futuros trabalhos.

Outras sugestões dadas pela Banca Examinadora:

- Melhoramento da programação no método adimensional iterativo para  $F \neq 1$  (escoamento tridimensional), para isto, desenvolver a equação:

$$\phi_{\text{início}} = \text{tg}^{-1} \left[ \frac{1}{x} \right], \text{ onde } x = \frac{r}{R} \cdot \lambda$$

em série de Taylor.

- Para o método adimensional não iterativo, a metodologia é válida também para bombeamento de água. Tendo-se corda constante ou variável, pode-se otimizar número de pás, para um determinado  $\lambda$  e  $C_p$ .

- Simulação em laboratórios (Campo de funcionamento) uma vez sabendo-se a distribuição de cordas e os ângulos construtivos da pá, aplicar o método de Wilson et al.

- Corrigir a velocidade induzida, para isto usar a equação

$$V_i = V_\infty (1 - 2aF),$$

- Estudar o comportamento do método adimensional não iterativo para  $F \neq 1$  e  $\bar{R}$  menores que 30, pois estes atingem um coeficiente de potência máximo para razão de velocidades menores que 5 e não razão de velocidades entre 7 e 10.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [ 1 ] GLAUERT, H. - "Windmills and Fans", Aerodynamic Theorys. Vol. 4, Dover Publication, 1963.
- [ 2 ] WILSON, R.E. and LISSAMAN, P.B.S. - "Applied Aerodynamics of Wind Power Machines". Oregon State University, 1974.
- [ 3 ] GRIFFITHS, R.T. - "The Effect Aerofoil characteristics on Windmill Performance" . Aeronautical Journal July, 1977.
- [ 4 ] JONES, C.N. - "The Blade Element Performance in Horizontal-Axis Wind Turbine Rotors". Wind Engineering. Vol. 7, 1983.
- [ 5 ] SHEPHERD, D.G. - " Note on a Simplified Approach to" Wind Engineering, Vol. 8 - 1984.
- [ 6 ] IWASAKI, M. - "The Experimental and Theoretical Investigation of Windmills". Vol. 2, Dec - 1953.
- [ 7 ] NOGUEIRA, S.L. - "Um Método de Cálculo de Velocidade Induzida em Catavento com Aplicação a Otimização do Projeto Aerodinâmico". In: Congresso Brasileiro de Energia, 1º, Rio de Janeiro , 1978. Anais. V.B., Paper nº B-4.
- [ 8 ] LINDLEY, D. & STEVENSON, W. - "Orkneys Horizontal Axis Wind Turbine Project". Modern Power Systems, Dec., 1981.
- [ 9 ] MCGRAW, M.G. - "Single-Unit Turbines Interface with Utility Systems". Electrical World, May - 1981.

- [10] MCGRAW, M.G. - "Turbine Prototype Milestone: a Three Unit Energy Farm". Electrical World, May - 1981.
- [11] MCGRAW, M.G. - "Wind Turbine, Utilities Scrutinize WTGs and Examine their Implications". Electrical World, May - 1981.
- [12] MCGRAW, M.G. - "Wind Turbine: an Idea Whose Time has Come-Again". Electrical World, May - 1981.
- [13] GOLDING, E.W. - "The Generation of Electricity by Wind Power". London, E. & F.N. Spon, 1976.
- [14] KRANERT, GUILHERME - "Energia Eólica". Energia, nº 23, Vol. 4, 1982.
- [15] "A Turbina Eólica do CTA e suas Aplicações". Energia Elétrica, Julho - 1980.
- [16] BARCELLOS, R.R. - "Aproveitamento da Energia Eólica no Rio Grande do Sul com Emprego de Turbina de Eixo Vertical". Tese de Mestrado, 1981.
- [17] SEN, T.K. - Apostila de Formas Não Convencionais de Energia - EFEI - 1983.
- [18] LILLEY, G.M. - "The Aerodynamic Efficiency of Windmills". Aeronautical Quarterly, Feb. 1977.
- [19] VARELLA, S.; SOUZA, Z.; SEN, T.K.; e outros - Relatório final do Desenvolvimento de Turbina Eólica para Geração de Energia Elétrica - PROJETO DETEGEL, Convênio Petrobrás - EFEI - Fevereiro de 1984.
- [20] ABBOTT, I.H. and von DOENHOFF. - Theory of Wing Sections. London, McGraw-Hill, 1945.

## APÊNDICE [A]

## TEORIA DOS MODELOS DE EIXO HORIZONTAL

I. Teoria da Variação da Quantidade de MovimentoI.1. Introdução

Este modelo é o mais simples para a análise global do desempenho de um rotor eólico.

Com este modelo pode-se relacionar a potência absorvida, a eficiência do rotor, etc, com o diâmetro, mas não é possível levar em consideração a influência do número de pás, a forma da pá, enfim a influência dos detalhes geométricos.

Este modelo é conhecido, também, como a "Teoria do Disco Atuador".

I.2. Hipóteses

No moinho "as linhas de corrente de contorno" se alongam ao passar pela máquina, e a pressão " $P_a$ " é maior que a pressão " $P_b$ ", figura (1).

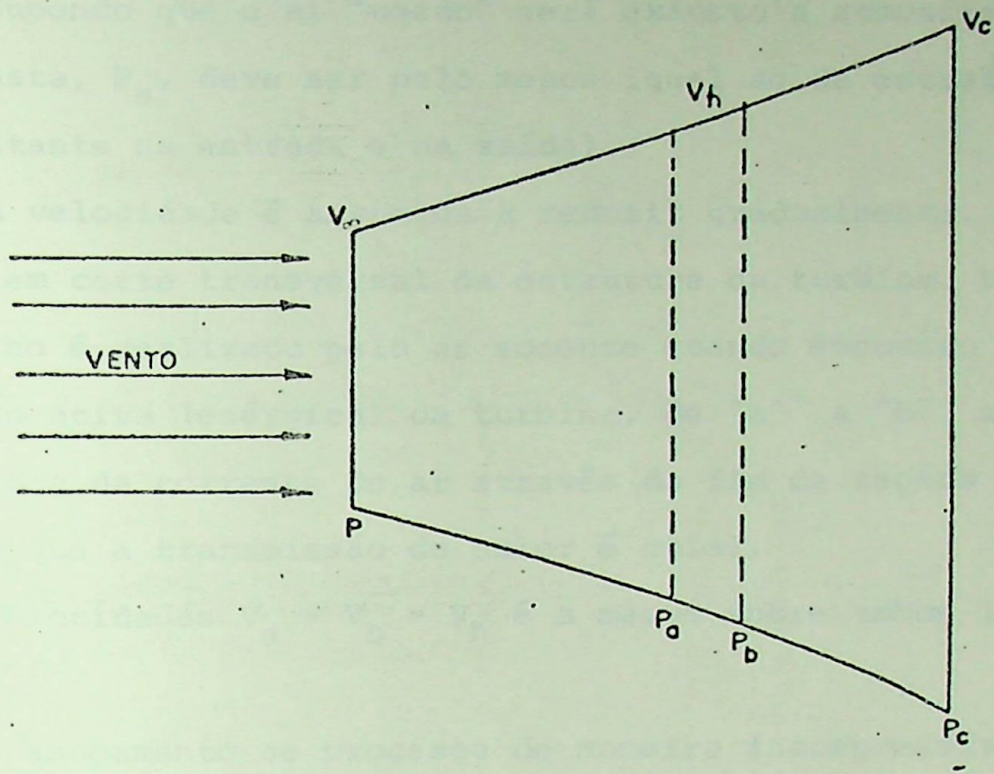


Figura 1. Turbina Eólica

Perfis de velocidades e de pressões são apresentados na figura [ 2 ]

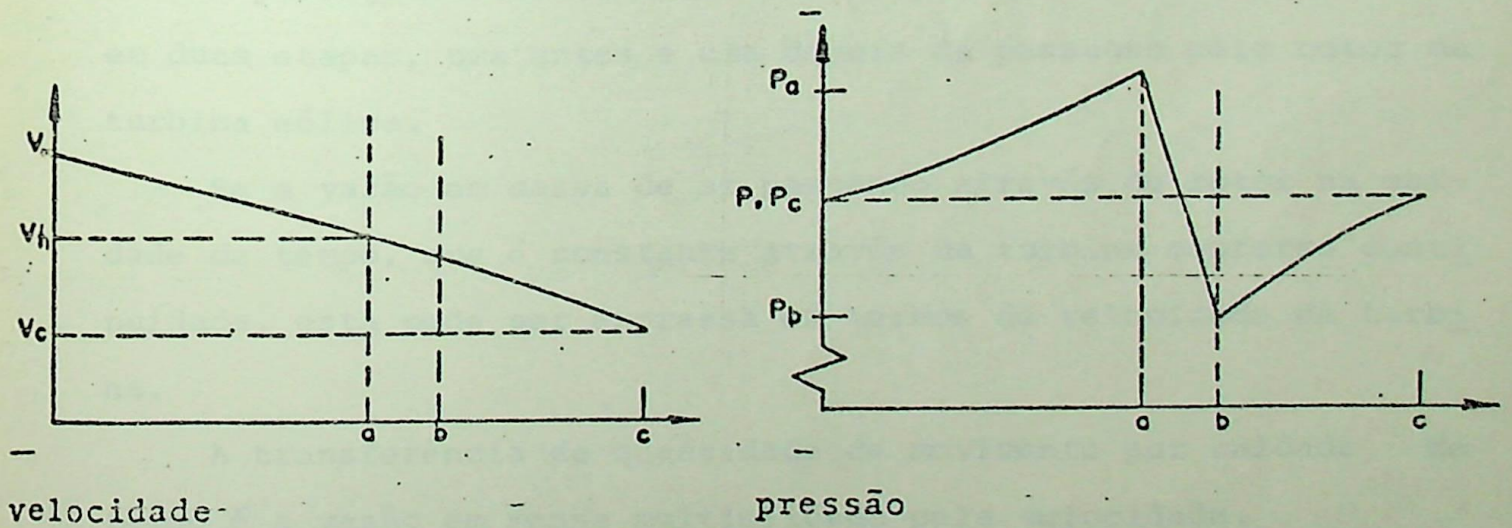


Figura 2. Perfis típicos de velocidades e pressões

Supondo que o ar "usado" será exausto a atmosfera, a pressão exausta,  $P_s$ , deve ser pelo menos igual ao da entrada  $P$  (Pressão constante na entrada e na saída).

A velocidade é assumida a reduzir gradualmente, devido ao aumento em corte transversal da estrutura da turbina. Desde que o trabalho é realizado pelo ar somente quando escoando através da porção ativa (enérgica) da turbina, de "a" a "b", a mudança em entalpia da corrente de ar através do fim de seções é zero (é assumida que a transmissão de calor é nula).

Velocidades  $V_a = V_b = V_h$  é a mesma sobre ambos lados da turbina.

O escoamento se processa de maneira incompressível (ar considerado como fluido incompressível).

Viscosidade do ar é considerado desprezível.

### .I.3. Teoria

A passagem do vento através de uma turbina eólica ocorre em duas etapas, uma antes e uma depois da passagem pelo rotor da turbina eólica.

Se a vazão em massa de ar passando através do rotor na unidade de tempo, que é constante através da turbina conforme continuidade, esta pode ser expressa em termos de velocidade da turbina.

A transferência da quantidade de movimento por unidade de tempo é a vazão em massa multiplicada pela velocidade.

A mudança nesta quantidade é a força axial sobre a turbina.

$$F_A = \dot{m} \cdot V_\infty - \dot{m} \cdot V_s = \dot{m} \cdot (V_\infty - V_s) \quad (1)$$

sendo  $\dot{m} = \rho \cdot A_t \cdot V_h \quad (2)$

Substituindo (2) em (1)

$$F_A = \rho \cdot A_t \cdot V_h \cdot (V_\infty \cdot V_s) \quad (3)$$

Por outro lado, aplicando a equação da energia (Bernoulli) entre seção de entrada e seção "a" da turbina, figura (1), tem-se:

$$P + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 = P_a + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_a^2 \quad (4)$$

A equação similar pode ser obtida para a seção de saída de "b" a "c"

$$P_c + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_c^2 = P_b + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_b^2 \quad (5)$$

Conforme considerações iniciais: Pressão na entrada e na saída iguais ( $P_a = P_c$ ) e assumindo que a velocidade é a mesma sobre os ambos lados da turbina ( $V_a = V_b = V_h$ ) pode-se obter por subtração:

Equação (4) - Equação (5)

$$P_a - P_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (V_\infty^2 - V_s^2) \quad (6)$$

A equação axial sobre a turbina é a diferença de pressão multiplicada pela área da turbina,  $A_t$  ou seja:

$$F_A = A_t \cdot (P_a - P_b) \quad (7)$$

Substituindo equação (6) na equação (7), vem:

$$F_A = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_t \cdot (V_\infty^2 - V_S^2) \quad (8)$$

Igualando as expressões (3) e (8), tem-se:

$$\rho \cdot A_t \cdot V_h \cdot (V_\infty - V_S) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_t \cdot (V_\infty^2 - V_S^2)$$

$$V_h = \frac{V_\infty + V_S}{2} \quad (9)$$

A velocidade da turbina,  $V_h$ , para as condições que tem sido considerados, é então a média das velocidades na entrada e na saída.

#### I.4. Potência Extraída da Turbina

Em máquinas sem atrito, a potência fornecida a turbina deve se exatamente igual à extraída do ar, que por sua vez é representada pelo decréscimo da energia cinética do escoamento entre as seções de entrada e saída.

Em outras palavras, a energia extraída pela turbina é igual a diferença em energias cinéticas de corrente de ar na entrada e saída.

A vazão em massa,  $\dot{m}$ , multiplicada por  $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2$  ou

$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_S^2$  dá a taxa de transferência de energia, isto é, a potência de saída da máquina.

$$P_O = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot V_\infty^2 - \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot V_S^2$$

$$P_O = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot (V_\infty^2 - V_S^2)$$

$$P_O = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot Q \cdot (V_\infty^2 - V_S^2)$$

$$P_o = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_t \cdot V_h \cdot (V_\infty^2 - V_s^2) \quad (10)$$

Substituindo a equação (9) na equação (10),

$$P_o = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A_t \cdot (V_\infty + V_s) \cdot (V_\infty^2 - V_s^2) \quad (11)$$

### I.5. Rendimento de uma Turbina

Costuma-se definir o rendimento de uma turbina eólica, a razão entre a potência extraída da turbina pela potência total disponível num tubo de corrente de seção reta,  $A_t$ , onde a velocidade do vento na entrada é  $V_\infty$ .

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot V_\infty^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_t \cdot V_\infty \cdot V_\infty^2$$

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_t \cdot V_\infty^3 \quad (12)$$

Logo, o rendimento será dada por:

$$\eta = \frac{P_o}{P_t}$$

$$\eta = \frac{1/4 \cdot \rho \cdot A_t \cdot (V_\infty + V_s) \cdot (V_\infty^2 - V_s^2)}{1/2 \cdot \rho \cdot A_t \cdot V_\infty^3}$$

$$\eta = \frac{V_\infty + V_s}{2} \cdot \frac{(V_\infty^2 - V_s^2)}{V_\infty^3}$$

$$\eta = \frac{V_h \cdot (V_\infty^2 - V_s^2)}{V_\infty^3} \quad (13)$$

## I.6. Potência Máxima de Saída e Rendimento Máximo

### I.6.1. Teoria de Betz

Para a área especificada de uma turbina,  $A_t$ , e a velocidade do vento na entrada,  $V_\infty$ , a potência de saída, depende da velocidade de saída,  $V_s$ . A potência máxima,  $P_{omax}$ , pode ser obtida derivando-se  $P_o$  em relação a  $V_s$  e igualando a zero o resultado.

Da equação (11), vem:

$$P_o = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A_t \cdot (V_\infty + V_s) \cdot (V_\infty^2 - V_s^2)$$

$$P_o = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A_t \cdot (V_\infty^3 - V_\infty \cdot V_s^2 + V_s \cdot V_\infty^2 - V_s^3)$$

$$\frac{d P_o}{d V_s} = -2 \cdot V_\infty \cdot V_s - V_\infty^2 - 3 \cdot V_s^2 = 0$$

$$3 \cdot V_s + 2 \cdot V_\infty \cdot V_s - V_\infty^2 = 0$$

$$V_s = -V_\infty \quad (\text{Velocidade na saída não pode ser menor que zero})$$

$$V_s = \frac{1}{3} \cdot V_\infty \quad (14)$$

Substituindo a equação (14) na equação (11)

$$P_{omax} = \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot A_t \cdot V_\infty^3 \quad (15)$$

O rendimento máximo será dado por:

$$\eta_{max} = \frac{P_{omax}}{P_t}$$

$$\eta_{\max} = \frac{8/27 \cdot \rho \cdot A_t \cdot V_{\infty}^3}{1/2 \rho \cdot A_t \cdot V_{\infty}^3}$$

$$\eta_{\max} = 16/27 \cong 59,3\% \quad (16) \text{ rendimento m\u00e1ximo te\u00f3rico}$$

Levando-se em conta o atrito e outras perdas, naturalmente n\u00e3o se encontra este rendimento (59,3%), o rendimento mais elevado encontrado na pr\u00e1tica para uma turbina e\u00f3lica real \u00e9 da ordem de 50% a 75% do rendimento m\u00e1ximo te\u00f3rico.

#### I.6.2. Defini\u00e7\u00e3o do Fator de Indu\u00e7\u00e3o Axial, a

Esta defini\u00e7\u00e3o \u00e9 baseada na teoria da varia\u00e7\u00e3o da quantidade de movimento.

Da equa\u00e7\u00e3o (9),

$$V_h = \frac{V_{\infty} + V_s}{2}$$

$$\therefore 2 \cdot V_h = V_{\infty} + V_s$$

$$\therefore V_h + V_h = V_{\infty} + V_s$$

$$\therefore V_{\infty} - V_h = V_h - V_s \quad (17)$$

Da equa\u00e7\u00e3o (9) pode-se escrever,

$$V_h = \frac{V_{\infty}}{2} + \frac{V_s}{2} \quad (18)$$

Substituindo na equação (17) vem;

$$1 - \frac{V_h}{V_\infty} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{V_s}{V_\infty}\right) \quad (19)$$

Define-se "a" como:

$$a = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{V_s}{V_\infty}\right) \quad (20)$$

Da equação (19)

$$V_h = (1 - a) \cdot V_\infty \quad (21)$$

Ainda da equação (20) vem que:

$$V_s = (1 - 2a) \cdot V_\infty \quad (22)$$

De posse das velocidades na entrada e na saída e através do rotor da turbina, o disco atuador da teoria da variação da quantidade de movimento, fica o seguinte

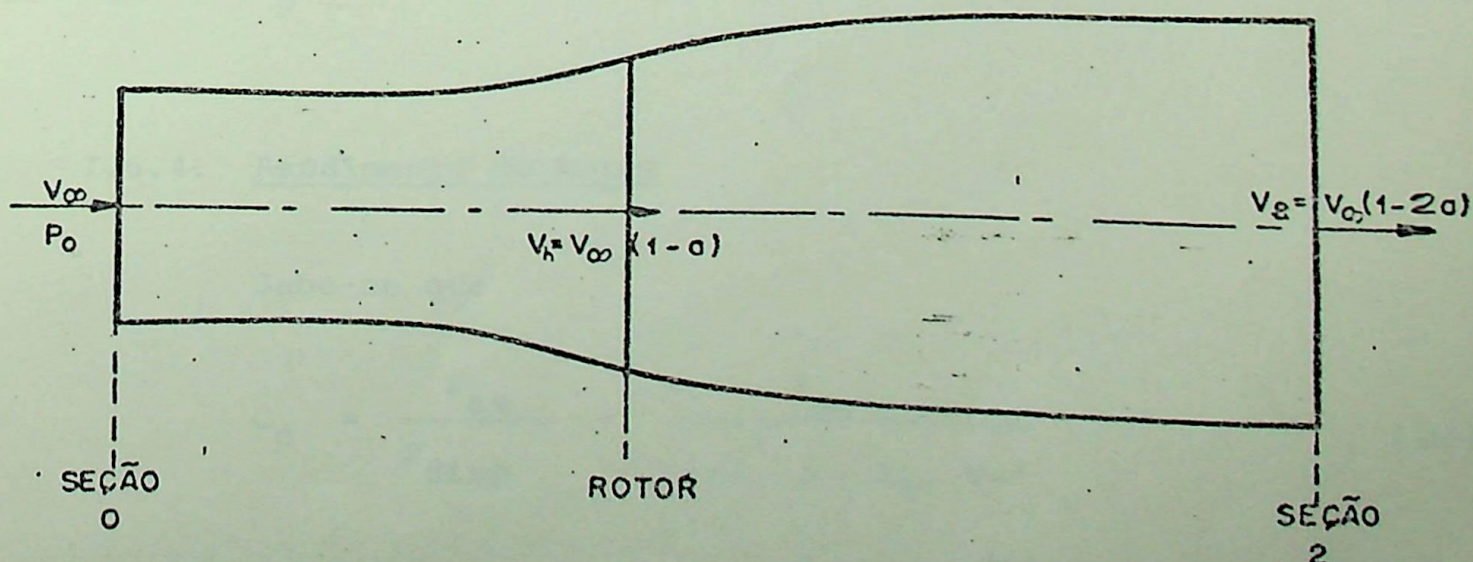


Figura 3. Disco Atuador

I.6.3. Coeficiente de Potência

Usando o fator de indução axial,  $a$ , e Coeficiente de Potência  $C_p$ , ao invés de rendimento, vem:

$$C_p = \frac{P_{ex}}{P_{disp}}$$

$$C_p = \frac{\overset{\sqrt{h}}{V_i} \cdot (V_\infty^2 - V_s^2)}{V_\infty^3}$$

$$C_p = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{V_s}{V_\infty}\right) \cdot \left(1 + \frac{V_s}{V_\infty}\right)^2 \quad (23)$$

Por outro lado, sabe-se que:

$$\left(\frac{V_s}{V_\infty} + 1\right)^2 = 4 \cdot (1 - a)^2 \quad (24)$$

Substituindo a equação (24) na equação (23),

$$C_p = 4 \cdot a \cdot (1 - a)^2 \quad (25)$$

I.6.4. Rendimento do Rotor

Sabe-se que

$$C_p = \frac{P_{ex}}{P_{disp}} = \frac{P_{ex}}{1/2 \cdot \rho \cdot A_t \cdot V_\infty^3} \quad (26)$$

É importante notar que esta definição de Coeficiente de Potência;  $C_p$ , não é o rendimento do rotor. Esta equação repre -

senta o rendimento máximo, desde que a vazão em massa através do disco atuador não é  $A_t \cdot V_\infty$  mas sim  $A_t \cdot V_h$ , portanto o rendimento do rotor será:

$$\eta_R = \frac{P_{ex}}{1/2 \cdot \rho \cdot A_t \cdot V_h \cdot V_\infty^2} \quad (27)$$

Da equação (26), vem:

$$P_{ex} = P_{disp} \cdot C_p$$

$$P_{ex} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_t \cdot V_\infty^3 \cdot 4 \cdot a \cdot (1 - a)^2 \quad (28)$$

Substituindo a equação (28) em (27) temos:

$$\eta_R = 4 \cdot a \cdot (1 - a) \quad (29)$$

ou ainda:

$$\eta_R = \left[ 1 - \left( \frac{V_s}{V_\infty} \right)^2 \right] \quad (30)$$

$$\text{Da Teoria de Betz; } \frac{V_s}{V_\infty} = \frac{1}{3} \quad (31)$$

Substituindo (31) em (30), vem:

$$\eta_R = \frac{8}{9} \cong 88,88\% \text{ rendimento máximo}$$

### I.6.5. Definição do Fator de Perturbação Rotacional, $a'$

Defini-se como fator de perturbação rotacional,  $a'$ , como sendo a relação da velocidade rotacional do fluido pela velocidade rotacional do rotor, ou seja:

$$a' = \frac{\omega}{2 \Omega} \quad (32)$$

## II. Teoria do Elemento de Pá

Para a análise local este é o modelo mais simples assim como a Teoria da Variação da Quantidade de Movimento é para a análise de características globais.

A base da Teoria do Elemento de Pá é a hipótese de que cada seção da pá pode ser estudada isoladamente (e portanto em duas dimensões), sendo desprezível a influência de seções vizinhas no comportamento aerodinâmico da seção em consideração.

As grandezas globais como torque, potência, etc, são obtidas pela integração dos valores locais, ao longo da pá.

Esta teoria é bastante simples e em geral utilizada apenas para fins didáticos e análises qualitativos.

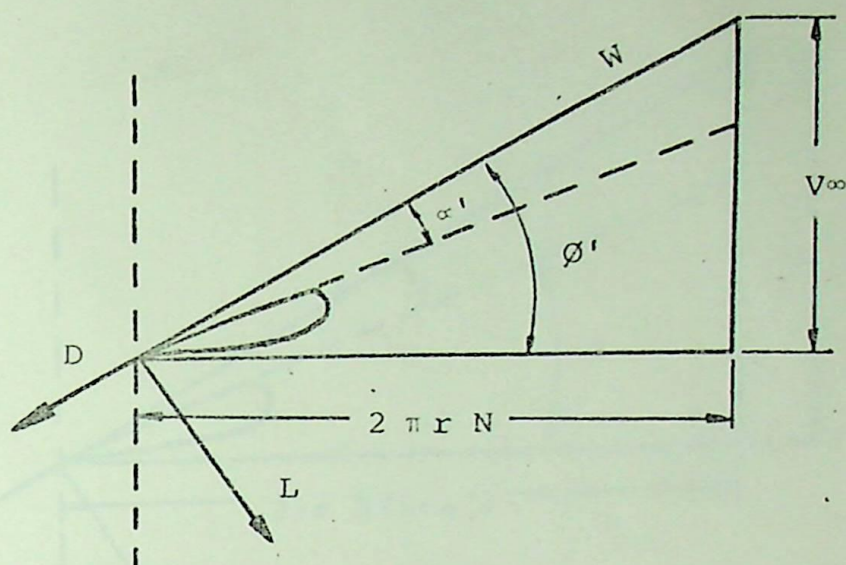


Figura 4. Diagrama de Força e Velocidade T.E.P.

### III. Teoria do Elemento de Pá combinado com a Teoria da Variação da Quantidade de Movimento

#### III.1. Introdução

Este modelo consiste na combinação da teoria do elemento de pá com a teoria da variação da quantidade de movimento.

Desta maneira, os efeitos globais, como as velocidades induzidas, por exemplo, são utilizadas na montagem dos diagramas locais de força e velocidade.

Nota-se que a velocidade e a pressão são supostas constantes em toda a área do disco.

Neste modelo são incluídos correções diversas como o efeito do número de pás, efeitos de ponta, etc.

Diagrama de Força e Velocidade

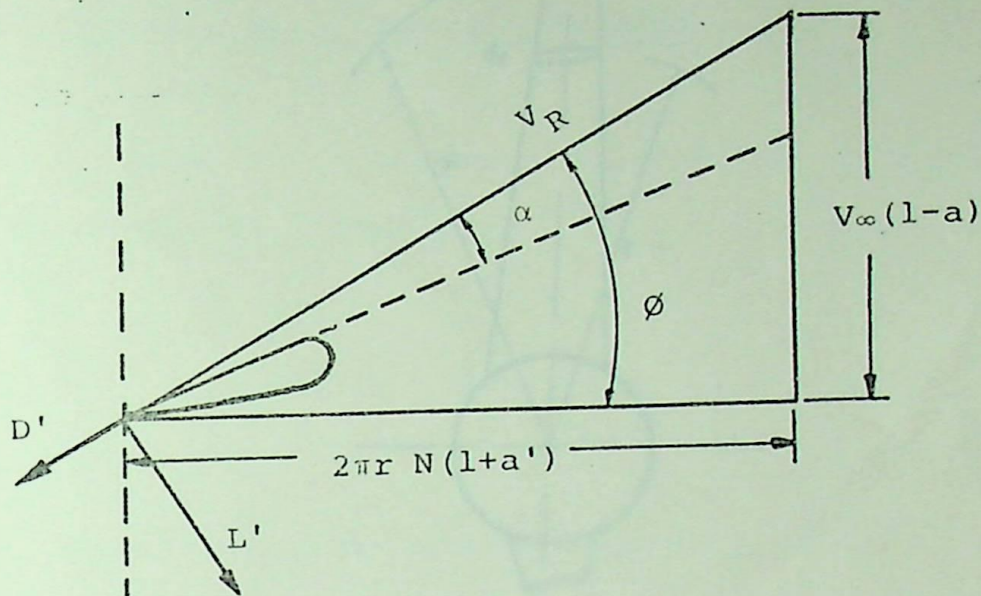


Figura 5. Diagrama de Força e Velocidade  
TEP + TVQM

III.2. Desenvolvimento

Consideram-se as figuras (6) e (7) ; abaixo

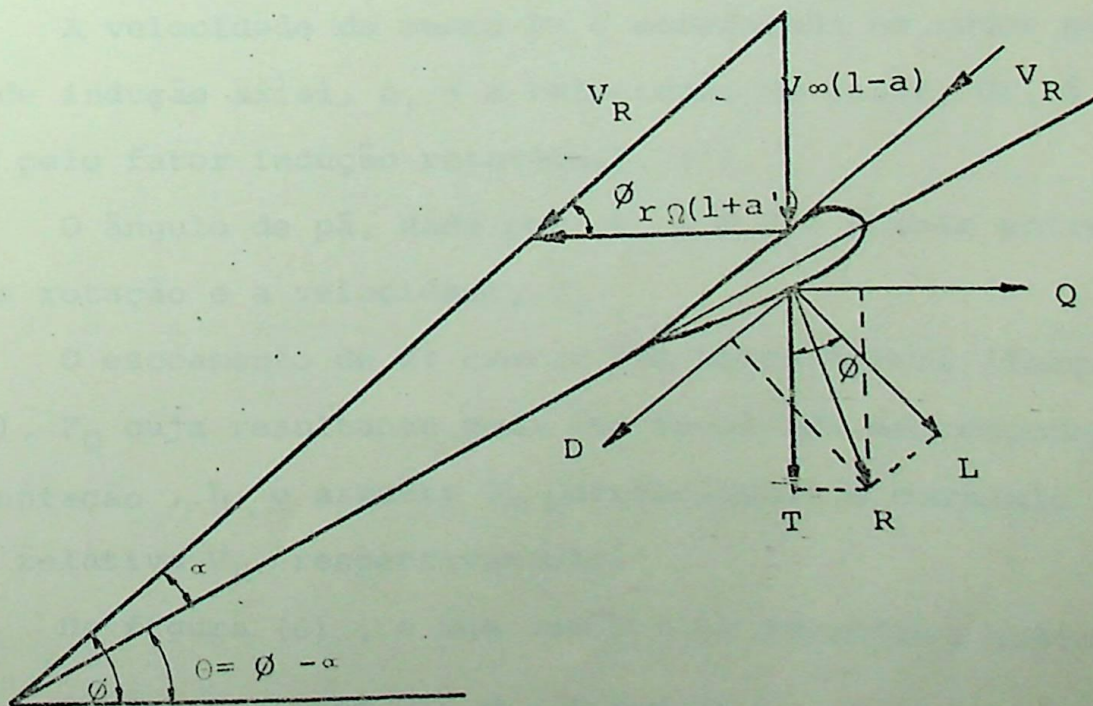


Figura 6.

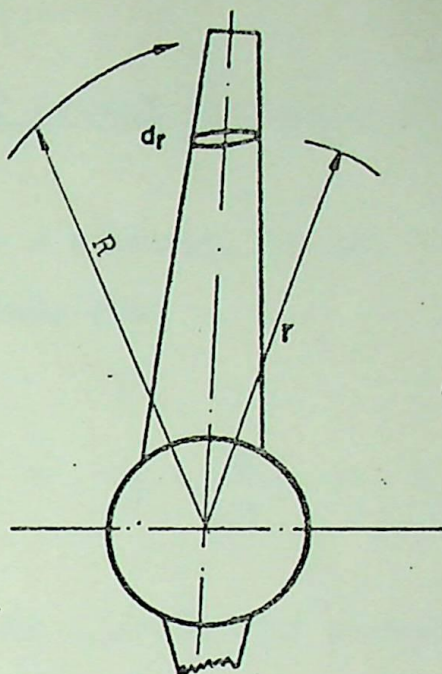


Figura 7.

A figura (6) mostra a secção do perfil com as velocidades e as forças relevantes.

A figura (7) mostra a pá de um rotor (hélice) vista de frente, com o perfil da pá mostrado em raio  $r$ .

A velocidade do vento  $V_{\infty}$  é modificada no rotor pelo fator de indução axial,  $a$ , e a velocidade do rotor,  $\Omega r$ , é modificada pelo fator indução rotacional,  $a'$ .

O ângulo de pá, dado por  $\theta$ , e  $\phi$  é o ângulo entre o plano de rotação e a velocidade,  $V_R$ .

O escoamento de ar exerce uma força normal (força de empuxo),  $F_Q$  cuja resultante pode ser resolvida em componentes de sustentação,  $L$ , e arrasto  $D$ , perpendicular e paralelo à velocidade relativa  $V_R$ , respectivamente.

Da figura (6), e com auxílio da geometria tem-se:

$$F_T \text{ (empuxo)} = L \cdot \cos \phi + D \cdot \sin \phi \quad (33)$$

$$F_Q \text{ (torque)} = L \cdot \sin \phi - D \cdot \cos \phi \quad (34)$$

Os coeficientes de empuxo e torque são dados por: .105.

$$C_T = C_L \cdot \cos \phi + C_D \cdot \sin \phi \quad (35)$$

$$C_Q = C_L \cdot \sin \phi - C_D \cdot \cos \phi \quad (36)$$

### III.3. Obtenção da 1.ª Equação Fundamental

O empuxo sobre o elemento de pá,  $dr$ , e o número de pás,  $B$ , e da corda,  $c$ ; é dado por:

$$dT_B = B \cdot C_T \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_R^2 \cdot c \cdot dr \quad (37)$$

Vamos introduzir o parâmetro adimensional, solidez do catavento,  $\sigma$ , que é dado por:

$$\sigma = \frac{B \cdot c}{2 \pi r} \quad (38)$$

de onde tiramos:  $c = \sigma \cdot 2 \pi r / B$  (39)

Levando (38) em (37), vem:

$$dT_B = C_T \cdot \rho \cdot V_R^2 \cdot \pi \cdot r \cdot \sigma dr \quad (40)$$

Na figura (6), sabe-se que:

$$\sin \phi = \frac{V_\infty \cdot (1 - a)}{V_R} \quad \therefore \quad V_R = V_\infty \cdot (1 - a) \cdot \operatorname{cosec} \phi \quad (41)$$

Levando a equação (41) na equação (40) vem:

$$dT_B = \rho \cdot C_T \cdot V_\infty^2 \cdot (1 - a)^2 \cdot \operatorname{cosec}^2 \phi \cdot \sigma \cdot \pi r dr \quad (42)$$

Aplicando equação da Quantidade de Movimento para um

volume formado pelo anular contendo,  $dr$ ,  $a$ ,  $V^\infty$ ,  $V_h$ , a força  $dT$  pode ser escrita como:

$$dT = dm \cdot (V^\infty - V_s) \quad (43)$$

onde:  $dm = \rho \cdot (2\pi r dr) \cdot V_h$

$$V_h = (1 - a) \cdot V^\infty \quad (21) \quad \text{e} \quad V^\infty - V_s = 2a \cdot V^\infty \quad (22)$$

$$dT = \rho \cdot (2\pi r dr) \cdot (1 - a) \cdot V^\infty \cdot 2a \cdot V^\infty$$

$$\frac{dT}{dr} = 4 \cdot \pi r \cdot \rho \cdot V^\infty{}^2 \cdot (1 - a) \cdot a \quad (44)$$

Igualando a equação (42) com a equação (44), vem:

$$\frac{a}{1 - a} = \frac{B \cdot c \cdot C_L}{8 \pi r} \cdot \frac{\cotg \phi}{\text{sen } \phi} \cdot \left(1 + \frac{C_D}{C_L} \cdot \text{tg } \phi\right) = \quad (45)$$

#### III.4. Obtenção da 2.<sup>a</sup> Equação Fundamental

Tem-se da equação (34),  $F_Q$  (força de torque), da equação (36),  $C_Q$ , coeficiente de torque e o torque sobre o elemento de pá  $dr$ , e o número de pás,  $B$ , e da corda,  $c$ ; é

$$dQ_B = B \cdot C_Q \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_R^2 \cdot c \cdot r dr \quad (46)$$

levando equação (39) em (46) tem-se

$$dQ_B = \rho \cdot C_Q \cdot V_R^2 \cdot \sigma \cdot \pi \cdot r^2 dr \quad (47)$$

Substituindo a equação (41) na equação (47)

vem:

$$dQ_B = C_Q \cdot \rho \cdot V^\infty^2 \cdot (1 - a)^2 \cdot \cos^2 \varnothing \cdot \sigma \cdot \pi \cdot r^2 dr \quad (48)$$

Pela teoria da conservação do momento angular, tem-se:

$$dQ = (2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr) \cdot \rho \cdot u \cdot r^2 \cdot \omega$$

$$u = V_h = (1 - a) \cdot V^\infty$$

$$\omega = 2 \cdot \Omega \cdot a'$$

$$dQ = 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot r^2 \cdot a' \cdot (1 - a) \cdot V^\infty \cdot 2 \cdot \Omega \cdot r \cdot dr$$

$$dQ = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \rho \cdot V^\infty \cdot (1 - a) \cdot a' \cdot \Omega \cdot r dr \quad (49)$$

Igualando a expressão (48) com a expressão (49), e com auxílio da figura (6);

$$\operatorname{tg} \varnothing = \frac{V^\infty \cdot (1 - a)}{r \cdot \Omega \cdot (1 + a')} \quad (50)$$

vem;

$$\frac{a'}{1 + a'} = \frac{B \cdot c \cdot C_L}{4\pi r \cdot \cos \varnothing} \cdot \left(1 - \frac{C_D}{C_L} \cdot \cotg \varnothing\right) \quad (51)$$

#### Potência Extraída do Vento

$$\text{Sabe-se que, } dP = dQ \cdot \Omega \quad (52)$$

Substituindo a equação (49) vem:

$$dP = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \rho \cdot V_{\infty} \cdot (1 - a) \cdot a' \cdot r \cdot \Omega \cdot dr \cdot \Omega$$

$$\frac{dP}{dr} = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \rho \cdot V_{\infty} \cdot (1 - a) \cdot a' \cdot r \cdot \Omega \cdot \Omega \quad (53)$$

Da expressão (50), vem:

$$V_{\infty} \cdot (1 - a) = \operatorname{tg} \varnothing \cdot r \cdot \Omega \cdot (1 + a') \quad (54)$$

Substituindo a expressão (54) na expressão (53),

vem:

$$\frac{dP}{dr} = 4 \pi \cdot \rho \cdot (r \cdot \Omega)^3 \cdot (1 + a') \cdot a' \cdot \operatorname{tg} \varnothing \cdot r \quad (55)$$

Por outro lado;

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{V_{\infty}} \quad (56)$$

vem que:  $\frac{r \cdot \Omega}{V_{\infty}} = \frac{\lambda r}{R} \quad (57)$

Substituindo equação (57), na equação (50), vem,

$$\operatorname{tg} \varnothing = \frac{R}{r \cdot \lambda} \cdot \left( \frac{1 - a}{1 + a'} \right) \quad (58)$$

Substituindo em (55) temos:

$$\frac{dP}{dr} = 4 \pi \rho \cdot r^3 \cdot V_{\infty}^3 \cdot \left( \frac{\lambda}{R} \right)^2 \cdot a' \cdot (1 - a) = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 \cdot V_{\infty}^3 \cdot \frac{8 \cdot \lambda^2}{R^2} \cdot r^3 \cdot a' \cdot (1 - a) \quad (59)$$

## APÊNDICE [ B ]

Solução da Equação da Energia

$$a'(1+a) \cdot x^2 - a \cdot (1-a) = 0$$

Para o máximo coeficiente de potência,

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \cdot \int_0^\lambda (1-a) \cdot a' \cdot x^3 dx \quad (1)$$

a derivada de  $(1-a)a'$  deve ser nulo

$$d [(1-a) \cdot a'] = 0$$

$$-a' + (1-a) \cdot \frac{da'}{da} = 0$$

$$\frac{da'}{da} = \frac{a'}{1-a} \quad (2)$$

Através da equação (4.3), vem:

$$x^2 = \frac{a(1-a)}{a'(1+a')}$$

$$\therefore a'(1+a') = \frac{a}{x^2} \cdot (1-a) \quad (3)$$

Chamando de  $Z = a'(1+a')$ , vem

$$Z = \frac{a}{x^2} \cdot (1-a) \quad (4)$$

Derivando Z em relação a,

$$\frac{dz}{da} = \frac{1 - 2a}{x^2} \quad (5)$$

Derivando Z em relação a',

$$\frac{dz}{da'} = 1 + 2a' \quad (6)$$

Aplicando a regra da cadeia, e substituindo as equações (5) e (6), vem:

$$\frac{da'}{da} = \frac{da'}{dz} \cdot \frac{dz}{da}$$

$$\frac{da'}{da} = \frac{1}{(1+2a')} \cdot \frac{(1-2a)}{x^2} \quad (7)$$

Igualando as equações (2) e (7), vem:

$$\frac{a'}{1-a} = \frac{(1-2a)}{(1+2a') \cdot x^2} \quad (8)$$

Substituindo a equação (4.3) em (8):

$$\frac{a'}{(1-a)} = \frac{(1-2a)}{(1+2a')} \cdot \frac{1}{\frac{a(1-a)}{a'(1+a')}} \quad (8)$$

$$1 = \frac{(1 - 2a) \cdot (1 + a')}{(1 + 2a') \cdot a}$$

$$(1 + 2a') = (1 - 2a) \cdot (1 + a')$$

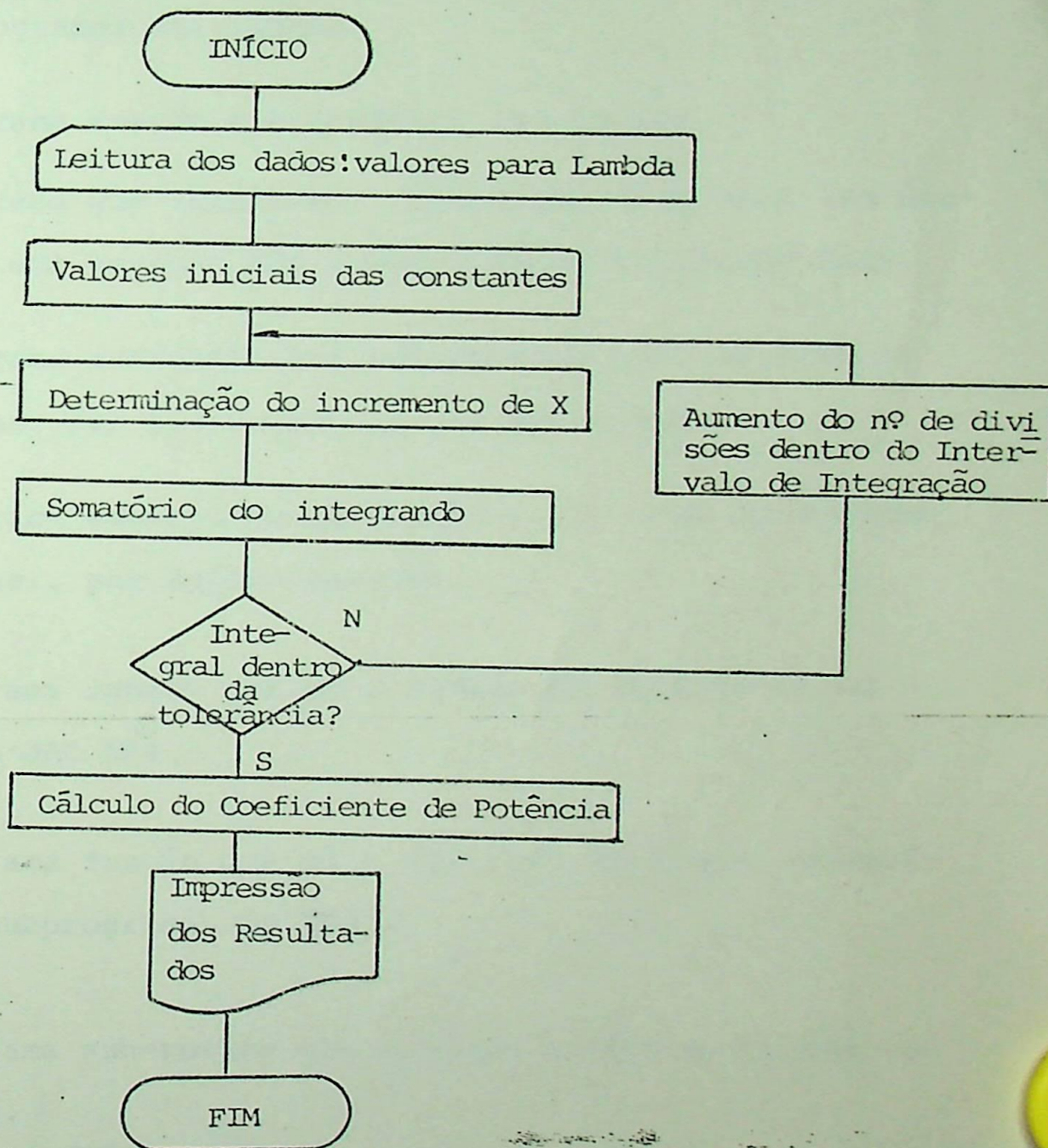
$$1 + 2a' = 1 + a' - 2a - 2a \cdot a'$$

$$a' - 4a a' = 3a - 1$$

$$a' = \frac{3a - 1}{1 - 4a} \tag{9}$$

## I. Método de Glauert

Diagrama de Blocos simplificado:



O método de solução já foi descrito neste trabalho. Neste anexo, o autor apresenta o diagrama de blocos, a listagem do programa em linguagem FORTRAN.

OBS.. Este método de solução para o modelo de Glauert, foi um trabalho dos alunos da Pós-Graduação da Escola Federal de Engenharia

de Itajubá - EFEI, turma de Mecânica do ano de 1986, sob a orientação do Prof. Tapan Kumar Sen.

O programa foi acrescentado à tese, com algumas modificações (realizadas pelo autor da tese), que se fizeram necessárias.

Os subprogramas utilizados são métodos numéricos de autoria do Prof. José A.R. dos Santos (EFEI).

Subprogramas utilizados:

- Y - subprograma função que contém o integrando.
- FUNCT - subprograma que localiza e refina uma raiz real (se houver) de uma equação não linear, em um intervalo dado.
- JAC 503- subprograma sub-rotina que refina raiz real de equação não linear por bissecção, em intervalo dado.
- JAC 504- subprograma sub-rotina que refina raiz real de equação não linear, por Newton-Raphson.
- F - subprograma função que dá a função necessária ao subprograma JAC 504.
- DF - subprograma função que dá a derivada da função necessária ao subprograma JAC 504.
- CALC - subprograma sub-rotina que calcula e imprime outros resultados.

À seguir apresenta-se a listagem do programa em linguagem FORTRAN.

Listagem do Programa em Linguagem FORTRAN

```

PAGE 1 HEWLETT-PACKARD 32201A.7.15 EDIT/3000 TUE, JUL 28, 1967, 10:59 AM <C> HE PAGE 2 HEWLETT-PACKARD 32201A.7.15 EDIT/3000 TUE, JUL 28, 1967,
1 PROGRAM UM
2 DETERMINACAO DE CP - MODELO DE GLAUERT
3 INTEGRACAO METODO DOS TRAPEZIOS
4
5 PARTE INTEGRANTE DA TESE
6
7 AUTOR: JULIO SANTANA ANTUNES - 1986 -
8
9 ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA
10
11 SIGNIFICADO DAS VARIAVEIS
12
13 LAMB= RAZAO DE VELOCIDADES
14 A= FATOR DE PERTURBACAO AXIAL
15 A0=VALOR INICIAL DE A - A0=.2500
16 AN=VALOR MAXIMO DE A - AN=.333333
17 AL=FATOR DE PERTURBACAO TANGENCIAL
18 A1=FATOR DE PERTURBACAO AXIALMAIS UM DELTA A("DA")
19 DA= VARIACAO INCREMENTAL DO FATOR DE A
20 XO= LIMITE INFERIOR DA INTEGRACAO
21 XN= LIMITE SUPERIOR DA INTEGRACAO
22 X=RELACAO(R PEQUENO/R)*LAMB
23 XN1=LIMITE SUPERIOR DA INTEGRACAO MENOS UM INCREMENTO "H"
24 H = INCREMENTO DA INTEGRACAO
25 S1=SOMA DOS VALORES FINAL E INICIAL DO INTEGRANDO
26 S2=SOMA DOS VALORES DO INTEGRANDO P/ CADA VARIACAO
27 DE A E X
28 S= SOMA DE S1 E S2
29 Y(A,X)= VALOR DO INTEGRANDO PARA CADA A E X
30 N= NUMERO DE DIVISOES DENTRO DO INTERVALO DE INTEGRACAO
31 INT= VALOR DA INTEGRALNA ITERACAO
32 INTA= VALOR DA INTEGRAL NA ITERACAO ANTERIOR
33 I= CONTADOR DO NÚMERO DE VEZES QUE A EXCEDE AN
34 FI= ANGULO ENTRE PLANO ROTACAO E VELOCIDADE RELATIVA
35 K = RELACAO ECCL/EP1P
36 SIGCL=PRODUTO DO COEFICIENTE DE SUSTENTACAO PELA SOLIDEZ
37 CP= COEFICIENTE DE POTENCIA
38
39 INICIO DO PROGRAMA PRINCIPAL
40
41 IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
42 DOUBLE PRECISION INT,INTA,LAMB,N,H,K,LAMB,F,ILAMB,SIGCL,PI
43 INTEGER I,N,X
44
45 VALOR INICIAL DE LAMBDA
46
47 DISPLAY"VALOR INICIAL DE LAMBDA"
48 READ(5,*)LAMB
49
50 VALOR INICIAL DE LAMBDA"
51
52 DISPLAY"VALOR FINAL DE LAMBDA"
53 READ(5,*)LAMB
54
55 DISPLAY"INCREMENTO DE LAMBDA"
56 READ(5,*)ILAMB
57
58 DISPLAY"NUMERO DE DIVISOES DE X: <<<LAMBDA"

```

```

58 READ(5,*) NX
59
60 CONTINUE
61
62 VALORES INICIAIS DAS CONSTANTES
63
64 PI=3.14159265400
65 INTA=0.00
66 N=1.00
67 XN=LAMB
68 XO=0.00
69 CONTINUE
70
71 X=XO
72 INT=0.00
73
74 DETERMINACAO DO INCREMENTO DE X
75
76 H=(XN-XO)/N
77 CONTINUE
78 X=X+H
79
80 CALL FUNCT(A,X)
81
82 IF(ABS(X-LAMB).LT.1.E-10) GO TO 200
83
84 SOMATORIO DO INTEGRANDO
85
86 INT=INT+H*Y(A,X)
87 GO TO 300
88 CONTINUE
89
90 CALL FUNCT(A,X)
91
92 S1=Y(A,X)
93 INT=INT+H*S1/2.00
94
95 VALOR DA INTEGRAL DENTRO DA TOLERANCIA?
96
97 IF(ABS((INT-INTA)/INT).LT.5E-2) GO TO 600
98 INTA=INT
99
100 AUMENTO DO NUMERO DE DIVISOES DENTRO DO MESMO INTERVALO DE
101 INTEGRACAO
102 N=N+2.00
103 GO TO 700
104 CONTINUE
105
106 CALCULO DE CP
107
108 CP=(8.00/X**2.00)*INT
109
110 WRITE (6,*) "CP=",CP
111
112 IMPRESSAO DO CABECALHO
113
114 DO 1800 I=1,2

```

```

115 C WRITE<4,10>
116 DO 1100 I=1,9
117 WRITE<4,20>
118
119 1100 CONTINUE
120 WRITE<4,30>
121 DO 1200 I=1,4
122 WRITE<4,40>
123
124 1200 CONTINUE
125 WRITE<4,50>
126 WRITE<4,60>
127 WRITE<4,50>
128 DO 1300 I=1,5
129 WRITE<4,40>
130
131 1300 CONTINUE
132 WRITE<4,70> LAMB
133 DO 1400 I=1,6
134 WRITE<4,40>
135
136 1400 CONTINUE
137 WRITE<4,50>
138 WRITE<4,80>
139 DO 1500 I=1,5
140 WRITE<4,40>
141
142 1500 CONTINUE
143 WRITE<4,90> CP
144 DO 1600 I=1,3
145 WRITE<4,40>
146
147 1600 CONTINUE
148 WRITE<4,30>
149 DO 1700 I=1,9
150 WRITE<4,20>
151
152 1700 CONTINUE
153 WRITE<4,110>
154
155 C IMPRESSAO DOS DEMAIS RESULTADOS
156
157 C CALL CALCLAMB,NX)
158
159 C INCREMENTO DE LAMB
160
161 C 1800 CONTINUE
162 LAMB=LAMB+LLAMB
163 IF(LAMB.LE.LAMB.F) GO TO 800
164
165 C STOP
166
167 C
168
169 10 FORMAT(S</,1X,15X,94<"#")>
170 FORMAT(1X,15X,"#",92X,"#")
171
172 20 FORMAT(1X,15X,"#",19X,54<"*")>,19X,"#",
173
174 30 FORMAT(1X,15X,"#",19X,"#",19X,54<"*")>,19X,"#",
175
176 40 FORMAT(1X,15X,"#",19X,"#",19X,"#",6X,40<"-")>,6X,"#",19X,"#">
177
178 50 FORMAT(1X,15X,"#",19X,"#",19X,"#",52X,"*",19X,"#">
179
180 60 FORMAT(1X,15X,"#",19X,"#",19X,"#",16X,"RAZAO DE VELOCIDADES",16X,"*",
181
182 *19X,"#">
183
184 70 FORMAT(1X,15X,"#",19X,"*",17X,"LAMBDA=",F10.2,17X,"*",19X,"#">
185
186 80 FORMAT(1X,15X,"#",19X,"*",14X,"COEFICIENTE DE POTENCIA",15X,"*",
187
188 *19X,"#">
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228

```

```

90 90 FORMAT(1X,15X,"#",19X,"*",17X,"CP=",F10.5,21X,"*",19X,"#">
110 110 FORMAT(1X,15X,94<"#"),/1H1)
END
SUBPROGRAMA FUNCTION QUE CONTEM O INTEGRANDO
DOUBLE PRECISION FUNCTION Y(A,X)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
CALCULO DO VALOR DO INTEGRANDO PARA CADA A E X
Y=(1.D0-3.D0*A)/(4.D0*A-1.D0)*1.D0-6)*X**3.D0
RETURN
END
SUBROUTINE FUNCT(X,X1)
LOCALIZA E REFINA UMA RAIZ REAL< SE HOUVER ) DE UMA EQUACAO
NAO LINEAR, EM UM INTERVALO DADO
XO=VALOR INICIAL DE NO INTERVALO DADO
XF= " FINAL DE X
DX= INCREMENTO DE X
TEF= TOLERANCIA NO VALOR DA FUNCAO(RISSECAO)
TBR= " NA DIFERENCA ENTRE ESTIMATIVAS SUCESSIVAS
(BISSECAO)
THR= IDEN,(NEWTON RAPHISON)
LIM=LIMITE NO NUMERO DE ITERACOES NO REFINAMENTO POR N-R
K= CODIGO QUE INDICARA, APÓS A EXECUCAO DA SUB-ROTIINA, SE
HOUE SUCESSO NA OBTENCAO DA RAIZ
K=0- NAO FOI ACHADA RAIZ NAS CONDICAOES DADAS
K=1 - RAIZ FOI LOCALIZADA E REFINADA CORRETAMENTE
X- VALOR DA RAIZ, QUANDO K=1
USA OS SUBPROGRAMAS JAC 503 E JAC504
PEDE DOS SUBPROGRAMAS FUNCAO DE DUPLA PRECISAO
F(X) QUE DEFINE A FUNCAO DA EQUACAO DADA F(X)=0
DF(X) QUE DA A DERIVADA DE F(X)
IMPLICIT LOGICAL (A-Z)
INTEGER LIN,K
DOUBLE PRECISION XO,XF,DX,TBF,TBR,TNF,TNR,X
DOUBLE PRECISION XI
INTEGER K1
DOUBLE PRECISION XM,PF,XR
FUNCAO SUBPROGRAMA USADA
DOUBLE PRECISION F
EXTERNAL F,DF
XO=.25D0
XF=.34D0
DX=.001D0
TBF=.05D0
TBR=.05D0
TNF=.0001D0
TNR=.000001D0

```

```

229 C LIN=1000
230 C K=0
231 C X=XO
232 C
233 C INICIO DA VARREDURA
234 C
235 C
236 C 13 CONTINUE
237 C XH=X+DX
238 C IF(XH.GT.XF+SD-6) GO TO 14
239 C PF=F(X,XI)*F(XH,XI)
240 C IF(PF.NE.0.) GO TO 141
241 C
242 C CAIU EM CIMA DE UMA RAIZ
243 C
244 C IF(F(X,XI).EQ.0.) GO TO 1421
245 C X=XN
246 C 1421 CONTINUE
247 C K=1
248 C GO TO 14
249 C 141 CONTINUE
250 C IF(PF.GT.0.) GO TO 146
251 C
252 C LOCALIZOU RAIZ, AGORA O PRE-REFINAMENTO POR BISSECCAO
253 C
254 C CALL JACS03KF,X,XM,TBF,TR,XR,XI)
255 C
256 C REFINAMENTO FINAL POR NEWTON RAPHSON
257 C
258 C CALL JACS04KF,DF,XR,TNF,TR,LIM,KI,XI)
259 C
260 C IF(KI.NE.0) GO TO 1461
261 C
262 C NAO HOUVE CONVERGENCIA POR N-R, VOLTA REFINAR POR
263 C BISSECCAO ATE O FIM
264 C
265 C CALL JACS03KF,X,XM,TNF,TR,XR,XI)
266 C
267 C 1461 CONTINUE
268 C X=XR
269 C K=1
270 C GO TO 14
271 C 146 CONTINUE
272 C X=XH
273 C GO TO 13
274 C 14 CONTINUE
275 C RETURN
276 C
277 C ENO
278 C
279 C SUBROUTINE JACS03KF,XE,XD,TF,TR,XR,XI)
280 C
281 C REFINA RAIZ REAL DE EQUACAO NAO LINEAR POR
282 C BISSECCAO, EM IM INTERVALO DADO
283 C XE- EXTREMO DO INTERVALO DADO, A ESQUERDA
284 C XD- " " " " A DIREITA
285 C TF- TOLERANCIA NO VALOR DA FUNCAO
286 C TR- " " NA DIFERENCA ENTRE ESTIMATIVAS SUCESSIVAS

```

```

285 C
286 C
287 C
288 C
289 C
290 C
291 C
292 C
293 C
294 C
295 C
296 C
297 C
298 C
299 C
300 C
301 C
302 C
303 C
304 C
305 C
306 C
307 C
308 C
309 C
310 C
311 C
312 C
313 C
314 C
315 C
316 C
317 C
318 C
319 C
320 C
321 C
322 C
323 C
324 C
325 C
326 C
327 C
328 C
329 C
330 C
331 C
332 C
333 C
334 C
335 C
336 C
337 C
338 C
339 C
340 C
341 C
342 C

```

```

C XR- VALOR REFINADO DE X
C PEDE SUBPROGRAMA FUNCAO DE DUPLA PRECISAO F(X), QUE DA FUNCAO
C IMPLICIT LOGICAL(A-Z)
C
C DOUBLE PRECISION XE,XD,TF,TR,XR,XI
C
C FUNCAO SUBPROGRAMA USADA
C
C DOUBLE PRECISION F
C CONTINUE
C KR=(XE+XD)/2,
C IF(ABS(F(XR,XI))>.LE.TF.AND.ABS((XR-XE)/XR)>.LE.TR) GO TO 14
C IF(F(XE,XI)*F(XR,XI).LT.0.) GO TO 141
C XE=XR
C GO TO 142
C 141 CONTINUE
C 142 CONTINUE
C GO TO 13
C 14 CONTINUE
C RETURN
C ENO
C
C SUBROUTINE JACS04KF,DF,X,TF,TR,LIM,KOD,XI)
C
C REFINA RAIZ REAL POR N-R
C X- ESTIMATIVA DA RAIZ
C TF- TOLERANCIA NO VALOR DA FUNCAO
C TR- " " NA DIFERENCA ENTRE ESTIMATIVAS SUCESSIVAS
C LIM- LIMITE NO NUMERO DE ITERACOES PARA CONVERGENCIA
C KOD=0 NAO HOUVE CONVERGENCIA
C KOD=1 REFINAMENTO TEVE SUCESSO
C PEDE SUBPROGRAMA DE DUPLA PRECISAO F(X)E DF(X), QUE DAO A FUNCAO
C DA EQUACAO E SUA DERIVADA
C IMPLICIT LOGICAL(A-Z)
C
C INTEGER LIM,KOD
C DOUBLE PRECISION X,TF,TR
C DOUBLE PRECISION XT
C FUNCOES SUBPROGRAMAS USADAS
C
C DOUBLE PRECISION F,DF
C DOUBLE PRECISION XI
C
C INDICES
C
C INTEGER I1
C KOD=0
C I1=1
C 13 CONTINUE
C IF(I1.GT.LIM) GO TO 14
C XT=X
C X=XT-F(XT,XI)/DF(XT,XI)

```

```

343 343 IF(ABS(F(X,X1)),GT,TF,OR,ABS((X-XI)/X),GT,TR) GO TO 141
344 344 KOD=1
345 345 GO TO 14
346 346 CONTINUE
347 141 I=I+1
348 348 GO TO 13
349 14 CONTINUE
350 350 RETURN
351 351 END
352 352
353 353 DOUBLE PRECISION FUNCTION F(X,X1)
354 354
355 355
356 356 DA A FUNCAO NECESSARIA AO PROGRAMA JAC 500
357 357 (ARMAZENADA NO ARQUIVO JAC 5059
358 358
359 359 IMPLICIT LOGICAL(A-Z)
360 360 DOUBLE PRECISION X,X1
361 361 F=16.D0+X**2.D0-24.D0*X**2.D0+(9.D0-3.D0*X1**2.D0)*X+
362 362 *(X1**2.D0-1.D0)
363 363 RETURN
364 364 END
365 365
366 366 DOUBLE PRECISION FUNCTION DF(X,X1)
367 367
368 368 DA DERIVADA DA FUNCAO NECESSARIA AO PROGRAMA JAC500
369 369 (ARMAZENADA NO ARQUIVO JAC506
370 370
371 371 IMPLICIT LOGICAL(A-Z)
372 372 DOUBLE PRECISION X,X1
373 373 DF=48.D0*X**2.D0-48.D0*X+9.D0-3.D0*X1**2.D0
374 374 RETURN
375 375 END
376 376
377 377
378 378 SUBROTINA QUE CALCULA E IMPRIME DEMAIS PARAMETROS
379 379
380 380
381 381 SUBROUTINE CALC(LAMB,NX)
382 382 IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
383 383 DIMENSION SIGCL(100),XX(100),AA(100),FIGG(100)
384 384 DOUBLE PRECISION LAMB,K,PI
385 385 INTEGER NX
386 386 PI=3.141592654D0
387 387
388 388 IMPRESSAO DO CABECALHO
389 389
390 390
391 391 WRITE(4,10)
392 392 WRITE(4,20)
393 393 WRITE(4,30)
394 394 DO 100 I=1,NX
395 395 CI=I
396 396 CH=NX
397 397 X=LAMB*CI/CN
398 398 XX(I)=LAMB*CI/CN
399 399 CALL FUNCT(A,X)

```

```

400 400 AA(I)=A
401 401
402 402 CALCULO DE FI
403 403
404 404 FI=ATAN(SORT((1.D0-A)*(1.D0-3.D0*A))/A)
405 405 FIG=180.D0*FI/PI
406 406 FIGG(I)=FIG
407 407
408 408 CALCULO DE BCCL/8PI
409 409
410 410 K=SORT((1.D0-3.D0*A)/(1.D0-A))*SIN(FI)
411 411 SIGCL(I)=4.D0*K
412 412
413 413 CALCULO DE AL
414 414
415 415 AL=(1.D0-3.D0*A)/(4.D0*A-1.D0)
416 416 IF(1.EQ.50) GO TO 200
417 417 WRITE(4,40)X,A,AL,SIGCL(I),FIG
418 418 WRITE(6,*)"X",X,"A",A,"SIGCL",SIGCL(I)
419 419 CONTINUE
420 420
421 421 CRIACAO DE ARQUIVOS
422 422
423 423 WRITE(4,30)
424 424 DO 24 J=1,NX
425 425 WRITE(10,*)SIGCL(J),XX(J)
426 426 CONTINUE
427 427
428 428 DO 25 M=1,NX
429 429 WRITE(11,*)XX(M),AA(M),SIGCL(M)
430 430 CONTINUE
431 431 DO 105 N=1,NX
432 432 WRITE(15,*)SIGCL(N)
433 433 CONTINUE
434 434
435 435 DO 194 JA=1,NX
436 436 WRITE(15,*)XX(JA),FIGG(JA)
437 437 CONTINUE
438 438
439 439 GO TO 300
440 440 CONTINUE
441 441 WRITE(4,40)X,A,AL,SIGCL(I),FIG
442 442 WRITE(4,50)
443 443 WRITE(4,10)
444 444 WRITE(4,20)
445 445 WRITE(4,30)
446 446 GO TO 100
447 447 CONTINUE
448 448 RETURN
449 449
450 450
451 451

```

```

10 FORMAT(4(//),1X,15X,70(" " ))
20 FORMAT(1X,15X,2X,"X=(R/LAMBDA",2X,6X,"A",10X,3X,
  *A",5X,1X,"SIGCL",5X,1X,"FIGRAUS)",2X)
30 FORMAT(1X,15X,70(" " ))
40 FORMAT(1X,15X,3X,F10.6,4X,1X,F10.8,2X,1X,F11.8,2X,2X,

```

PAGE 9 HEWLETT-PACKARD 32201A.7.15 EDIT/3000 TUE, JUL 28, 1987, 10:59 AM (C) HE

452 \*F10.8,SX,F7.4,2X)  
453 50 FORMAT(1H1)  
454 C  
455 C  
456 END

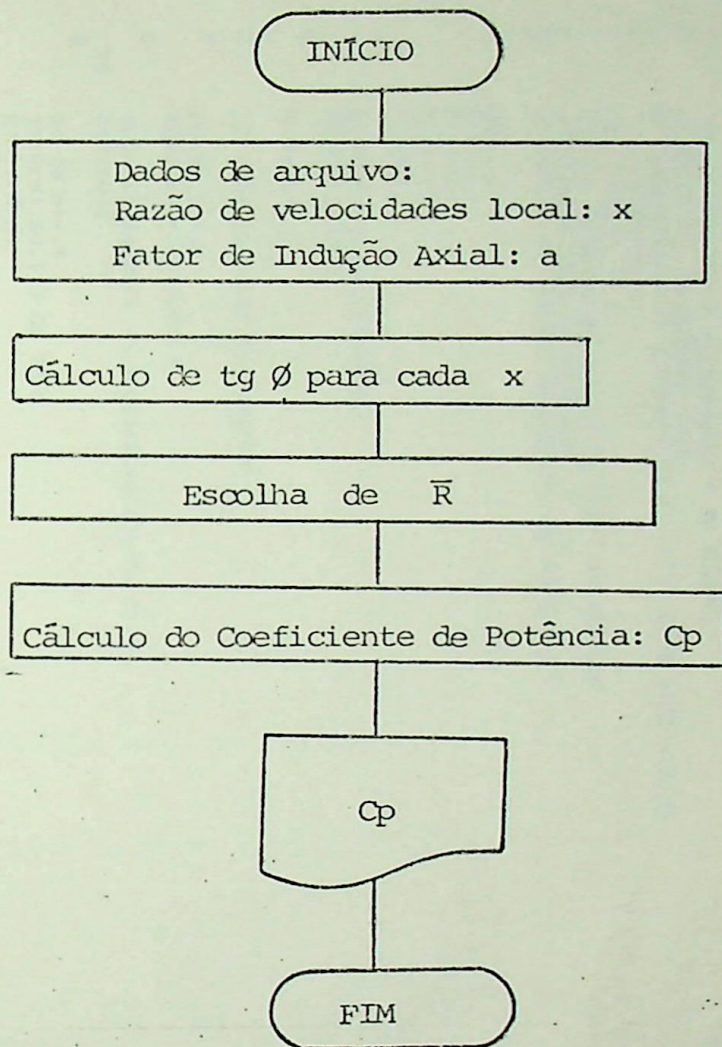
## Parâmetros Otimizados

$X=(r/R)\lambda$	A	A'	SIGCL	FI(GRAUS)
.100000	.26234678	3.93277850	1.774407867	56.1929
.200000	.27463560	1.73697984	1.56274191	52.4600
.300000	.28407453	1.09421446	1.36877233	48.8672
.400000	.29189832	.74170671	1.19465685	45.4657
.500000	.29834627	.54275745	1.04100421	42.2900
.600000	.30364501	.41506636	.90718308	39.3575
.700000	.30799770	.32762892	.79172903	36.6720
.800000	.31157923	.26498263	.69272950	34.2268
.900000	.31453583	.21845431	.60812304	32.0085
1.000000	.31698730	.18301270	.53589838	30.0000
1.100000	.31903048	.15539719	.47420769	28.1825
1.200000	.32074300	.13347966	.42141735	26.5370
1.300000	.32218684	.11580874	.37611918	25.0457
1.400000	.32341144	.10136600	.33711915	23.6918
1.500000	.32445622	.08941944	.30341532	22.4600
1.600000	.32535276	.07943208	.27417220	21.3369
1.700000	.32612641	.07100287	.24869533	20.3104
1.800000	.32679760	.06382756	.22640810	19.3697
1.900000	.32738289	.05767208	.20683153	18.5057
2.000000	.32789578	.05235408	.18956711	17.7100
2.100000	.32834732	.04772988	.17428254	16.9756
2.200000	.32874660	.04368506	.16069987	16.2960
2.300000	.32910114	.04012769	.14858592	15.6657
2.400000	.32941720	.03698320	.13774434	15.0799
2.500000	.32970001	.03419066	.12800922	14.5343
2.600000	.32995396	.03169990	.11923982	14.0250
2.700000	.33018276	.02946930	.11131636	13.5488
2.800000	.33038956	.02746413	.10413647	13.1025
2.900000	.33057704	.02565523	.09761238	12.6837
3.000000	.33074748	.02401798	.09166853	12.2900
3.100000	.33090285	.02253147	.08623968	11.9191
3.200000	.33104486	.02117788	.08126930	11.5693
3.300000	.33117496	.01994191	.07670821	11.2389
3.400000	.33129443	.01881039	.07251356	10.9264
3.500000	.33140438	.01777195	.06864781	10.6303
3.600000	.33150579	.01681671	.06507805	10.3494
3.700000	.33159950	.01593605	.06177531	10.0827
3.800000	.33168627	.01512245	.05871401	9.8290
3.900000	.33176676	.01436930	.05587153	9.5876
4.000000	.33184155	.01367078	.05322779	9.3575
4.100000	.33191116	.01302176	.05076493	9.1380
4.200000	.33197606	.01241768	.04846703	8.9283
4.300000	.33203666	.01185451	.04631985	8.7279
4.400000	.33209332	.01132865	.04431065	8.5362
4.500000	.33214638	.01083689	.04242799	8.3525
4.600000	.33219614	.01037635	.04066157	8.1765
4.700000	.33224285	.00994446	.03900211	8.0077
4.800000	.33228677	.00953388	.03744124	7.8455
4.900000	.33232810	.00915754	.03597136	7.6897
5.000000	.33236705	.00881985	.03458561	7.5400

$X=(r/R)$ LÁMBDA	A	A'	SIGCL	FI (GRAUS)
5.100000	.33240380	.00848020	.03327773	7.3958
5.200000	.33243850	.00814094	.03204206	7.2570
5.300000	.33247130	.00783937	.03087342	7.1233
5.400000	.33250235	.00755420	.02976707	6.9943
5.500000	.33253175	.00728427	.02871871	6.8699
5.600000	.33255964	.00702852	.02772438	6.7498
5.700000	.33258610	.00678598	.02678045	6.6338
5.800000	.33261123	.00655574	.02588360	6.5216
5.900000	.33263512	.00633700	.02503078	6.4132
6.000000	.33265785	.00612901	.02421915	6.3082
6.100000	.33267950	.00593106	.02344614	6.2066
6.200000	.33270012	.00574254	.02270933	6.1082
6.300000	.33271979	.00556284	.02200652	6.0129
6.400000	.33273856	.00539143	.02133566	5.9204
6.500000	.33275649	.00522781	.02069486	5.8308
6.600000	.33277362	.00507151	.02008234	5.7438
6.700000	.33279000	.00492210	.01949649	5.6593
6.800000	.33280567	.00477919	.01893578	5.5773
6.900000	.33282068	.00464241	.01839880	5.4975
7.000000	.33283506	.00451140	.01788423	5.4201
7.100000	.33284885	.00438585	.01739086	5.3447
7.200000	.33286207	.00426547	.01691754	5.2714
7.300000	.33287476	.00414996	.01646320	5.2001
7.400000	.33288695	.00403908	.01602684	5.1307
7.500000	.33289866	.00393257	.01560754	5.0631
7.600000	.33290992	.00383022	.01520441	4.9972
7.700000	.33292074	.00373181	.01481664	4.9331
7.800000	.33293116	.00363713	.01444347	4.8705
7.900000	.33294119	.00354601	.01408416	4.8095
8.000000	.33295084	.00345827	.01373805	4.7500
8.100000	.33296015	.00337374	.01340450	4.6920
8.200000	.33296912	.00329226	.01308291	4.6353
8.300000	.33297778	.00321370	.01277272	4.5800
8.400000	.33298613	.00313792	.01247340	4.5260
8.500000	.33299419	.00306478	.01218444	4.4732
8.600000	.33300197	.00299417	.01190538	4.4217
8.700000	.33300949	.00292596	.01163576	4.3713
8.800000	.33301676	.00285906	.01137518	4.3220
8.900000	.33302378	.00279636	.01112322	4.2739
9.000000	.33303058	.00273476	.01087953	4.2268
9.100000	.33303715	.00267517	.01064373	4.1807
9.200000	.33304351	.00261751	.01041550	4.1356
9.300000	.33304967	.00256168	.01019450	4.0915
9.400000	.33305564	.00250763	.00998045	4.0483
9.500000	.33306142	.00245526	.00977306	4.0060
9.600000	.33306702	.00240452	.00957205	3.9646
9.700000	.33307245	.00235533	.00937716	3.9240
9.800000	.33307772	.00230764	.00918814	3.8842
9.900000	.33308282	.00226138	.00900478	3.8453
10.000000	.33308778	.00221649	.00882683	3.8071

## II. Método de Shepherd

Diagrama de Blocos simplificado:

Notas:

- O fator de indução axial,  $a$ , utilizado como dado de entrada para cada  $x$ , é o encontrado na referência [ 5 ]
- A escolha de  $\bar{R} = C_L/C_D$ , se refere as opções:  

$$\bar{R} = 30, 50, 100 \text{ e } \infty$$
- No cálculo do Coeficiente de Potência,  $C_p$ , a integral é resolvida através da aplicação do Método dos Trapézios.

Listagem do programa em Linguagem FORTRAN

```

1  DIMENSION X(100),R(100),TANFI(100),R(10)
2  C
3  C
4  C
5  C
6  C
7  C
8  C
9  C
10 C
11 C
12 C
13 C
14 C
15 C
16 C
17 C
18 C
19 C
20 C
21 C
22 C
23 C
24 C
25 C
26 C
27 C
28 C
29 C
30 C
31 C
32 C
33 C
34 C
35 C
36 C
37 C
38 C
39 C
40 C
41 C
42 C
43 C
44 C
45 C
46 C
47 C
48 C
49 C
50 C
51 C
52 C
53 C
54 C
55 C
56 C
57 C

PROGRAMA PARA CALCULAR O COEFICIENTE DE POTENCIA
SEGUNDO SHEPHERD

PARTE INTEGRANTE DA TESE

AUTOR: JULIO SANTANA ANTUNES - 1985

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA

SIGNIFICADO DAS VARIAVEIS

LAMBDA= RAZAO DE VELOCIDADES ( NA FONTA)
X= RAZAO DE VELOCIDADE LOCAL
K= COEFICIENTE DE SUSTENTACAO DIVIDIDO PELO COEFICIENTE
DE ARRASTO
KT= INVERSO DE R
TANFI= TANGENTE DO ANGULO DO PLANO DE ROTACAO
CP= COEFICIENTE DE POTENCIA
N= NUMERO DE PONTOS DO ARQUIVO, NO MAXIMO 50

REAL KT
R(1)=30,
R(2)=50,
R(3)=100,
R(4)=0.

DISPLAY VALOR DE LAMBDA
READ(5,*)LAMB

N=5*LAMB

LEITURA DE DADOS DO ARQUIVO

DO 30 J=1,N
READ(10,*)X(I),R(I)

TANFI(I)=SQRT(1.-4.*R(I)+3.*R(I)**2)/R(I)
CONTINUE
30

DO 20 M=1,4
IF(R(H),EQ,0.) GO TO 5
KT=1./R(KM)
GO TO 15
KT=0

5
INTEGRAL POR TRAPEZIO

15 ALAMB=LAMB
AGA=ALAMB/N
TRAP=0.0
DO 50 K=1,N-1
TRAP=TRAP+A(K)*X(1.-A(K))*TANFI(K)*X(1.-KT/TANFI(K))*X(K)**2
CONTINUE
50
TRAP=2.*TRAP+A(N)*X(1.-A(N))*TANFI(N)*X(1.-KT/TANFI(N))*X(N)**2

58
59 C
60 C
61 C
62 C
63 C
64 C
65 C
66 C
67 C
68 C
69 C
70 C
71 C

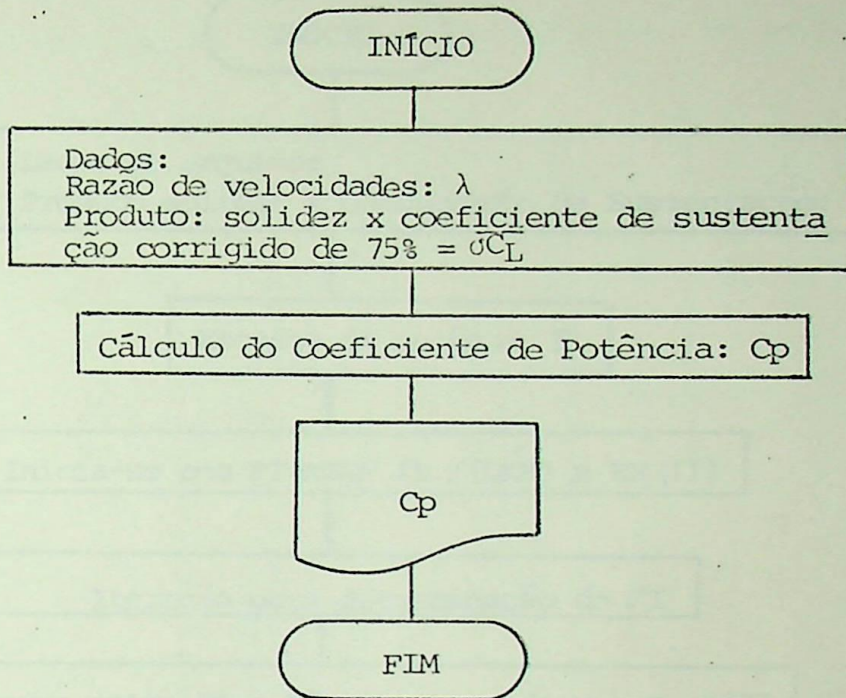
CALCULO DO COEFICIENTE DE POTENCIA
CP=4.*AGA*TRAP/ALAMB**2

WRITE(6,*)'LAMB=',ALAMB,'R=',R(KM),'CP=',CP
WRITE(4,70)
FORMAT(27,20X,53('-','))
WRITE(4,80)ALAMB,R(KM)
FORMAT(27,20X,'LAMBDA=',F5.1,10X,'R=',F6.1)
WRITE(4,90)CP
FORMAT(7,20X,'COEFICIENTE DE POTENCIA=',F9.6)
CONTINUE
20
STOP
END

```

### III. Método Experimental de Iwasaki

Diagrama de Blocos simplificado:



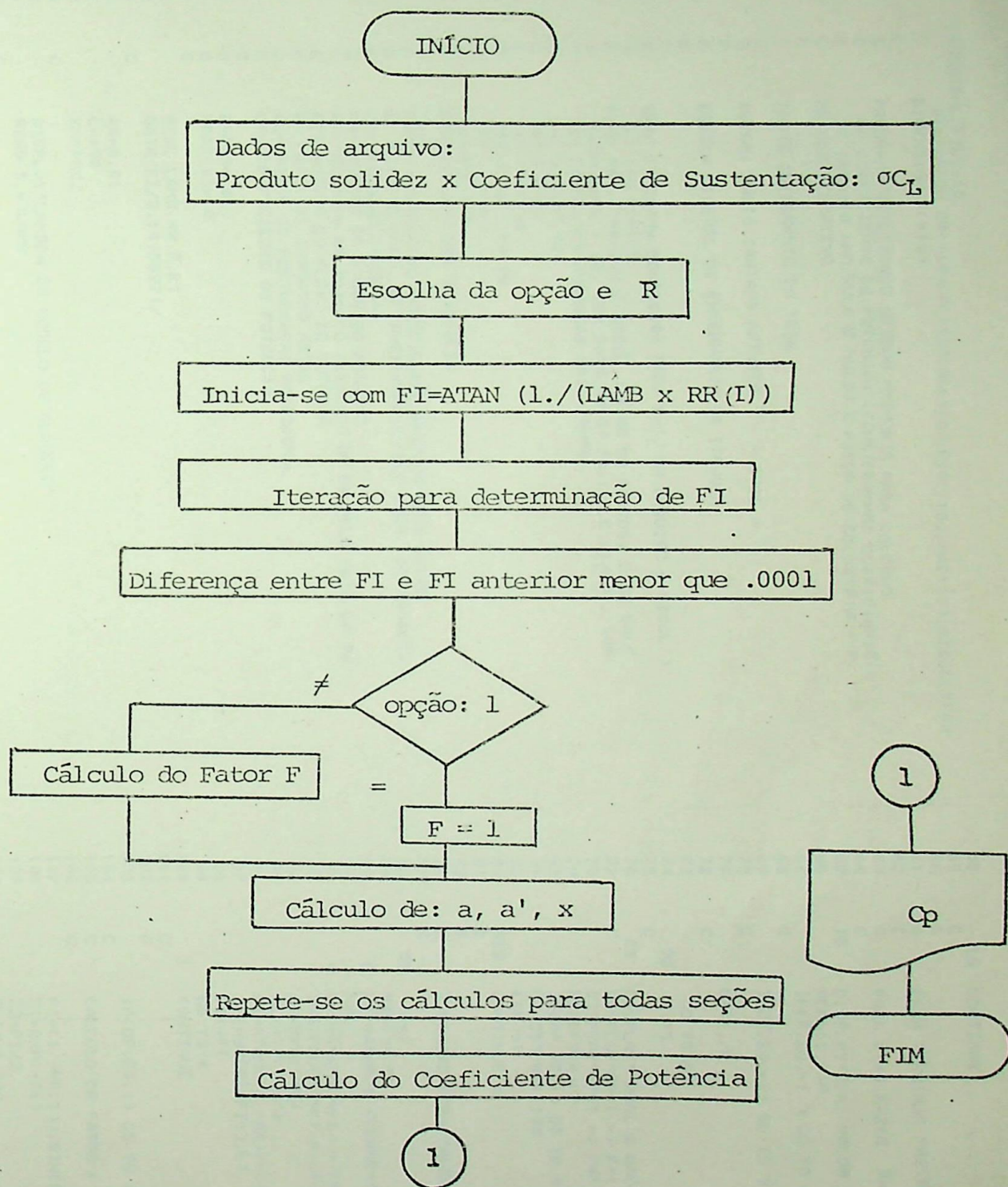
Listagem do programa em Linguagem FORTRAN

```

1  C
2  C
3  C
4  C
5  C
6  C
7  C
8  C
9  C
10 C
11 C
12 C
13 C
14 C
15 C
16 C
17 C
18 C
19 C
20 C
21 WRITE(4,10)
22 10 FORMAT(10,'1X,20X,39C"-")
23 WRITE(4,20)
24 20 FORMAT(1X,20X,"1",6X,"COEFICIENTE DE POTENCIA",8X,"1")
25 WRITE(4,30)
26 30 FORMAT(1X,20X,39C"-")
27 WRITE(4,40)
28 40 FORMAT(1X,20X,"1",2X,"LAMBDA",1X,"1",2X,"SIGCLC",5X,"1"
29 *,"2X,"Iwasaki",4X,"1")
30 WRITE(4,30)
31 C
32 C
33 C
34 C
35 C
36 C
37 C
38 C
39 C
40 C
41 C
42 C
43 C
44 C
45 C
46 C
47 WRITE(4,50) LAMB,SIGCLC,CPIWA
48 50 FORMAT(1X,20X,"1",2X,F6.2,1X,"1",2X,F10.7,1X,"1",2X,F10.7,1X,"1"
49 *)
50 GO 102
51 C
52 1 WRITE(4,30)
53 C
54 C
55 STOP
56 END
  
```

## IV. Método Adimensional Iterativo

Diagrama de Blocos simplificado:

Notas

- A escolha da opção é para escolha do fator F, se opção igual a 1, faz-se  $F = 1$ , caso contrário, calculo F e a outra escola de opção é para  $\bar{R} = 30, 40, 50, 70, 100$  e  $\infty$ .
- No cálculo do Coeficiente de Potência, a integral é resolvida pelo método dos trapézios.

Listagem do programa em Linguagem FORTRAN

PAGE 1  
HEWLETT-PACKARD 32201A.7.15 EDIT/3000 TUE, JUL 28, 1987, 10:59 AM (C) HE

```

1 4CONTROL FILE=10
2 DIMENSION RR(110),AK(110),AL(110),FIC(110),XK(110),SIGCL(110)
3 DIMENSION F(110)
4
5 C
6 C
7 C
8 C
9 C
10 C
11 C
12 C
13 C
14 C
15 C
16 C
17 C
18 C
19 C
20 C
21 C
22 C
23 C
24 C
25 C
26 C
27 C
28 C
29 C
30 C
31 C
32 C
33 C
34 C
35 C
36 C
37 C
38 C
39 C
40 C
41 C
42 C
43 C
44 C
45 C
46 C
47 C
48 C
49 C
50 C
51 C
52 C
53 C
54 C
55 C
56 C
57 C

```

PROGRAMA UTILIZANDO METODO PROPOSTO PARA CALCULO DO COEFICIENTE DE POTENCIA (CONSIDERANDO COEFICIENTE DE ARRASTO NAO NULO E NULO) E FATOR DE GOLDSTEIN - F. METODO ITERATIVO

PARTE INTEGRANTE DA TESE

AUTOR: JULIO SANTANA ANTUNES - 1986 -

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA

ESTE PROGRAMA CONSIDERA PARA F=1, UM ARQUIVO ( SIGCL ) DE 100 PONTOS, PARA F#1, ARQUIVO ( SIGCL ) E DE 50 PONTOS, E SO VALE PARA LAMB = 10, COM R=30,40,50,70,100,E (1/0), COM AS SEQUINTES MUDANCAS NAS LINHAS,

46-> AR=0.02  
47-> L=50  
48-> XM=50.  
49-> RR(1)=0.02  
91-> H=2\*I  
169-> J=1

SIGNIFICADO DAS VARIÁVEIS

LAMB- RELACAO DE VELOCIDADES ANGULAR PELA LIVRE  
K- RELACAO COEF. DE SUSTENTACAO PELLO COEF. DE ARRASTO  
KT- RELACAO INVERSA  
NR- NUMERO DE DADOS DO ARQUIVO  
RR- RELACAO DE RAIO DO ELEMENTO DE PA PELO RAIO DA PA  
FI- ANGULO DO PLANO DE ROTACAO  
A- FATOR DE INDUCCAO AXIAL  
AL- FATOR DE PERTURBACAO ROTACIONAL  
CP- COEFICIENTE DE POTENCIA

RR(0)= 0  
TRAP(0)= 0

REAL LAMB, NR, R, KT  
DATA PI/3.141592717

AR=0.01  
L=100  
XM=100.

DISPLAY "LAMBDA DO MODELO DE GLAUERT"  
READ(S,\*)LAMB

LEITURA DE DADOS DE ARQUIVO

DO 16 J=1,100  
READ(10,\*)SIGCL(J)

PAGE 2  
HEWLETT-PACKARD 32201A.7.15 EDIT/3000 TUE, JUL 28, 1987,

```

58 16 CONTINUE
59 C
60 C
61 C
62 C
63 C
64 C
65 C
66 C
67 C
68 C
69 C
70 C
71 C
72 C
73 C
74 C
75 C
76 C
77 C
78 C
79 C
80 C
81 C
82 C
83 C
84 C
85 C
86 C
87 C
88 C
89 C
90 C
91 C
92 C
93 C
94 C
95 C
96 C
97 C
98 C
99 C
100 C
101 C
102 C
103 C
104 C
105 C
106 C
107 C
108 C
109 C
110 C
111 C
112 C
113 C
114 C

```

PARA TERMINAR FAZER R=-1

PARA KT=0 FAZER R=-2

DISPLAY "QUAL VALOR DE R= CL/CD"

READ(S,\*)R

IF(R.EQ.-1.) GO TO 2

IF(R.EQ.-2) GO TO 95

KT=1./R

GO TO 65

KT=0

65 DISPLAY "QUAL A OPCAO?"  
DISPLAY "OP=1 -> F=1"  
DISPLAY "OP#1 -> F#1"  
READ(S,\*)OP

IF(OP.NE.1) GO TO 55

DO 555 K=1,100

F(K)=1.  
CONTINUE

555 CONTINUE

ITERACAO PARA CALCULO DO ANGULO FI

I=1

RR(I)=.01

FI=ATAN(1./LAMB\*RR(I))

M=1

4 X=SIGCL(H)\*((1. + KT\*ATAN(FI)))/(4.\*SIN(FI)\*TAN(FI))  
Y=SIGCL(M)\*((1. - KT/TAN(FI)))/(4.\*COS(FI))

A1=X/(1.+X)  
AL1=Y/(1.-Y)

FI=ATAN((1.-A1)/(1.+AL1)\*RR(I)\*LAMB)

IF(ABS(FI-FI1).LT..0001) GO TO 3

FI=FI  
GO TO 4

3 CONTINUE

IF(OP.EQ.1) GO TO 235

235 CALCULO DE FATOR F

F1=((1.-RR(I))/SIN(FI1))  
Z1=EXP(-F1)  
Z2=PI/2.  
F(I)=1./Z1  
F(I)=F(I)-0.001  
Z3=COS(F(I))\*Z2  
BB=ABS(Z3-Z1)  
IF(BB.GT.0.001) GO TO 110

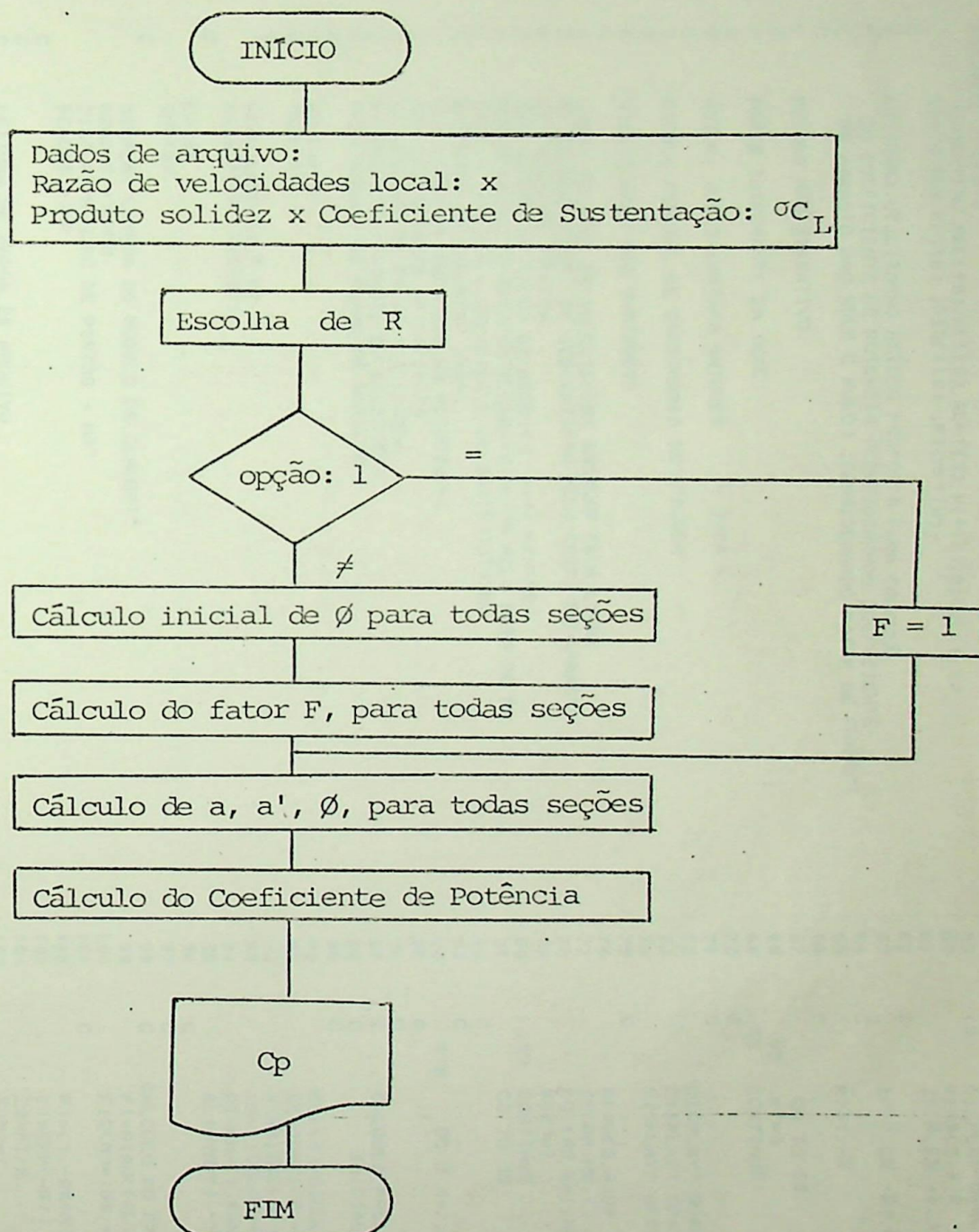
```

115 C
116 C 235 CONTINUE
117 C
118 C
119 C
120 X1=SIGGL(N)*1.*KT*TANK(FI1)))/(4.*F(I)*SIN(FI1)*TANK(FI1))
121 Y1=SIGGL(N)*1.*KT/TANK(FI1)))/(4.*F(I)*COS(FI1))
122 R(I)=X1/(1.+X1)
123 AL(I)=Y1/(1.-Y1)
124 XA(I)=R(I)*LAMB
125 FIG(I)=F1*180./PI
126 C
127 C
128 I=I+1
129 RR(I)=R(I)*AR
130 IF(RR(I).GT.1) GO TO 6
131 GO TO 5
132 C
133 C CALCULO DO COEFICIENTE DE POTENCIA
134 C
135 XL=1.
136 YL=0.
137 AGA=(XL-VL)/XH
138 TRAP=0.0
139 C
140 DO 7 K=1,L-1
141 TRAP=TRAP+AL(K)*1.-A(K))*R(K)**3)*F(K)
142 CONTINUE
143 C
144 TRAP=TRAP*2+AL(L)*1.-A(L))*R(L)**3)*F(L)
145 C
146 C CP=4.*(LAMB**2)*AGA*TRAP
147 C
148 C WRITE(6,*)'CP',CP
149 C
150 C IF(KT.NE.0) GO TO 76
151 R=0
152 C
153 C
154 C 76 WRITE(4,160) LAMB,R
155 C
156 C 160 FORMAT(30X,"RAZAO DE VELOCIDADE=",9X,"LAMBDA=",F7.2,10X,"CL/CO="
157 C ,F5.1,1/)
158 C
159 C WRITE(4,10)
160 C
161 C 10 FORMAT(1X,15X,74(" "))
162 C
163 C WRITE(4,20)
164 C
165 C 20 FORMAT(16X,4X,"X=(R/R)LAMBDA",12X,"A",19X,"A'",11X,"FI(GRAUS)
166 C *X)
167 C WRITE(4,10)
168 C
169 C DO 25 I=1,50
170 C J = 2*I
171 C
172 C
173 C 40 FORMAT(18X,F10.3,12X,F10.8,9X,F12.8,5X,F10.4,5X)
174 C
175 C 25 CONTINUE
176 C
177 C WRITE(4,17)
178 C
179 C 17 FORMAT(1/,1X,25X,50(" "))
180 C
181 C WRITE(4,90)CP
182 C
183 C 90 FORMAT(30X,"COEFICIENTE DE POTENCIA=",7X,"CP=",F10.7)
184 C
185 C 18 FORMAT(1X,25X,50(" "))
186 C
187 C WRITE(4,100)
188 C
189 C 100 FORMAT(1H)
190 C
191 C GO TO 15
192 C
193 C 2 STOP
194 C END

```

## V. Método Adimensional Não Iterativo

Diagrama de Blocos simplificado:

Notas

- A escolha de  $\bar{R}$  se refere a  $\bar{R} = 30, 40, 50, 70, 100$  e  $\infty$ .
- Quando se escolhe opção diferente de 1, calcula-se o ângulo de  $\phi$ , para posterior utilização na determinação do cálculo do fator F.
- No cálculo do Coeficiente de Potência utiliza-se o método dos trapézios para solução da integral.

Listagem do programa em Linguagem FORTRAN

```

1 #CONTROL FILE=10
2 DIMENSION RR(110),AK(110),AL(110),X(110),SIGCL(110)
3 DIMENSION F(110),FIG(110),FIGM(110)
4
5 PROGRAM UTILIZANDO METODO PROPOSTO PARA CALCULO
6 DO COEFICIENTE DE POTENCIA (CONSIDERANDO COEFICIENTE
7 DE ARRASTO NAO NULO E NULO), CONSIDERANDO FATOR DE PRANDTL
8
9 METODO NAO ITERATIVO
10
11 PARTE INTEGRANTE DA TESE
12
13 AUTOR: JULIO SARTANA ANTUNES - 1986 -
14
15 ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAUBERA
16
17 SIGNIFICADO DAS VARIAVEIS
18
19 LAMB- RELACAO DE VELOCIDADES ANGULAR PELA LIVRE
20 R- RELACAO COEF. DE SUSTENTACAO PELO COEF. DE ARRASTO
21 KT- RELACAO INVERSA
22 NR- NUMERO DE DADOS DO ARQUIVO -100 PONTOS
23 RR- RELACAO DE RAIOS DO ELEMENTO DE PA PELO RAIOS DA PA
24 SIGCL- SOLIDEZ *COEFICIENTE DE SUSTENTACAO
25 A- FATOR DE INDUCAO AXIAL
26 AL- FATOR DE PERTURBACAO ROTACIONAL
27 CP- COEFICIENTE DE POTENCIA
28 X- RELACAO DE RAIOS POR LAMBDA
29 F- FATOR DE PRANDTL OU GOLDSTEIN
30 FIG- ANGULO DO PLANO DE ROTACAO
31
32 RR(0)= 0
33 TRAF(0)= 0
34
35 REAL LAMB,NR,R,KT
36 DATA PI/3.,14159271/
37
38 L=100
39 ZM=100.
40
41 DISPLAY"LAMBDA DO MODELO DE CLAUERT"
42 READ(5,*)LAMB
43 DISPLAY"NUMERO DE PONTOS - NR"
44 READ(5,*)NR
45
46 C
47 C
48 C
49 C
50 DO 16 J=1,NR
51 READ(10,*)SIGCL(J),X(J)
52 RR(J)=X(J)/LAMB
53 CONTINUE
54
55 C
56 PARA TERMINAR FAZER R=-1
57 PARA KT=0 FAZER R=-2

```

```

58 C
59 15 DISPLAY"QUAL VALOR DE R= CL/CD"
60 READ(5,*)R
61 IF(R.EQ.-1.) GO TO 2
62
63 C
64 IF(R.EQ.-2) GO TO 95
65
66 C
67 KT=1./R
68
69 C
70 GO TO 55
71
72 95
73 KT=0
74 CONTINUE
75
76 C
77 DISPLAY" QUAL A OPCAO?"
78 DISPLAY" OP=1 -> F=1"
79 DISPLAY" OP#1 -> CALCULAR F"
80
81 C
82 READ(5,*)OP
83 IF(OP.NE.1) GO TO 115
84 DO 105 K=1,NR
85 F(K)=1
86 CONTINUE
87 GO TO 35
88
89 C
90 DO 5 M=1,L
91
92 C
93 CALCULO PRELIMINAR DE FI PARA CALCULAR F
94 INICIALMENTE F=1
95
96 C
97 CO=(4,-SIGCL(N))/4.
98 SE=SQRT(8,-SIGCL(N))*SIGCL(N)/4.
99 XM=SIGCL(N)*(CO+KT*SE)/(4.*SE*SE)
100 YM=SIGCL(N)*(1.-KT*(CO/SE))/(4.*CO)
101 A1=XM/(1.+XM)
102 AL1=YM/(1.-YM)
103
104 C
105 CALCULO DO FATOR F
106 FI=ATAN(AL1/A1)*X(N)
107 FIG(N)=180.*FI/PI
108
109 C
110 F1=(1.-RR(N))/SINK(FI)
111 Z1=EXP(-F1)
112 Z2=PI/2.
113 F(N)=1.
114 F(N)=F(N)-.001
115 Z3=COS(F(N)*Z2)
116 BB=ABS(Z3-Z1)
117 IF(BB.GT.0.001) GO TO 110
118 CONTINUE
119 S
120 CONTINUE
121
122 C
123 DO 95 MK=1,L
124 CO1=(4,-SIGCL(MK))/4.

```

```

115 SET1=SQRT((8.-SIGCL(MK))*SIGCL(MK))/4.
116 XIM=SIGCL(MK)*(CO1+KT*SE1)/(4.*F(MK)*SE1*SE1)
117 YIM=SIGCL(MK)*(1.-KT*(CO1/SE1))/(4.*F(MK)*CO1)
118 A(MK)=XIM/(1.+XIM)
119 AL(MK)=YIM/(1.-YIM)
120 FIG(MK)=ATAN(AL(MK)/A(MK))*PI
121 CONTINUE
85
122 CALCULO DO COEFICIENTE DE POTENCIA
123 C
124 XL=1.
125 YL=0.
126 AGA=(XL-YL)/ZM
127 TRAP=0.0
128 C
129 DO 7 K=1,L-1
130 TRAP=TRAP+AL(K)*(1.-A(K))*(RR(K)**3)+F(K)
131 CONTINUE
7
132 TRAP=TRAP*2+AL(L)*(1.-A(L))*(RR(L)**3)+F(L)
133 C
134 CP=4.*(LAMB**2)*AGA*TRAP
135 C
136 CP=4.*(LAMB**2)*AGA*TRAP
137 C
138 WRITE(6,*)'CP',CP
139 C
140 IF(KT.NE.0) GO TO 76
141 R=0
142
143
144
145 WRITE(4,160) LAMB,R
146 FORMAT(30X,"RAZAO DE VELOCIDADE=",9X,"LAMBDA=",F7.2,10X,"CL/CD="
147 *,F5.1,17)
148 C
149 WRITE(4,10)
150 C
151 10 FORMAT(1X,15X,74("-"))
152 WRITE(4,20)
153 20 FORMAT(16X,4X,"X=(R/R)LAMBDA",12X,"A",19X,"A'",11X,"FIG(GRAUS)
154 *X")
155 WRITE(4,10)
156 C
157 DO 25 I=1,50
158 J=2*I
159 C
160 IF(OP.NE.1) GO TO 91
161 FIG(J)=FIG(J)
162 91 WRITE(4,40)(J),A(J),AL(J),FIG(J)
163 40 FORMAT(18X,F10.3,12X,F10.3,9X,F12.8,5X,F10.4,5X)
164 C
165 CONTINUE
166 C
167 C
168 C
169 WRITE(4,17)
170 FORMAT(17,1X,25X,50("-"))
171 C

```

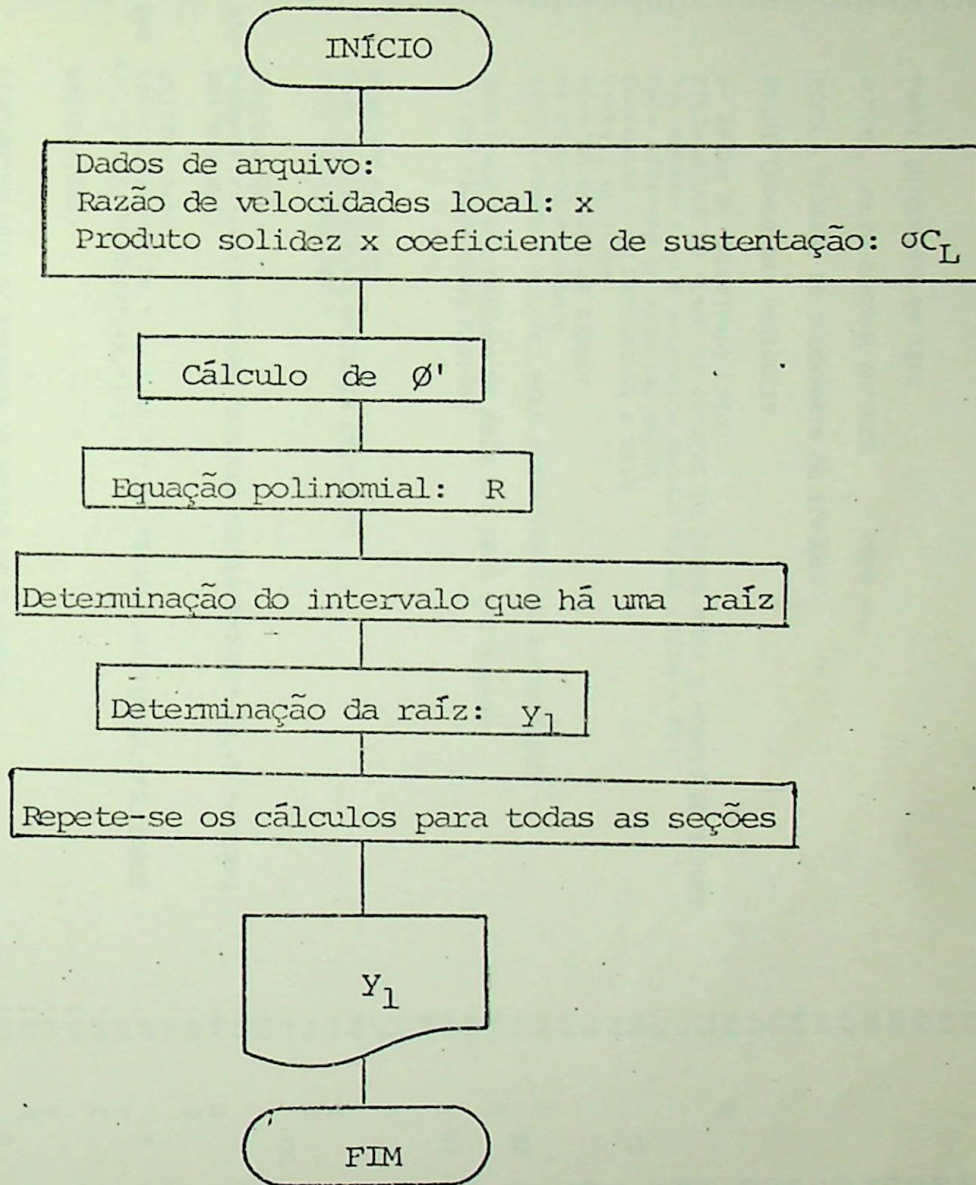
```

172 WRITE(4,90)CP
173 90 FORMAT(30X,"COEFICIENTE DE POTENCIA=",7X,"CP=",F10.7)
174 C
175 WRITE(4,18)
176 18 FORMAT(1X,25X,50("-"))
177 C
178 WRITE(4,100)
179 100 FORMAT(1H1)
180 C
181 GO TO 15
182 C
183 C
184 C
185 2 STOP
186 END

```

### VI. Solução do Método de Nogueira

Diagrama de Blocos simplificado:



#### Notas

- A determinação do intervalo que há uma raiz é feita verificando-se a mudança de sinal em R.
- A determinação da raiz é feita utilizando-se o método iterativo de Newton-Raphson.

Listagem do programa em Linguagem FORTRAN

```

PAGE 1 HEULETT-PACKARD 32201A.7.15 EDIT/3000 TUE, JUL 28, 1987, 11:01 AM (C) HE
1 4CONTROL FILE=10
2 DIMENSION X(200),SIGCL(200),YL(200)
3 C
4 C PROGRAMA PARA SOLUCAO DO MODELO DE SIDNEY
5 C
6 C PARTE INTEGRANTE DA TESE
7 C
8 C AUTOR, JULIO SANTANA ANTUNES - 1986 -
9 C
10 C ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA
11 C
12 C SIGNIFICADO DAS VARIAVEIS
13 C
14 C
15 C X- RAZAO DE VELOCIDADE LOCAL
16 C FILG=ANGULO DO PLANO DE ROTACAO EM GRAUS PARA O MODELO DE SIDNEY
17 C FIL=ARCTAN(X) E SIGNIFICA ANGULO TOTAL (TETA + FI)
18 C SN1= DERIVADA EM PRIMEIRA ORDEM
19 C SN=FUNCAO A SE DETERMINAR A RAIZ
20 C Y1=RAIZ REFINADA
21 C Y1=Y DO MODELO DE STONEY
22 C N= GRAU DO POLINOMIO
23 C SIGCL= PRODUTO SOLIDEZ PELO COEFICIENTE DE SUSTENTACAO
24 C
25 C INTERVALO PARA PROCURA DE RAIZ VAI DE 0 ATE 1,0000
26 C <COM SIGNIFICADO FISICO>
27 C
28 C
29 C
30 C
31 C REAL P1,FILG,FIL
32 C REAL A,B,C,D,F,C0,C1,C2,C3,C4,Y,R,YA
33 C DATA PI/3,1415927/
34 C
35 C
36 C WRITE(4,310)
37 C
38 C
39 C
40 C 240 WRITE(4,240)
41 C FORMAT(10X,"|",3X," x ",4X,"|",5X,"SIGCL",4X,"|",3X,"FIL<GRAUS
42 C *>","|",2X,"YSIDNEY",4X,"|")
43 C
44 C WRITE(4,380)
45 C
46 C
47 C DISPLAY"VALORES DE ENTRADA DO MODELO DE GLAUERT"
48 C
49 C
50 C DO 100 I=1,50
51 C READ(10,*)SIGCL(I),X(I)
52 C
53 C WRITE(6,*)"X=",X(I)
54 C
55 C CALCULO DO ANGULO TOTAL EM GRAUS
56 C
57 C FIL=ATANK1./X(I))

```

```

PAGE 2 HEULETT-PACKARD 32201A.7.15 EDIT/3000 TUE, JUL 28, 1987,
58 C
59 C
60 C
61 C
62 C
63 C
64 C
65 C
66 C
67 C
68 C
69 C
70 C
71 C
72 C
73 C
74 C
75 C
76 C
77 C
78 C
79 C
80 C
81 C
82 C
83 C
84 C
85 C
86 C
87 C
88 C
89 C
90 C
91 C
92 C
93 C
94 C
95 C
96 C
97 C
98 C
99 C
100 C
101 C
102 C
103 C
104 C
105 C
106 C
107 C
108 C
109 C
110 C
111 C
112 C
113 C
114 C

```

```

FILG=FIL*180./PI
SOLUCAO DO MODELO DE SIDNEY
A=COS(FIL)
B=SIN(FIL)
C=B*B*B*B*B
D=B*B
F=4.*A-SIGCL(I)
C0=-SIGCL(I)
C1=4.*D
C2=-F*D
C3=-4.*C
C4=2.*A*C
Y=0,00
R=C4*Y**4+C3*Y**3+C2*Y**2+C1*Y+C0
IF(R.GT.0) GO TO 60
Y=Y+0,0001
IF(Y.GT.1,0000) GO TO 13
R=C4*Y**4+C3*Y**3+C2*Y**2+C1*Y+C0
IF(R.LT.0) GO TO 70
WRITE(6,*)"YA=",Y-0,0001,"Y=",Y
GO TO 7
Y=Y+0,0001
IF(Y.GT.1,0000) GO TO 13
R=C4*Y**4+C3*Y**3+C2*Y**2+C1*Y+C0
IF(R.GT.0) GO TO 60
GO TO 55
WRITE(6,*)"NAO EXISTE VALOR PARA Y"
WRITE(6,*)"IMPRIMIR UM NUMERO MAIOR QUE O CAMPO(9)"
YL(I)=20.
GO TO 61
CONTINUE
VALOR DE Y
Y=Y-0,0001
CONTINUE
5 CONTINUE
SN=C4*Y**4+C3*Y**3+C2*Y**2+C1*Y+C0
SN1=4.*C4*Y**3+3.*C3*Y**2+2.*C2*Y+C1
Y1=Y-(SN/SN1)
IF(Y1.EQ.Y) GO TO 4
P=C4*Y1**4+C3*Y1**3+C2*Y1**2+C1*Y1+C0
PL=ABS(P)
IF(PL.LT.0,0001) GO TO 4
T=ABS(P-SN)
IF(T.LT.0,0001) GO TO 4
Y=Y1

```

PAGE 3 HEWLETT-PACKARD 32201A.7.15 EDIT/3000 TUE, JUL 28, 1987, 11:01 AM (C) HE

```

115 C WRITE(6,*)'Y1=',Y1, 'SN=', 'P
116 C GO TO 5
117 C CONTINUE
118 C CONTINUE
119 C CONTINUE
120 C WRITE(6,*)' A RAIZ E Y=',Y1
121 C YL(I)= Y1
122 YL(I)= Y1
123 WRITE(13,*)YL(I)
124 C
125 C 61 CONTINUE
126 C
127 C
128 C WRITE(4,300)(X(I),SIGCL(I),FILG, YL(I))
129 C FORMAT(10X,"|",2X,F7.4,2X,"|",2X,F10.8,2X,"|",2X,F9.5,6X,"|",2X
130 C *,F9.7,2X,"|")
131 C
132 C 100 CONTINUE
133 C
134 C
135 C WRITE(4,330)
136 C FORMAT(10X,59(" "))
137 C
138 C
139 C STOP
140 C END

```

## APÊNDICE - D

## EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO MÉTODO ADIMENSIONAL NÃO ITERATIVO

Para uma potência a ser gerada de 200 W e uma velocidade disponível (livre) de 4 m/s.

$$P_{ex} = 200 \text{ W}$$

$$V_{\infty} = 4 \text{ m/s}$$

Para razão de velocidades,  $\lambda = 9,0$   $\bar{R} = 30$  e escoamento tridimensional,  $F \neq 1$ , com estes dados na tabela (6), vem que o coeficiente de potência é,  $CP = 0,393166$ .

Tem-se do APÊNDICE (A), equação (26) que:

$$C_p = \frac{P_{ex}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_{\infty}^3} \quad (26)$$

Supondo temperatura de 20°C, a massa específica do ar, será:

$$\rho = 1,2 \text{ Kg/m}^3$$

Substituindo estes valores, na equação (26), vem que o valor do raio será;  $R = 2,05 \text{ m}$

Dividindo-se a pá em 10 seções e com  $\lambda = 9,0$  calcula-se a razão de velocidades local,  $x$  e o raio  $r$ , para cada seção, através da equação (4-10).

$$x = \frac{r}{R} \cdot \lambda \quad (4-10)$$

Com  $\lambda = 9,0$  e com o valor de  $x$ , para cada seção, do modelo de GLAUERT, vem os valores do produto solidez  $x$  coeficiente de sustentação  $\sigma C_L$ .

$x$	$\sigma C_L/4$	$r$ (m)
0,9	0,15203076	0,205
1,8	0,05660202	0,410
2,7	0,02782909	0,625
3,6	0,01626951	0,820
4,59	0,01020831	1,046
5,4	0,00744177	1,230
6,3	0,00550163	1,435
7,2	0,00422938	1,640
8,1	0,00335113	1,845
9,0	0,00271988	2,05

#### Obtenção dos parâmetros adimensionais

Pelas equações abaixo, determinam-se todos os parâmetros:

$$\cos \phi = \frac{4 - \sigma C_L}{4} \quad (5-15)$$

$$\sin \phi = \frac{(8 - \sigma C_L)^{1/2} \cdot (\sigma C_L)^{1/2}}{4} \quad (5-16)$$

$$x^+ = \frac{\sigma C_L}{4} \cdot \frac{1}{\sin \phi \cdot \operatorname{tg} \phi} \cdot (1 + KT \cdot F \cdot \operatorname{tg} \phi) \quad (5-11)$$

onde:  $KT = 1/\bar{R}$

$$F = \frac{2}{\pi} \cdot \cos^{-1} (e^{-f})$$

$$f = \frac{B}{2} \cdot \left( \frac{1 - r/R}{\text{sen } \phi} \right)$$

B = número de pás = 2

$$a^+ = \frac{x^+}{1 + x^+} \tag{5-4}$$

$$Y^+ = \frac{\sigma^C_L}{4} \cdot \frac{1}{\cos \phi} \cdot \left( 1 - KT \cdot \frac{F}{\text{tg } \phi} \right) \tag{5-12}$$

$$a'^+ = \frac{Y^+}{1 - Y^+} \tag{5-7}$$

$$\phi = \text{tg}^{-1} \left( \frac{a'^+}{a} \cdot x \right) \tag{5-17}$$

r/R	x	cos φ	sen φ	F	x <sup>+</sup>	a <sup>+</sup>	Y <sup>+</sup>	a' <sup>+</sup>	φ°
0,1	0,9	0,84797	0,53004	0,8828	0,4673	0,31848	0,17085	0,20605	30,2
0,2	1,8	0,94339	0,33166	0,94287	0,4908	0,32922	0,05463	0,05778	17,5
0,3	2,7	0,97217	0,23427	0,96791	0,49679	0,33190	0,02479	0,02542	11,7
0,4	3,6	0,98373	0,17965	0,97743	0,49885	0,33282	0,013588	0,01377	8,47
0,51	4,59	0,98979	0,14253	0,97956	0,49969	0,33319	0,007975	0,00804	6,32
0,6	5,4	0,99256	0,12177	0,97616	0,50012	0,33338	0,00549	0,00552	5,11
0,7	6,3	0,99449	0,10417	0,96367	0,50027	0,33345	0,00384	0,00386	4,17
0,8	7,2	0,99577	0,89188	0,92765	0,50029	0,33346	0,00282	0,00283	3,50
0,9	8,1	0,99665	0,08179	0,80972	0,50037	0,33349	0,00225	0,00226	3,14
1,0	9,0	0,99728	0,0737	0,6612	0,5001	0,3333	0,0019	0,0019	2,79

Para cálculo do coeficiente de potência, usa-se a equação (5-18)

$$Cp = 8 \cdot \lambda^2 \cdot \int_0^1 a'^+ \cdot (1 - a^+) \cdot F \cdot \left( \frac{r}{R} \right)^3 \cdot d\left( \frac{r}{R} \right) \tag{5-18}$$

cujo resultado é:  $C_p = 0,3826$

Para o cálculo dos demais parâmetros, escolhe-se um perfil NACA para cada seção, e através deste perfil, arbitra-se um valor para  $C_L$  de modo que  $\bar{R} = C_L/C_D = 30$  e determina-se o valor do ângulo de ataque,  $\alpha$  para cada seção.

O ângulo construtivo,  $\theta$ , para cada seção, será dado por:

$$\theta = \phi - \alpha \quad (4-21)$$

A corda  $c$ , para cada seção é:

$$c = \frac{-\sigma C_L}{4} \cdot \frac{8 \cdot \pi \cdot r}{B \cdot C_L} \quad (m) \quad (4-15)$$

Para este exemplo, usaremos um perfil NACA 4418, em todas as seções, cuja equação para  $C_L$  em função de  $\alpha$ , [20] é:

$$C_L = 0,374086 + 9,66464 \cdot 10^{-2} \cdot \alpha \quad 0^\circ \leq \alpha \leq 10^\circ$$

x	$\phi$ rel. relativo	$C_L$	$\alpha$	$\theta$ constr.	c(m)
0,9	30,2	1,199	8,53	21,67	0,327
1,8	17,5	1,190	8,44	9,06	0,245
2,7	11,7	1,147	7,99	3,71	0,188
3,6	8,47	1,051	7,00	1,47	0,159
4,59	6,32	0,875	5,18	1,14	0,153
5,4	5,11	0,773	4,12	0,99	0,149
6,3	4,17	0,733	3,71	0,46	0,135
7,2	3,50	0,692	3,29	0,21	0,126
8,1	3,14	0,671	3,07	0,07	0,116
9,0	2,79	0,643	2,79	0	0,109

e ponto de estal de 12º

25 08 / 19 88  
PPG  
Donação

533.6.001.63:621.547(043.2)  
A627m TOMBO: 529

EFEI / Biblioteca Mauá  
Antunes, Júlio Santana  
Métodos adimensionais para projeto aerodinâmico das pás de turbina eólica de eixo horizontal e cálculo ...

N.º Registro

Devolver e

*diolberto 04/02/89*

EFEI

BIBLIOTECA MAUÁ

Esta publicação deverá ser devolvida dentro do prazo estipulado.

O leitor é responsável pela publicação em seu poder.

EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ  
8200529



NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA