SERGIO LEAL BRAGA

ANÁLISE EXPERIMENTAL E SIMULAÇÃO DE
DESEMPENHO DE ROTORES EÓLICOS DO TIPO
DARRIEUS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Departamento de Engenharia Mecânica

Rio de Janeiro, Junho de 1981

SERGIO LEAL BRAGA

ANÁLISE EXPERIMENTAL E SIMULAÇÃO DE
DESEMPENHO DE ROTORES EÓLICOS DO TIPO
DARRIEUS

Dissertação apresentada ao departamento
to de Engenharia Mecânica da PUC/RJ
como parte dos requisitos para obten-
ção do título de Mestre em Ciências
em Engenharia Mecânica.

Orientadores:

Prof. Francisco E. M. Saboya

Prof. Alcir de Faro Orlando

Departamento de Engenharia Mecânica
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro, junho de 1981.

A meus pais,

Elson e Clarice e

a Christiane.

AGRADECIMENTOS

Aos Professores Francisco Eduardo Mourão Saboya e Alcir de Faro Orlando pela eficiente orientação e apoio neste trabalho.

Aos amigos Paulo Cesar, Cynthia, Carlos Alberto e Anna Christina pela execução dos desenhos.

Aos técnicos Jandir, Lourenço e Celso pela dedicação e auxílio durante as experiências.

Aos colegas Geraldo, Luis Fernando, Angela e demais companheiros pelo incentivo durante este trabalho.

A Eletrobras e Consulpuc pelo fornecimento de dados do levantamento eólico realizado pela última.

A Eni pelos serviços de datilografia.

A CAPES e PUC/RJ pelo apoio financeiro.

RESUMO

A presente pesquisa trata da determinação experimental das eficiências e da simulação de desempenho de turbinas eólicas de eixo vertical do tipo Darrieus. Os testes foram efetuados usando-se modelos reduzidos num tunel de vento.

Um novo método para a obtenção da potência da turbina foi desenvolvido. O método clássico requeria grandes modelos e um grande tunel de vento para facilitar a medida do torque.

Uma vez que as curvas características dos modelos reduzidos foram determinadas, numa forma adimensional, uma simulação de desempenho de turbinas em tamanho real foi desenvolvida. Tal simulação envolveu duas regiões brasileiras (Fortaleza e Fernando de Noronha) e o conhecimento da distribuição de ventos horária.

ABSTRACT

The present research is concerned with the experimental determination of the efficiencies and performance simulation of Darrieus vertical-axis wind turbines. The tests were performed using reduced models in a wind tunnel.

A new method for obtaining the turbine power was developed. The classical approach would require large models and a huge wind tunnel to facilitate the torque measurement.

Once the characteristic curves of the reduced models were determined, in a dimensionless form, a performance simulation of real size turbines was developed. Such a simulation involved two Brazilian regions (Fortaleza and Fernando Noronha) and the knowledge of the hourly wind distribution.

SUMÁRIO

	pág.
Lista de Figuras	vi
Nomenclatura	viii
CAPÍTULOS	
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - CONSTRUÇÃO DOS MODELOS	9
3 - APARELHAGEM E MÉTODO EXPERIMENTAL	19
3.1 - Túnel de Vento	19
3.2 - Determinação da Velocidade do Ar	22
3.3 - Determinação do Torque Líquido	23
3.4 - Determinação da Rotação	26
4 - REDUÇÃO DE DADOS	30
4.1 - Introdução	30
4.2 - Determinação da Velocidade do Escoamento no Túnel de Vento	32
4.3 - Determinação do Coeficiente de Potência Líqui- da como Função da Razão de Velocidades	36
4.4 - Determinação do Coeficiente de Potência Dissi- pada como Função da Razão de Velocidades	41
4.5 - Determinação do Coeficiente de Potência Total como Função da Razão de Velocidades	43
5 - RESULTADOS E COMENTÁRIOS	44
6 - SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO DO ROTOR EÓLICO	73
7 - CONCLUSÕES	85

APÊNDICES

1 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	89
2 - DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DO AR	97
3 - AJUSTE DOS DADOS EXPERIMENTAIS PARA CÁLCULO DA POTÊNCIA DO CATAVENTO	99
4 - DETERMINAÇÃO DA FUNÇÃO COEFICIENTE DE POTÊN CIA LÍQUIDA	104
5 - CÁLCULO DO MOMENTO DE INÉRCIA DO SISTEMA GI RANTE SEM CATAVENTO	116
6 - DETERMINAÇÃO DA FUNÇÃO COEFICIENTE DE POTÊN CIA DISSIPADA	122
7 - PROGRAMA TÍPICO DAS SIMULAÇÕES	129
8 - ANÁLISE DE INCERTEZA	138
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	141

LISTA DE FIGURAS

	pág.
1.1 - Rotor Darrieus instalado no túnel de vento	2
1.2 - Rotor Darrieus em funcionamento	3
2.1 - Seção do perfil NACA 0012	10
2.2 - Geometria do perfil	12
2.3 - Anel de alumínio utilizado na confecção dos per- fis NACA 0012	16
2.4 - Bases de fixação das lâminas	17
2.5 - Detalhes de fixação dos perfis	18
3.1 - Túnel de vento	20
3.2 - Seção de testes	21
3.3 - Sistema de freio e disco do frequencímetro acopla- dos ao eixo do rotor	24
3.4 - Forças atuantes no bloco sobre a balança	25
3.5 - sistema utilizado na determinação da rotação do catavento.....	27
4.1 - Posições ocupadas pelo tubo de Pitot	33
5.1 - Coeficiente de Potência Líquida $N=2, \sigma = 0.167$	54
5.2 - Coeficiente de Potência Líquida $N=2, \sigma = 0.20$	55
5.3 - Coeficiente de Potência Líquida $N=2, \sigma = 0.25$	56
5.4 - Coeficiente de Potência Líquida $N=2, \sigma = 0.30$	57
5.5 - Coeficiente de Potência Líquida $N=3, \sigma = 0.25$	58
5.6 - Coeficiente de Potência Líquida $N=3, \sigma = 0.30$	59
5.7 - Coeficientes de Potência Líquida, Dissipada e To- tal $N=2, \sigma = 0.167$	60
5.8 - Coeficientes de Potência Líquida, Dissipada e To- tal $N=2, \sigma = 0.20$	61

5.9 - Coeficientes de Potência Líquida, Dissipada e To- tal $N=2$, $\sigma = 0.25$	62
5.10- Coeficientes de Potência Líquida, Dissipada e To- tal $N=2$, $\sigma = 0.30$	63
5.11- Coeficientes de Potência Líquida, Dissipada e To- tal $N=3$, $\sigma = 0.25$	64
5.12- Coeficientes de Potência Líquida, Dissipada e To- tal $N=3$, $\sigma = 0.30$	65
5.13- Coeficiente de Potência $N = 2$, $\sigma = 0.167$	66
5.14- Coeficiente de Potência $N = 2$, $\sigma = 0.20$	67
5.15- Coeficiente de Potência $N = 2$, $\sigma = 0.25$	68
5.16- Coeficiente de Potência $N = 2$, $\sigma = 0.30$	69
5.17- Coeficiente de Potência $N = 3$, $\sigma = 0.25$	70
5.18- Coeficiente de Potência $N = 3$, $\sigma = 0.30$	71
5.19- Coeficiente de Potência $N = 2$	72
A1 - Forças Aerodinâmicas no perfil do rotor	90
A2 - Variação do ângulo de ataque com a posição angu- lar do perfil	93
A3 - Velocidade relativa do ar como função da posição angular do perfil	96
A4 - Disco do frequencímetro	117
A5 - Tambor de freio	117

NOMENCLATURA

A	= área varrida pelo rotor
b	= braço do freio de Prony
C	= área da seção do tunel de vento
c	= corda do perfil
C_D	= coeficiente de arraste
CP	= coeficiente de potência, $P/(0.5 \rho A V_\infty^3)$
$\overline{CP}$	= coeficiente de potência médio
CPD	= coeficiente de potência dissipada
CPL	= coeficiente de potência líquida
E_u	= energia útil aproveitada anualmente
E_v	= energia anual do vento
F	= força aerodinâmica
F_D	= força de arraste
F_L	= força de sustentação
I	= momento de inercia do catavento
I_D	= momento de inercia do sistema girante sem o rotor
K_P	= fator de projeto, V_p / V
L	= comprimento do perfil
L_B	= leitura da balança
L/D	= razão entre as forças de sustentação e arraste
N	= número de pás do rotor
n	= rotação do rotor em RPM
n_D	= rotação do sistema girante sem o rotor em RPM
P	= potência absorvida pelo rotor do vento
P_D	= potência dissipada por atrito
P_L	= potência líquida, $P - P_D$
$\overline{P}$	= potência média
P_b	= peso colocado sobre a balança

P_o = pressão de estagnação
 P_1 = pressão estática
 R = máximo raio do rotor
 R' = raio assumido pelo perfil na parte central do rotor
 Re_c = número de Reynolds, $\rho R \omega c / \mu$
 T = tensão no fio do torquímetro, $P_b - L_B$
 t = tempo
 V_∞ = velocidade do escoamento
 $\bar{V}$ = velocidade média do ar
 V_P = velocidade de projeto, $(\sum_{i=1}^n V_i^3) / n$
 W = velocidade relativa do vento
 x, y = coordenadas cartesianas

Letras Gregas

α = ângulo de ataque
 ϵ_T = fator de bloqueio total, $\epsilon_A + \epsilon_S$
 ϵ_A = fator de bloqueio de área
 ϵ_S = fator de bloqueio sólido
 θ = posição angular do perfil
 ξ = razão de velocidades, $R\omega/V_\infty$
 ρ = densidade do ar
 τ_L = torque líquido, P_L/ω
 τ_D = torque dissipado, P_D/ω
 ΔP = diferença de pressão, $P_o - P_1$
 σ = solidez, NcL/A
 ω = velocidade angular do rotor em rd/seg
 ω_D = velocidade angular do sistema girante sem o rotor em
 rd/seg

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Devido à crescente necessidade de energia renovável, o homem vem pesquisando e desenvolvendo novas fontes e aprimorando, ou até mesmo redescobrindo, outras esquecidas ao longo dos anos. Neste caso se enquadra a energia eólica, uma forma praticamente abandonada há muito, que volta agora a ser considerada com maior intensidade visto que é uma fonte inesgotável de energia. Ressurgem então os moinhos de vento, basicamente divididos em duas classes: a de eixo vertical e a de eixo horizontal.

Os cataventos de eixo vertical, como também são chamados os moinhos de vento que possuem o eixo de rotação nessa posição, mais difundidos atualmente, são o Savonius e o Darrieus (figuras 1.1 e 1.2). O primeiro, proposto por S.J. Savonius [1]^{*} por volta de 1930, funciona basicamente movido pela força de arraste e foi baseado no rotor de Flettner [2].

Inventada por G.J.M. Darrieus [3], a turbina eólica Darrieus teve sua patente aplicada na França em 1925 como uma "TURBINA COM EIXO DE ROTAÇÃO TRANSVERSAL AO FLUXO DE CORRENTE". Seu funcionamento, baseado na força da sustentação de um aerofólio, permite que se obtenha uma rotação mais elevada neste modelo quando comparado ao rotor Savonius. Como vantagens adicionais, podem ser citadas ainda seu menor peso e sua maior eficiência, que permitem a construção de modelos maiores, geradores de potências mais elevadas.

*Números entre colchetes representam referências no final da tese

Figura 1.1 - Rotor Darrieus instalado no Túnel de Vento

Figura 1.2 - Rotor Darrieus em Funcionamento

Por todos os fatores acima mencionados, pode-se garantir a viabilidade de geração elétrica a partir da turbina Darrieus. Atualmente, esta forma de energia já é economicamente utilizada, principalmente a partir da convencional turbina eólica de eixo horizontal. As turbinas de eixo vertical oferecem, porém, algumas vantagens sobre as de eixo horizontal:

- Podem receber vento de qualquer direção, dispensando o leme direcionador;
- O gerador pode ser localizado próximo ao solo, sem necessidade das dispendiosas engrenagens cônicas, facilitando sua construção e manutenção;
- Sua torre é menor e mais simples;
- Custo inicial mais baixo devido à simplicidade da torre e também ao custo inferior das lâminas.

Apesar de conhecida há muito, a turbina Darrieus resurgiu em meados dos anos 60 com South e Rangi [4] da NAE/NRC. O grande interesse atual nesta turbina pode ser comprovado ao se verificar o grande número de organizações em todo o mundo a desenvolvê-la. Algumas destas são abaixo apresentadas:

National Research Council, Canada

NASA Langley Research Center, USA

Sandia Laboratories, USA

Texas Tech. University, USA

Research and Design Institute, USA

National Aeronautical Laboratory, India

Fokker - VFW, Holanda

Vetter Inc., USA

Dominion Aluminum Fabrications, Canada

Michigan State University, USA

Bristol Aerospace, Canada

Margison Associates, Canada

University College, Irlanda

Technical University of Denmark, Dinamarca

Apenas com duas exceções, todos os protótipos desenvolvidos por estas entidades situam-se entre 2 e 5m de diâmetro. A Sandia desenvolveu uma turbina para 60 KW com 17m de diâmetro e a Dominion Aluminum Fabricating Limited uma outra com 37m de diâmetro para 200 KW.

Como pode ser visto, os testes com estas turbinas só podem ser desenvolvidos ao ar livre ou em túneis de vento de grandes dimensões. A exemplo pode ser citada a turbina Darrieus com 5m de diâmetro testada ao ar livre por Sheldahl e Blackwell [5] ou em túneis de vento como fizeram Muraca e Guillotte [6] ou South e Rangi [7], ambos com rotores de 14 pés. Blackwell, Sheldahl e Feltz [8] utilizaram um túnel de seção 4,6 x 6,1 m² para testar rotores com 2m de diâmetro.

Um dos objetivos deste trabalho é encontrar uma metodologia adequada para testar modelos em escala reduzida. Nestes modelos torna-se praticamente inviável o levantamento do torque em toda a faixa de rotações (o rotor não estabiliza nas baixas rotações). Por isso, optou-se pelo método dinâmico para a determinação da potência no eixo, isto é:

$$P = I \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (1.1)$$

onde I é o momento de inércia das partes girantes e ω a velocidade angular instantânea.

Este processo permite o levantamento de uma função contínua para a potência, em toda a faixa de rotações. Para tal mede-se ω em função do tempo e, por meio de um método numérico, obtém-se a expressão analítica $\omega = \omega(t)$.

Um modo conveniente para caracterizar o desempenho aerodinâmico da turbina eólica é plotar o coeficiente de potência (CP) como função da razão de velocidades (ξ).

O coeficiente de potência é definido como a razão entre a potência extraída pelo rotor e a potência do vento numa seção transversal às linhas de corrente de área igual a área do rotor, isto é:

$$CP = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A V_{\infty}^3} \quad (1.2)$$

onde

P = potência gerada pelo rotor

ρ = densidade do ar

A = área varrida

V_{∞} = velocidade do ar

A razão de velocidades é dada pelo quociente entre a

velocidade do perfil no ponto de raio máximo e a velocidade do ar, ou seja:

$$\xi = \frac{\omega \cdot R}{V_{\infty}} \quad (1.3)$$

onde

ω = velocidade angular do rotor

R = máximo raio da turbina

Foram então estudados seis diferentes rotores com duas ou três lâminas designados pelo número destas e pela solidez dada pela expressão

$$\sigma = \frac{N \cdot c \cdot L}{A} \quad (1.4)$$

sendo

N = número de lâminas

c = corda do perfil

L = comprimento do perfil

É também abordado neste trabalho um ponto referente ao funcionamento de rotores do tipo Darrieus em aplicações práticas, ou seja, na geração de energia quando instalados ao ar livre. Para tal foram utilizados as curvas de potência obtidas e o levantamento eólico de regiões onde o vento foi medido hora a hora. É bom ressaltar que não se encontrou na bibliografia consultada dados concretos a este respeito. Pode ser visto também que maior importância é dada a máxima potência que se extrai instantaneamente, sendo esta condição difícil de se manter.

Em funcionamento normal deve-se voltar a atenção para rotores que produzam energia o mais economicamente possível. Nem sempre o rotor de maior eficiência instantânea será o mais indicado. Nem sempre manter o rotor no ponto de potência instantânea máxima é o mais econômico.

No Capítulo VI são apresentadas simulações de funcionamento de rotores a uma rotação constante. Com este princípio obtém-se instalações mais baratas devido à simplicidade de controle e construção. Ainda neste mesmo Capítulo são apresentadas as potências médias geradas anualmente e que servem de base para estudos econômicos detalhados afim de determinar o sistema mais viável.

Em resumo dois pontos devem ser ressaltados no presente trabalho:

- a) Desenvolvimento de um método experimental possibilitando testes com modelos reduzidos.
- b) Desenvolvimento de uma metodologia capaz de prever, a partir das curvas obtidas nos testes com os modelos reduzidos e do levantamento eólico da região, a energia anual produzida.

O princípio de funcionamento da turbina eólica Darrieus é apresentado no Apêndice 1.

CAPÍTULO II

CONSTRUÇÃO DOS MODELOS

A construção dos perfis foi, sem dúvida, a etapa que maior número de problemas apresentou.

A primeira decisão a ser tomada consistiu na escolha do tipo de perfil. Dentre os modelos normalmente usados, ou seja, NACA 0012, NACA 0015 ou NACA 0018, e de posse das curvas dos coeficientes de sustentação e arraste apresentadas por Abbott e Doenhoff [9] e por Fox e McDonald [10], optou-se pelo primeiro tipo de perfil acima apresentado. Esta escolha acarreta um rotor mais leve, mais eficaz e de custo mais baixo devido ao menor emprego de material. Faz-se porém necessário maior cuidado no que se refere à resistência mecânica.

Como mostrado na figura 2.1, o perfil NACA 0012 é simétrico em relação à sua linha de centro.

A tabela 2.1 apresentada a seguir relaciona os adimensionais x/c e y/c , onde x e y são respectivamente a abscissa e a ordenada da seção do aerofólio e c o comprimento de sua corda. Informações mais detalhadas sobre o perfil NACA 0012 podem ser encontradas na referência [9]

$\frac{x}{c} (\%)$	$\frac{y}{c} (\%)$
0	0
1.25	1.894
2.5	2.615
5.0	3.555
7.5	4.200
10	4.683
15	5.345
20	5.737
25	5.941
30	6.002
40	5.803
50	5.294
60	4.563
70	3.664
80	2.623
90	1.448
95	0.807
100	0.126

Tabela 2.1 - Abscissas e ordenadas do perfil NACA 0012 adimensionalizadas pela corda c
(O raio do bordo de ataque vale 1,58% da corda c)

FIGURA 2-1— SEÇÃO DO PERFIL NACA 0012
A LINHA DE CENTRO COINCIDE COM O EIXO DOS XX

O valor da corda do perfil (c) é determinado a partir da solidez desejada para o rotor (σ), dada pela equação (1.4)

A forma ideal seria aquela assumida por um cabo perfeitamente flexível e de densidade uniforme, quando girando em torno de um eixo vertical. Esta forma recebe o nome de TROPOSKIANA (do grego: cabo girando). Se as lâminas forem dobradas nesta forma, a rotação não causa flexão, ficando então o perfil sujeito a um estado de pura tensão. Para os modelos a serem testados optou-se por uma aproximação econômica desta forma ideal. Os perfis NACA 0012 assumiriam então o formato linha reta-arco circular, apresentado na figura 2.2.

Visando a utilização do sistema de eixos já existente no tunel de vento, foi construído inicialmente um modelo experimental, feito à mão, com 300 mm de altura ($Z_m = 150$ mm). Devido às imprecisões do processo já se previa um fraco desempenho para este rotor. O sistema era constituído por dois semi-eixos, um deles fixo atravessando a parede superior do túnel, para que na ponta externa fosse instalada a aparelhagem de medições constituída por um torquímetro e um frequencímetro. O segundo semi-eixo encontrava-se afixado a uma base retrátil que ao ser recolhida possibilitava a instalação do rotor. Tal conjunto porém apresentou problemas pois, devido à força centrípeta, o diâmetro do catavento aumentava acarretando um decréscimo na altura o que ocasionava o desprendimento deste. Para evitar este problema foi instalado um eixo fixo entre as bases do rotor garantindo-se assim uma altura invariável.

$$A = 2.5944 Z_m^2$$

$$R_m = 0.9798 Z_m$$

$$R' = 0.6733 Z_m$$

$$Z_j = 0.5654 Z_m$$

$$R_j = 0.6721 Z_m$$

$$L = 2.9431 Z_m$$

FIGURA 2.2 — GEOMETRIA DO PERFIL

(LINHA RETA — ARCO CIRCULAR, APROXIMAÇÃO DA TROPOSKIANA)

Uma vez sanado o problema constatou-se que as dimensões usadas eram suficientemente pequenas para que o bloqueio na seção de testes fosse desprezado (a área varrida pelo rotor correspondia aproximadamente a 5% da área da seção de testes); entretanto, como sua rotação era bastante elevada, o torque produzido era muito baixo e boa parte deste dissipada nos rolamentos (dois em cada semi-eixo).

Verificada então a impossibilidade de bons resultados com o sistema já existente foi feita uma reformulação geral da experiência.

Apesar da turbina Darrieus ser conhecida como turbina de eixo vertical, optou-se pela instalação de um eixo horizontal perpendicular ao fluxo de ar e atravessando uma das paredes laterais do tunel. Os rotores instalados ao ar livre devem ter eixo vertical para garantir a ortogonalidade entre o eixo e a direção do vento, qualquer que seja esta. Como no túnel não existe variação da direção do vento, tal ortogonalidade está garantida e como vantagens podem-se citar:

- com a substituição dos dois semi-eixos por um único eixo são necessários dois rolamentos e não quatro como no sistema antigo.
- sendo o eixo horizontal, os rolamentos utilizados são radiais, conseqüentemente reduziu-se em muito a potência dissipada.
- todo o sistema de medidas instalado anteriormente na parte superior do túnel passou para a lateral, facilitando assim o acesso e controle destes.

A escolha dos rolamentos definitivos foi possível a p^os testes com vários modelos. Optou-se por rolamentos auto-com pensadores de esferas, devido ao grande comprimento do eixo fato que facilita sua flexão, e também principalmente devido ã dificulda de de alinhamento das caixas de rolamentos por serem as paredes do tunel pouco rígidas.

A fim de facilitar a montagem do eixo, utilizou-se a base retrátil do sistema anterior, estando esta agora fixa numa das paredes laterais do túnel e não na inferior, como antes.

Visando a um maior torque do que o obtido no primeiro modelo, um novo rotor foi dimensionado com o dobro da altura i nicial, ou seja, 600 mm ($Z_m = 300$ mm). Devido ao aumento do ro tor, tem-se maior potência e menor rotação, o que acarreta um au mento substancial do torque, tornando mais precisa sua medida.

O bloqueio na seção de testes não pode agora ser des prezado e encontra-se na redução dos dados (capítulo IV).

Uma vez determinados a área (A) e o comprimento da p^a (L), fixos para todos os rotores (Ver figura 2.2), foram constru dos os perfis com diferentes valores para a corda (c), valores estes determinados a partir da solidez vista na equação (1.4) co mo:

$$\sigma = \frac{N c L}{A}$$

Para os rotores com duas p^{as} (N=2) foram escolhidos quatro valores para a solidez (σ). Estes são apresentados abai

xo seguidos do valor encontrado para a corda correspondente.

$$\sigma_1 = 0.30$$

$$c_1 = 39.67 \text{ mm}$$

$$\sigma_2 = 0.25$$

$$c_2 = 33.06 \text{ mm}$$

$$\sigma_3 = 0.20$$

$$c_3 = 26.45 \text{ mm}$$

$$\sigma_4 = 0.167$$

$$c_4 = 22.04 \text{ mm}$$

Os valores escolhidos para os rotores com três pás (N=3) são dados a seguir:

$$\sigma_5 = 0.30$$

$$c_5 = 26.45 \text{ mm}$$

$$\sigma_6 = 0.25$$

$$c_6 = 22.04 \text{ mm}$$

Os valores mostrados acima foram escolhidos de modo tal que, para a construção dos seis rotores, foram necessários só quatro tipos de perfil. Como pode ser visto

$$c_5 = c_3$$

e

$$c_6 = c_4$$

A tabela 2.1 fôï rigorosamente observada na construção dos aerofólios. O processo manual anteriormente usado foi definitivamente abandonado, visto que este era responsável por seções desiguais, mal acabamento da superfície, desbalanceamento, etc. Tal metodologia foi então substituída por outra também artesanal, porém de precisão, uma vez que o perfil passou a ser produzido em torno mecânico de precisão. Este novo processo é descrito a seguir.

Um anel de alumínio como o da figura 2.3 é preso ao torno de modo que seu eixo de simetria passe pelo centro da placa. É então feita a usinagem externa e interna com avanços e passos calculados ponto a ponto, de modo que, terminada a usinagem, obtém-se um perfil NACA 0012 (ver detalhe da figura 2.3), em forma de anel, para ser então moldado na forma adequada para as pás do rotor (figura 2.2).

FIGURA 2-3-- ANEL DE ALUMÍNIO UTILIZADO NA CONFEÇÃO DOS PERFIS NACA 0012

Com a finalidade de prender os perfis, já curvados na forma escolhida, ao eixo, foram feitas bases de dois tipos. A figura 2.4a mostra a base construída para rotores de duas pás, enquanto a figura 2.4b a base para rotores de três pás.

Na figura 2.5 pode ser vista a fixação dos perfis às bases feita através de parafusos do tipo Allen 3/16" x 3/4" com arruelas e calços para garantir a ortogonalidade entre a linha de centro do perfil e o eixo do rotor.

(a)

(b)

Figura 2.4 - Bases de Fixação das Lâminas

Figura 2.5 - Detalhes de Fixação dos Dentes

CAPÍTULO III

APARELHAGEM E MÉTODO EXPERIMENTAL

3.1 - Túnel de Vento

Afim de manter estáveis as condições de vento exigidas durante os testes foi utilizado um túnel de vento de baixa velocidade, evitando-se assim os problemas que surgiriam devido a natureza aleatória dos ventos em testes ao ar livre.

O túnel mostrado na figura 3.1 possui uma seção quadrada de 1m x 1m e 6m de comprimento. O ventilador axial usado é da marca Marelli tipo V.A. 57/28/710/1 com motor de 5 HP.

Para uniformizar o perfil de velocidade pode-se ver na figura 3.1 a colméia existente na entrada do duto de dimensões 1m x 1m x 0.1m e a seguir, uma tela de arame.

A seção de testes encontra-se a 1m da saída do túnel, onde foi instalado o rotor e o sistema de medições do torque líquido e rotação do catavento em estudo. Ver figura 3.2.

O torque líquido, aqui mencionado, é o disponível no eixo do rotor, ou seja, o torque produzido pelo catavento menos o torque dissipado por atrito.

Pode ser visto ainda na figura 3.1 a seção onde foi instalado o sistema de medição da velocidade do ar posicionado a 1m da seção de testes.

FIGURA 3.1 — TUNEL DE VENTO

Figura 3.2 - Seção de Testes

3.2 - Determinação da velocidade do ar

A equação de Bernoulli que relaciona a velocidade do escoamento com pressão e densidade do ar é dada por

$$P_o = P_1 + \frac{1}{2} \rho V_\infty^2 \quad (3.1)$$

onde

P_o = pressão de estagnação

P_1 = pressão estática

ρ = densidade do ar

V_∞ = velocidade do ar

ou

$$P_o - P_1 = \frac{1}{2} \rho V_\infty^2 \quad (3.2)$$

Com a finalidade de se determinar a diferença $\Delta P = P_o - P_1$, utilizou-se um tubo de Pitot acoplado a um manômetro diferencial inclinado, por permitir este uma maior precisão de leitura.

O manômetro utilizado foi da marca Dwyer com escala de 0 a 14 mm.c.a. com precisão de 0.2 mm.c.a.

Desta forma tem-se

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho V_\infty^2 \quad (3.3)$$

O tubo de Pitot utilizado era da marca Dwyer nº 304.

3.3 - Determinação do Torque Líquido

Com a finalidade de medir o torque líquido (τ_L) produzido no eixo do rotor, ou seja, o torque total menos o torque dissipado por atrito, foi construído um freio do tipo Prony, ilustrado na figura 3.3.

Constituído basicamente por um tambor girante fixo ao eixo (figura 3.3a) e um conjunto móvel de sapatas (figura 3.3b), este sistema transmite o torque do eixo ao conjunto de sapatas, torque este equilibrado por outro de mesma intensidade, porém de sentido inverso, provocado pela tensão (T) do fio preso ao braço do sistema. Ou seja :

$$\vec{\tau}_L = -\vec{T} \times \vec{b} \quad (3.4)$$

ou, simplesmente em módulo;

$$\tau_L = T \times b \quad (3.5)$$

onde b é a distância do ponto de aplicação da tensão (T) ao centro do sistema.

A equação (3.5) fornece o valor do torque para uma rotação constante. Trata-se pois de uma medida estacionária, isto é, o catavento não está sendo acelerado.

A determinação do módulo da tensão faz-se através do sistema peso-balança mostrado na figura 3.2. Um bloco de peso previamente conhecido é colocado sobre a balança e ligado por um fio inextensível ao braço do freio de Prony. Quando acionado o

Figura 3.3 - Sistema de Freio e Disco do Frequencímetro
acoplados ao Eixo do Rotor

freio, este, através do braço, transmite, pelo fio, uma força ao bloco, aliviando-se assim a balança.

O conjunto de forças atuantes no bloco é mostrado na figura 3.4.

FIGURA 3-4 - FORÇAS ATUANTES NO BLOCO SOBRE A BALANÇA

Sabendo-se que a normal (N) tem módulo idêntico à força feita pelo bloco sobre a balança (ação e reação) e sendo este o valor nela indicado, obtêm-se diretamente da leitura desta o valor da normal. Consequentemente, pela expressão abaixo, encontra-se o valor da tensão, pois

$$T = P_b - N \quad (3.6)$$

A balança usada é da marca Sartorius com capacidade para 7 kg e precisão de décimo de grama.

3.4 - Determinação da Rotação

Para medir a rotação, foi construído o disco mostrado na figura 3.3, contendo 60 furos equidistantes do centro e entre si. O disco é fixo ao eixo do rotor e com este gira entre uma célula foto-elétrica e uma fonte luminosa como ilustrado na figura 3.5.

A cada volta do disco a célula é impressionada 60 vezes e o sinal por ela emitido, sob forma de pulsos, é filtrado por um circuito elétrico afim de transformá-lo numa "onda quadrada", eliminando-se assim os ruídos.

A contagem dos pulsos por unidade de tempo é feita por um frequencímetro digital da marca Tektronix modelo DC 503. A leitura fornecida pelo aparelho, usando um tempo de amostragem de 1 segundo, pode também representar diretamente a RPM do rotor, devido aos 60 pulsos por rotação. Deste modo a leitura já é a RPM do catavento, com precisão de 1 RPM.

A velocidade angular ω em radianos por segundo pode ser obtida através de

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (3.7)$$

onde n é a RPM.

Como a medida da potência no eixo através do torque e da rotação mostrou-se inviável neste caso (o rotor não estabiliza nas baixas rotações), foi desenvolvido um método dinâmico que acelera enormemente a aquisição de dados reduzindo substancial -

FIGURA 3.5 — SISTEMA UTILIZADO PARA DETERMINAÇÃO DA ROTAÇÃO DOS CATAVENTOS

mente o tempo de teste. É levado em consideração o comportamento dinâmico do catavento. Este método é a seguir descrito.

O frequencímetro fornece a rotação (ω) em intervalos de tempo constantes. Esta propriedade permite, partindo-se do repouso e desfreando o rotor, efetuar-se uma medida dinâmica da rotação como função do tempo

$$\omega = \omega(t)$$

O torque líquido no eixo do rotor (τ_L) é expresso por:

$$\tau_L = I \frac{d\omega}{dt} \quad (3.8)$$

onde I é o momento de inércia do conjunto girante e $d\omega/dt$ a aceleração angular instantânea, determinada a partir dos dados experimentais de ω .

Usando-se nesta equação o valor do torque determinado a partir da equação (3.5) obtém-se

$$\tau_L = T \times b = I \frac{d\omega}{dt} \quad (3.9)$$

ou

$$I = T \times b / \frac{d\omega}{dt} \quad (3.10)$$

Esta expressão permite a determinação experimental do momento de inércia (I), onde T e $d\omega/dt$ são determinados a uma mesma rotação.

O mesmo procedimento pode ser usado na determinação

do torque dissipado por atrito (τ_D), ou seja:

$$\tau_D = \left| I_D \frac{d\omega}{dt} \right| \quad (3.11)$$

Sendo I_D o momento de inércia das partes girantes sem o rotor e $d\omega/dt$ a aceleração do conjunto. Neste caso a função $\omega = \omega(t)$ pode ser obtida imprimindo-se uma rotação ao conjunto girante e a partir daí registrar o decaimento desta rotação. Neste caso $d\omega/dt$ é negativo.

CAPÍTULO IV

REDUÇÃO DE DADOS

4.1 - Introdução:

Como descrito no Capítulo I, um método conveniente para caracterizar o desempenho aerodinâmico de rotores eólicos, é feito através da curva do coeficiente de potência (CP) como função da razão de velocidades (ξ), onde

$$CP(\xi) = \frac{P}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_{\infty}^3} \quad (4.1)$$

e

$$\xi = \frac{\omega R}{V_{\infty}} \quad (4.2)$$

sendo

P - potência absorvida pelo rotor

ρ - densidade do ar

A - área do rotor

V_{∞} - velocidade do escoamento

ω - velocidade angular do rotor

R - raio máximo do rotor

A área (A) e o raio (R) são características geométricas do rotor, portanto já fixados. No presente caso

$$A = 0.2335 \text{ m}^2$$

$$R = 0.2939 \text{ m}$$

A determinação da densidade do ar (ρ) é feita a partir da equação dos gases perfeitos para as pressão e temperatura médias dos testes, visto que estes foram feitos em condições bastante semelhantes. Encontrou-se então

$$\rho = 1.12 \text{ kg/m}^3$$

A obtenção da velocidade angular instantânea (ω) é feita através da expressão

$$\omega = \frac{2\pi}{60} n \quad (4.3)$$

onde n é o valor da rotação em RPM lido diretamente no frequencímetro.

Nem toda potência absorvida do vento pelo catavento (P) pode ser aproveitada na geração de energia. Parte desta é dissipada por atrito. Desta forma tem-se

$$P = P_D + P_L \quad (4.4)$$

onde

P_D - potência dissipada

e

P_L - potência líquida

Como pode ser visto, a potência líquida é a disponível no eixo, ou seja, a potência absorvida pelo rotor menos a potência dissipada. Desta forma

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A V_{\infty}^3} = \frac{P_D}{\frac{1}{2} \rho A V_{\infty}^3} + \frac{P_L}{\frac{1}{2} \rho A V_{\infty}^3} \quad (4.5)$$

Definindo-se coeficiente de potência dissipada por

$$C_{PD} = \frac{P_D}{\frac{1}{2} \rho A V_{\infty}^3} \quad (4.6)$$

e coeficiente de potência líquida por

$$C_{PL} = \frac{P_L}{\frac{1}{2} \rho A V_{\infty}^3} \quad (4.7)$$

tem-se finalmente, para coeficiente de potência total,

$$C_P = C_{PD} + C_{PL} \quad (4.8)$$

A determinação da velocidade do escoamento, bem como dos coeficientes de potência líquida, dissipada e total encontra-se nos parágrafos subsequentes.

4.2 - Determinação da velocidade do escoamento de ar no túnel de Vento

Sendo possível a instalação do tubo de Pitot em qualquer ponto da seção de medida da velocidade do ar, foram escolhidos

dos os 81 pontos mostrados na figura 4.1 para a determinação da diferença de pressão (ΔP), usada na determinação da velocidade do escoamento.

Figura 4.1 - Posições ocupadas pelo tubo de Pitot (81 interseções)

$$\Delta P = P_o - P_1 \quad (4.9)$$

onde

P_o = pressão de estagnação

e

P_1 = pressão estática

Usando o manômetro diferencial descrito na seção 3.2, esta medida foi obtida em mm.c.a.

A partir da equação (3.3) dada por

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho V_{\infty n}^2$$

tem-se

$$V_{\infty n} = \left(\frac{2 K \Delta P}{\rho} \right)^{1/2} \quad (4.10)$$

onde a constante K, para ajuste de unidades, é dada por

$$K = 9.81 \text{ kg/(m.s}^2\text{.mm.c.a)} \quad (4.11)$$

O índice n na velocidade do ar indica que esta foi medida numa seção diferente daquela onde se encontra o rotor, devendo então ser corrigida para a seção de testes. Tal correção encontra-se mais adiante.

No Apêndice 2 encontram-se os valores encontrados para ΔP e $V_{\infty n}$ nos 81 pontos já referidos.

A partir destes pontos foi então determinada a velocidade média da seção medida.

$$\bar{V}_{\infty n} = 6.82 \text{ m/s}$$

Faz-se porém necessário corrigir este valor pois, quando um objeto é colocado num túnel de vento, produz neste um bloqueio responsável por um acréscimo na velocidade do ar, na seção de testes. Este acréscimo é calculado através da determinação

do fator de bloqueio do túnel (ϵ), também denominado "incremento da velocidade". O fator total (ϵ_T) é obtido como a soma do incremento da velocidade causada pelo bloqueio devido a área varrida (ϵ_A) e pelo bloqueio sólido (ϵ_S).

$$\epsilon_T = \epsilon_A + \epsilon_S \quad (4.12),$$

onde

$$\epsilon_A = \frac{A}{4C} C_{D_n} \quad (4.13) \text{ e}$$

$$\epsilon_S = \epsilon_S(\text{Perfis}) + \epsilon_S(\text{suporte}) \quad (4.14)$$

mas

$$\epsilon_S(\text{perfis}) \approx 0 \quad (4.15) \text{ e}$$

$$\epsilon_S(\text{suporte}) = \frac{\text{Área das partes fixas}}{4C} \quad (4.16)$$

sendo

A - área varrida

C - área da seção do túnel

C_{D_n} - coeficiente de arraste não corrigido.

As relações acima são encontradas em Blackwell, Sheldahl e Feltz [8] que também mostraram ser o coeficiente de arraste não corrigido pelo bloqueio (C_{D_n}), para a turbina eólica Darrieus, função da razão de velocidades, teoricamente tendendo para 1.0. Deste modo o valor 1.0 foi escolhido para todas as razões de velocidade, assumindo-se nesta aproximação uma posição

conservadora.

Usando-se as equações (4.13) e (4.16) encontrou-se para o fator de bloqueio de área.

$$\epsilon_A = 0.0584$$

e para o fator de bloqueio sólido

$$\epsilon_S = 0.0029$$

ficando então o fator de bloqueio total

$$\epsilon_T = 0.0613$$

Para corrigir então a velocidade não perturbada pelo rotor usa-se:

$$V_\infty = \bar{V}_{\infty n} (1 + \epsilon_T) \quad (4.17)$$

Donde

$$V_\infty = 7.24 \text{ m/s}$$

4.3 - Determinação do Coeficiente de Potência Líquida (CPL) como Função da Razão de Velocidades (ξ)

Estando desativado o sistema de freio, toda potência extraída pelo rotor, do vento, é utilizada na sua própria aceleração ou então dissipada por atrito. A parcela que impulsiona o

rotor é exatamente a potência líquida e pode ser expressa por

$$P_L = I \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (4.18)$$

onde I é o momento de inércia das partes girantes e ω sua velocidade angular.

Visando à determinação de uma relação entre a rotação da turbina e o tempo, utilizou-se o frequencímetro descrito na seção 3.4, capaz de fornecer leituras em intervalos idênticos de tempo. Não partindo do repouso o rotor foi inicialmente impulsionado até que seus aerofólios efetivamente o acelerassem.

Encontrada assim a relação

$$n = n(t) \quad (4.19)$$

são então convertidas as rotações (n) dadas em RPM para velocidade angular (ω) em rd/s pela equação (4.3)

$$\omega = \frac{2\pi}{60} n$$

É feito então um ajuste dos pontos experimentais (t_i tipicamente 100 pontos, Apêndice 4) através do método dos mínimos quadrados para ajuste de "spline". Basicamente são escolhidos vários intervalos para a variável independente (o tempo) e para cada um deles é então ajustado, pelo método dos mínimos quadrados, um polinômio do 3º grau do tipo:

$$\omega_k = A_k + B_k t + C_k t^2 + D_k t^3 \quad (4.20)$$

onde k representa o intervalo. Simulações numéricas determinaram para estes dados um valor ótimo de oito intervalos. Como restrição, nas junções dos intervalos, tem o mesmo valor (para os dois polinômios):

- a função
- 1ª derivada
- 2ª derivada.

Este método está descrito com mais detalhes no apêndice 3.

Desta forma obtêm-se

$$\omega = \omega(t) \quad (4.21)$$

Através do torquímetro descrito na seção 3.3 foi possível, agora numa rotação fixa (n_i), registrada no frequencímetro, a leitura da balança (L_{B_i}). Este procedimento foi repetido para "m" rotações diferentes possibilitando assim a determinação de "m" pares do tipo (L_{B_i}, n_i). Tipicamente $m = 10$.

A partir daí é feita então a determinação da velocidade angular e do torque líquido correspondentes à rotação n_i , dados por

$$\omega_i = \frac{2\pi}{60} n_i \quad (4.3)$$

e

$$\tau_{Li} = (P_b - L_{B_i}) \times b \quad (4.22)$$

onde P_b é o peso colocado sobre a balança e b o braço do freio de Prony. No caso $b = 0.10$ m.

De posse da função (4.21) e da velocidade angular ω_i é montada a equação

$$\omega(t) - \omega_i = 0 \quad (4.23)$$

que possui como solução um valor " t_i " tal que

$$\omega(t_i) = \omega_i \quad (4.24)$$

Com estes resultados obtêm-se o momento de inércia do sistema girante dado por:

$$I_i = \tau_{Li} / \left(\frac{d\omega}{dt} \right)_{t=t_i} \quad (4.25)$$

Optou-se pela determinação do momento de inércia experimental pois, devido às altas rotações atingidas pelo rotor este varia levemente sua forma, fato que acaba por variar de modo sensível o momento de inércia, visto que este é função do raio ao quadrado.

Repetindo-se o procedimento para os " m " pares de pontos (L_{B_i}, n_i) encontra-se o momento de inércia do sistema dado pela média:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^m I_i}{m} \quad (4.26)$$

Com este valor e a derivada da função (4.21) encontra-se a função torque líquido dada pela expressão

$$\tau_L(t) = I \frac{d\omega(t)}{dt} \quad (4.27)$$

A potência líquida dada pela equação (4.18) pode ser reescrita como

$$P_L(t) = I \cdot \omega(t) \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} = \tau_L(t) \cdot \omega(t)$$

e a seguir a função coeficiente de potência líquida

$$CPL(t) = \frac{P_L(t)}{\frac{1}{2} \rho A V_\infty^3} \quad (4.28)$$

A função razão de velocidades é dada por

$$\xi(t) = \frac{R}{V_\infty} \omega(t) \quad (4.29)$$

Para um mesmo instante obtém-se então um coeficiente de potência líquida e uma razão de velocidades correspondentes. Procedendo assim para os mesmos instantes usados na primeira relação, obtém-se uma nova relação que, ao ser ajustada pelo mesmo método de "spline" fornece

$$CPL = CPL(\xi) \quad (4.30)$$

como uma função ajustada por oito polinômios do 3º grau.

Para a determinação desta função foi utilizado o programa apresentado no apêndice 4.

4.4 - Determinação do Coeficiente de Potência Dissipada (CPD) como Função da Razão de Velocidades (ξ).

Assim como feito anteriormente foi determinada uma relação entre rotação e tempo,

$$n_D = n_D(t) \quad (4.31)$$

Neste caso, porém, o ventilador encontrava-se desligado e as medidas foram feitas a partir de um valor máximo. Como será visto a seguir, esta relação será usada na determinação do coeficiente de potência dissipada e, por causa disso, a turbina Darrieus foi subtraída do sistema girante pois, se nele estivesse provocaria um decaimento mais rápido da rotação, devido ao arraste nas lâminas e este fator é característica inerente ao desempenho do rotor (ver apêndice 1), não podendo pois, ser visto como fator dissipativo de potência.

A partir da relação (4.31) as rotações em RPM são convertidas para velocidade angular em rd/s por meio da equação (4.3). Tem-se então

$$\omega_D = \frac{2\pi}{60} n_D$$

Feito a seguir um ajuste pelo mesmo método de spline, encontra-se a função

$$\omega_D = \omega_D(t) \quad (4.32)$$

A partir desta pode-se determinar diretamente a função coeficiente de potência dissipada por

$$CPD(t) = \frac{I_D \cdot \omega_D(t) \cdot \frac{d\omega_D}{dt}(t)}{\frac{1}{2} \rho A V_\infty^3} \quad (4.33)$$

onde I_D é o momento de inércia das partes girantes. Não estando o rotor incluído, o momento de inércia utilizado foi determinado analiticamente, uma vez que não ocorrem deformações devido à rotação. Este cálculo encontra-se no apêndice 5.

A função razão de velocidades é igualmente determinada a partir da eq. 4.2.

$$\xi(t) = \frac{R}{V_\infty} \omega_D(t) \quad (4.34)$$

Fazendo uso dos mesmos instantes usados na função (4.31) é estabelecida uma relação entre CPD e ξ que ajustada pelo método de spline fornece

$$CPD = CPD(\xi) \quad (4.35)$$

O programa utilizado encontra-se no apêndice 6.

4.5 - Determinação do Coeficiente de Potência Total como Função da Razão de Velocidades

Como visto na introdução deste capítulo (Eq. 4.8)

$$CP = CPL + CPD$$

e como na determinação das funções $CPL(\xi)$ e $CPD(\xi)$ a variável ξ foi dividida nos mesmos intervalos, para adicionar as funções torna-se necessário simplesmente somar os polinômios dos intervalos correspondentes

Logo

$$CP(\xi) = CPL(\xi) + CPD(\xi)$$

Os polinômios são do tipo

$$CP = E(k,1) + E(k,2) \xi + E(k,3) \xi^2 + E(k,4) \xi^3$$

e k representa o intervalo ajustado. Varia pois de 1 até 8.

CAPÍTULO V

RESULTADOS E COMENTÁRIOS

Os desempenhos das seis diferentes configurações da turbina eólica Darrieus são avaliados para uma velocidade do ar constante no túnel de vento. A solidez do rotor, razão entre a área plana total dos perfis* e a área varrida pelo rotor, é a variável que deve ser trocada de uma configuração para outra. Esta troca de solidez é realizada pela alteração da corda do perfil (c) e/ou pelo número de perfis (N); a área varrida (A) e o comprimento do aerofólio NACA 0012 (L) são fixos para todas as configurações. Relembrando; a solidez é dada por

$$\sigma = \frac{N \cdot c \cdot L}{A}$$

Cada configuração foi testada em toda a faixa da razão de velocidades (ξ).

A forma escolhida para a apresentação do desempenho foi através das curvas do coeficiente de potência como função da razão de velocidades.

Vários gráficos são apresentados a seguir.

* Denomina-se por área plana o produto do número de pás pela corda do perfil e pelo comprimento deste (N.c.L)

As figuras 5.1 a 5.6 mostram o coeficiente de potência líquido para cada uma das seis configurações testadas. Os pontos marcados nestes gráficos representam os valores obtidos experimentalmente a partir do torquímetro e frequencímetro.

A seguir encontram-se as figuras 5.7 a 5.12 que apresentam, para cada rotor testado, o coeficiente de potência líquida, o coeficiente de potência dissipada e finalmente a soma destes, ou seja, o coeficiente de potência total, aqui designado simplesmente por coeficiente de potência.

Sendo os coeficientes de potência líquida e dissipada características da instalação usada, maior importância deve ser dada à soma destes, o coeficiente de potência, por ser uma curva geral. Deste modo encontram-se nas figuras 5.13 a 5.18 os coeficientes de potência para cada rotor isoladamente.

Como pode ser notado nas figuras 5.17 e 5.18, os resultados encontrados para os rotores de três lâminas foram bastante inferiores aos encontrados para os seus correspondentes (de mesma solidez) com duas lâminas. Este fato pode ser explicado pela interferência das pás pois, sendo o modelo reduzido, aparece como consequência uma rotação elevada e o maior número de pás, acaba por prejudicar o rendimento.

É bom ressaltar que o par de rotores com $\sigma = 0,20$, $N = 2$ e $\sigma = 0,30$, $N = 3$ bem como o par $\sigma = 0,167$, $N = 2$ e $\sigma = 0,25$, $N = 3$ foram feitos com as mesmas lâminas, isto é, ao se acrescentar mais uma lâmina aos primeiros rotores dos pares obtêm-se os segundos.

Pelos gráficos apresentados pode-se verificar que a introdução desta terceira lâmina, ao invés de melhorar o desempenho, como se esperava em ambos os casos, fez com que o rotor piorasse.

A figura 5.19 mostra os coeficientes de potência das quatro configurações de duas pás testadas. Os rotores de três lâminas foram excluídos devido aos resultados encontrados não serem compatíveis com os esperados em modelos maiores, visto que nestes certamente não ocorre interferência entre as pás.

Como pode ser visto o máximo coeficiente de potência (CP_{max}) encontrado foi aproximadamente 0.36. Isto leva a crer que o máximo coeficiente de potência para a turbina Darrieus é menor que o da turbina eólica de eixo horizontal de alta performance onde o CP_{max} encontra-se entre 0.40 e 0.45. Todavia, estudos teóricos feitos por Strickland [11] mostram que a turbina Darrieus possui $CP_{max} \approx 0.48$ para um número de Reynolds da ordem de 3×10^6 com solidez $\sigma = 0.30$. A partir destes dados pode-se, para um mesmo n° de Reynolds, esperar coeficientes de potência máximos comparáveis, uma vez que o aqui obtido foi para um número de Reynolds da ordem de 8×10^4 .

Uma das influências que se pode notar devido à variação da solidez é o fato da razão de velocidades correspondente ao coeficiente de potência nulo ($CP=0$) no fim da curva aumentar enquanto diminui a solidez. Para aplicações sincronizadas, isto implica que a potência pode ser produzida numa maior faixa de variação da velocidade do vento para uma dada velocidade angular da turbina. A razão de velocidades onde ocorre CP_{max} também au

menta com o decréscimo da solidez. Se o desejado é maximizar a potência extraída deve-se escolher cuidadosamente a solidez de acordo com a variação do vento local, velocidade angular, eficiência de transmissão, etc.

Finalmente encontram-se tabelados os coeficientes dos polinômios que ajustam o coeficiente de potência (CP) como função da razão de velocidades (ξ).

Os polinômios são da forma

$$CP = E(i,1) + E(i,2)\xi + E(i,3)\xi^2 + E(i,4)\xi^3$$

Sendo i o intervalo de divisão da variável . Os pontos que limitam estes intervalos são também apresentados.

Tabela 5.1 - Coeficientes dos polinômios $CP(\xi)$ e respectivos intervalos para o rotor com $N = 2$ e $\sigma = 0.167$

$E(1,1) = -0.2842116D+J1$	 $\xi = 0.0$
$E(1,2) = 0.2559E43D+J1$	
$E(1,3) = -0.7787E67D+0J$	
$E(1,4) = 0.8067E62D-J1$	 $\xi = 3.665$
$E(2,1) = 0.4823062D+J1$	
$E(2,2) = -0.3714497D+J1$	
$E(2,3) = 0.5330353D+0J$	
$E(2,4) = -0.7500361D-J1$	 $\xi = 4.242$
$E(3,1) = -0.5815739D+0J$	
$E(3,2) = 0.1079196D+0J$	
$E(3,3) = 0.3190389D-J1$	
$E(3,4) = -0.4189946D-J2$	 $\xi = 5.064$
$E(4,1) = 0.1146468D+J1$	
$E(4,2) = -0.5158235D+0J$	
$E(4,3) = 0.2340690D+J1$	
$E(4,4) = -0.1749756D-J1$	 $\xi = 5.735$
$E(5,1) = 0.6138225D+J1$	
$E(5,2) = -0.3527088D+J1$	
$E(5,3) = 0.6894313D+0J$	
$E(5,4) = -0.4396592D-J1$	 $\xi = 6.412$
$E(6,1) = -0.5829554D+J2$	
$E(6,2) = 0.2661733D+J2$	
$E(6,3) = -0.4011475D+J1$	
$E(6,4) = 0.2003961D+0J$	 $\xi = 6.822$
$E(7,1) = 0.5066357D+J2$	
$E(7,2) = -0.2130066D+J2$	
$E(7,3) = 0.3012975D+J1$	
$E(7,4) = -0.1428494D+0J$	 $\xi = 7.177$
$E(8,1) = -0.3365865D+J2$	
$E(8,2) = 0.1394425D+J2$	
$E(8,3) = -0.1897567D+J1$	
$E(8,4) = 0.8520651D-J1$	 $\xi = 7.578$

Tabela 5.2 - Coeficientes dos polinômios $CP(\xi)$ e respectivos intervalos para o rotor com $N = 2$ e $\sigma = 0.20$

$E(1,1) = -0.2999578D+01$	 $\xi = 0.0$
$E(1,2) = 0.2987102D+01$	
$E(1,3) = -0.1006875D+01$	
$E(1,4) = 0.1159459D+00$	
$E(2,1) = 0.1746568D+01$	 $\xi = 3.157$
$E(2,2) = -0.1524419D+01$	
$E(2,3) = 0.4223830D+00$	
$E(2,4) = -0.3498454D-01$	
$E(3,1) = 0.2224789D+01$	 $\xi = 3.658$
$E(3,2) = -0.1916236D+01$	
$E(3,3) = 0.5294803D+00$	
$E(3,4) = -0.4474237D-01$	
$E(4,1) = -0.3255269D+00$	 $\xi = 4.266$
$E(4,2) = -0.1227184D+00$	
$E(4,3) = 0.1090480D+00$	
$E(4,4) = -0.1189010D-01$	
$E(5,1) = 0.8560994D+00$	 $\xi = 5.067$
$E(5,2) = -0.8222931D+00$	
$E(5,3) = 0.2471176D+00$	
$E(5,4) = -0.2097204D-01$	
$E(6,1) = -0.1548553D+02$	 $\xi = 5.711$
$E(6,2) = 0.7761890D+01$	
$E(6,3) = -0.1255969D+01$	
$E(6,4) = 0.6675680D-01$	 $\xi = 6.322$
$E(7,1) = 0.2508353D+02$	
$E(7,2) = -0.1149059D+02$	
$E(7,3) = 0.1789520D+01$	
$E(7,4) = -0.9382873D-01$	 $\xi = 6.867$
$E(8,1) = -0.1286898D+03$	
$E(8,2) = 0.5568647D+02$	
$E(8,3) = -0.7992748D+01$	
$E(8,4) = 0.3809999D+00$	 $\xi = 7.296$

Tabela 5.3 - Coeficientes dos polinômios $CP(\xi)$ e respectivos intervalos para o rotor com $N = 2$ e $\sigma = 0.25$

$E(1,1) = 0.5850527D+0J$	 $\xi = 0.0$
$E(1,2) = -0.7325911D+0J$	
$E(1,3) = 0.2939635D+0J$	
$E(1,4) = -0.3618940D-0J$	 $\xi = 2.459$
$E(2,1) = -0.8093898D+0J$	
$E(2,2) = 0.9689380D+0J$	
$E(2,3) = -0.3981177D+0J$	
$E(2,4) = 0.5764308D-0J$	 $\xi = 2.975$
$E(3,1) = 0.2339568D+0J$	
$E(3,2) = -0.2206382D+0J$	
$E(3,3) = 0.6691836D+0J$	
$E(3,4) = -0.6193876D-0J$	 $\xi = 3.877$
$E(4,1) = 0.1142704D+0J$	
$E(4,2) = -0.4846539D+0J$	
$E(4,3) = 0.2251458D+0J$	
$E(4,4) = -0.2376596D-0J$	 $\xi = 4.890$
$E(5,1) = -0.6727587D+0J$	
$E(5,2) = 0.3713198D+0J$	
$E(5,3) = -0.6333912D+0J$	
$E(5,4) = 0.3476283D-0J$	 $\xi = 5.622$
$E(6,1) = -0.1393203D+0J$	
$E(6,2) = 0.8667794D+0J$	
$E(6,3) = -0.1271097D+0J$	
$E(6,4) = 0.4746062D-0J$	 $\xi = 6.322$
$E(7,1) = 0.2333043D+0J$	
$E(7,2) = -0.1086508D+0J$	
$E(7,3) = 0.1728559D+0J$	
$E(7,4) = -0.5309305D-0J$	 $\xi = 6.789$
$E(8,1) = -0.3814100D+0J$	
$E(8,2) = 0.1684804D+0J$	
$E(8,3) = -0.2480301D+0J$	
$E(8,4) = 0.1216940D+0J$	 $\xi = 6.924$

Tabela 5.4 - Coeficientes dos polinômios $CP(\xi)$ e respectivos intervalos para o rotor com $N = 2$ e $\sigma = 0.30$

$E(1,1) = 0.4926615D-01$	 $\xi = 0.0$
$E(1,2) = -0.3664986D-01$	
$E(1,3) = -0.7794310D-02$	
$E(1,4) = 0.8877704D-02$	
$E(2,1) = 0.6712990D-02$	 $\xi = 2.232$
$E(2,2) = 0.2055192D-01$	
$E(2,3) = -0.3342534D-01$	
$E(2,4) = 0.1270596D-01$	
$E(3,1) = 0.1252622D+01$	 $\xi = 2.904$
$E(3,2) = -0.1266724D+01$	
$E(3,3) = 0.4099139D+00$	
$E(3,4) = -0.3818551D-01$	
$E(4,1) = 0.2287347D+01$	 $\xi = 3.494$
$E(4,2) = -0.2155141D+01$	
$E(4,3) = 0.6641754D+00$	
$E(4,4) = -0.6244650D-01$	
$E(5,1) = -0.2023699D+01$	 $\xi = 4.158$
$E(5,2) = 0.9554781D+00$	
$E(5,3) = -0.8397290D-01$	
$E(5,4) = -0.2465754D-02$	
$E(6,1) = -0.2802705D+01$	 $\xi = 5.075$
$E(6,2) = 0.1416001D+01$	
$E(6,3) = -0.1747214D+00$	
$E(6,4) = 0.3495077D-02$	
$E(7,1) = -0.1181866D+03$	 $\xi = 5.844$
$E(7,2) = 0.6064396D+02$	
$E(7,3) = -0.1030886D+02$	
$E(7,4) = 0.5814928D+00$	
$E(8,1) = 0.5494472D+03$	 $\xi = 6.219$
$E(8,2) = -0.2614436D+03$	
$E(8,3) = 0.4148620D+02$	
$E(8,4) = -0.2194904D+01$	 $\xi = 6.540$

Tabela 5.5 - Coeficientes dos polinômios $CP(\xi)$ e respectivos intervalos para o rotor com $N = 3$ e $\sigma = 0.25$

$E(1,1) = -0.1582200D+J1$	 $\xi = 0.0$
$E(1,2) = 0.1535110D+J1$	
$E(1,3) = -0.5135494D+0J$	
$E(1,4) = 0.5974212D-J1$	 $\xi = 3.330$
$E(2,1) = 0.3458891D+J1$	
$E(2,2) = -0.3006849D+J1$	
$E(2,3) = 0.8505326D+0J$	
$E(2,4) = -0.7681567D-J1$	 $\xi = 3.755$
$E(3,1) = -0.3630267D+0J$	
$E(3,2) = 0.4658797D-J1$	
$E(3,3) = 0.3737399D-J1$	
$E(3,4) = -0.4631790D-J2$	 $\xi = 4.274$
$E(4,1) = 0.1370956D+J1$	
$E(4,2) = -0.1170657D+J1$	
$E(4,3) = 0.3222065D+0J$	
$E(4,4) = -0.2684851D-J1$	 $\xi = 4.876$
$E(5,1) = 0.2452412D+J1$	
$E(5,2) = -0.1836116D+J1$	
$E(5,3) = 0.4587006D+0J$	
$E(5,4) = -0.3618073D-J1$	 $\xi = 5.421$
$E(6,1) = -0.1354608D+J2$	
$E(6,2) = 0.7016771D+J1$	
$E(6,3) = -0.1174237D+J1$	
$E(6,4) = 0.6421911D-J1$	 $\xi = 5.875$
$E(7,1) = -0.1176125D+J2$	
$E(7,2) = 0.6105294D+J1$	
$E(7,3) = -0.1019080D+J1$	
$E(7,4) = 0.5541514D-J1$	 $\xi = 6.225$
$E(8,1) = 0.5032921D+J3$	
$E(8,2) = -0.2420981D+J3$	
$E(8,3) = 0.3885051D+J2$	
$E(8,4) = -0.2079372D+J1$	 $\xi = 6.457$

Tabela 5.6 - Coeficientes dos polinômios $CP(\xi)$ e respectivos intervalos para o rotor com $N = 3$ e $\sigma = 0.30$

$E(1,1) = 0.1485980D+01$	 $\xi = 0.0$
$E(1,2) = -0.1542789D+01$	
$E(1,3) = 0.5120100D+00$	
$E(1,4) = -0.5257135D-01$	
$E(2,1) = 0.6555572D+00$	 $\xi = 2.812$
$E(2,2) = -0.7036512D+00$	
$E(2,3) = 0.2135481D+00$	
$E(2,4) = -0.1718602D-01$	
$E(3,1) = 0.7968009D+00$	 $\xi = 3.250$
$E(3,2) = -0.7934371D+00$	
$E(3,3) = 0.2411813D+00$	
$E(3,4) = -0.2002089D-01$	
$E(4,1) = 0.3909509D+01$	 $\xi = 3.832$
$E(4,2) = -0.3230222D+01$	
$E(4,3) = 0.8770608D+00$	
$E(4,4) = -0.7533185D-01$	
$E(5,1) = 0.4769977D+01$	 $\xi = 4.399$
$E(5,2) = -0.3817004D+01$	
$E(5,3) = 0.1010443D+01$	
$E(5,4) = -0.8543823D-01$	
$E(6,1) = -0.3943372D+02$	 $\xi = 4.985$
$E(6,2) = 0.2278650D+02$	
$E(6,3) = -0.4326567D+01$	
$E(6,4) = 0.2714530D+00$	
$E(7,1) = 0.2991481D+03$	 $\xi = 5.601$
$E(7,2) = -0.1585552D+03$	
$E(7,3) = 0.2804848D+02$	
$E(7,4) = -0.1655193D+01$	
$E(8,1) = -0.3244589D+04$	 $\xi = 5.889$
$E(8,2) = 0.1646559D+04$	
$E(8,3) = -0.2784490D+03$	
$E(8,4) = 0.1569154D+02$	 $\xi = 6.095$

Figura 5.1 - Coeficiente de Potência Líquida - $N=2$, $\sigma = 0,167$

Figura 5.2 - Coeficiente de Potência Líquida - $N=2$, $\sigma = 0.20$

Figura 5.3 - Coeficiente de Potência Líquida - $N = 2$, $\sigma = 0.25$

Figura 5.4 - Coeficiente de Potência Líquida - $N = 2$, $\sigma = 0.30$

Figura 5.5 - Coeficiente de Potência Líquida - $N = 3$, $\sigma = 0.25$

Figura 5.6 - Coeficiente de Potência Líquida, - $N = 3$, $\sigma = 0.30$

Figura 5.7 - Coeficientes de Potência Líquida, Dissipada e Total $N = 2$, $\sigma = 0.167$

Figura 5.8 - Coeficientes de Potência Líquida, Dissipada e Total $N = 2$, $\sigma = 0.20$

Figura 5.9 - Coeficientes de Potência, Líquida, Dissipada e Total $N = 2$, $\sigma = 0.25$

Figura 5.10 - Coeficientes de Potência Líquida, Dissipada e Total $N = 2$, $\sigma = 0.30$

Figura 5.11 - Coeficientes de Potência Líquida, Dissipada e Total $N = 3$, $\sigma = 0.25$

Figura 5.12 - Coeficientes de Potência Líquida, Dissipada e Total $N = 3$, $\sigma = 0.30$

Figura 5.13 - Coeficiente de Potência - $N = 2$, $\sigma = 0.167$.

Figura 5.14 - Coeficiente de Potência $N = 2$, $\sigma = 0.20$

Figura 5.15 - Coeficiente de Potência $N = 2$, $\sigma = 0.25$

Figura 5.16 - Coeficiente de Potência $N = 2$, $\sigma = 0,30$

Figura 5.17 - Coeficiente de Potência $N=3$, $\sigma = 0.25$

Figura 5.18 - Coeficiente de Potência $N = 3$, $\sigma = 0,30$

Figura 5.19 - Coeficiente de Potência N=2

CAPÍTULO VI

SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO DO ROTOR EÓLICO

Na geração de energia elétrica a partir de turbinas eólicas é comum o uso de geradores síncronos. Um multiplicador de rotações é implementado ao sistema conectando a turbina ao gerador. Sua função é compatibilizar as rotações destes elementos. É preciso ainda que se utilize um dispositivo que, atuando no campo do gerador, regule sua rotação e consequentemente a do rotor.

Dois princípios básicos de controle são geralmente utilizados: razão de velocidades (ξ) constante ou rotação constante. No primeiro caso o controle é feito através de um sistema eletrônico que, recebendo de um tacômetro e um anemômetro os valores da rotação e velocidade do ar respectivamente, atua no campo do gerador variando sua rotação de acordo com o vento. Tal sistema permite que o rotor opere, idealmente, no ponto onde o coeficiente de potência é máximo (CP_{max}), o que garante o máximo aproveitamento da energia eólica. Torna-se necessário também a retificação da corrente gerada, pois devido à variação da rotação obtém-se uma corrente de frequência variada. Este sistema apresenta-se então sofisticado e caro.

O segundo princípio tem como desvantagem ser variável a razão de velocidades.

$$\xi = \frac{\omega \cdot R}{V_{\infty}}$$

pois como pode ser notado, sendo a rotação (ω) constante, o nume
rador da expressão anterior não se altera, enquanto que o denomi
nador é variável. Este fato implica numa variação do coeficien
te de potência e o que se faz é dolocá-lo a variar próximo ao
 CP_{max} . Como consequência este sistema apresenta uma menor efi
ciência sendo porém mais simples, pois funciona a partir de um
tacômetro que atua diretamente no campo do gerador, afim de man
ter constante sua rotação qualquer que seja a velocidade do ar.

Sendo este tipo de controle menos complexo que o ante
rior seu custo inicial e manutenção são mais baratos, o que po
de torná-lo viável em certos casos, principalmente em regiões
onde se tenha uma constância dos ventos.

A partir das funções já obtidas para os coeficientes
de potência dos rotores testados foram feitas simulações de fun
cionamento com rotação constante, em regiões das quais são conhe
cidas as velocidades do ar hora a hora. Para tal foram utiliza
dos:

Energia anual do vento

$$E_v = \frac{1}{2} \rho A \sum_{i=1}^n V_i^3 \quad (6.1)$$

onde

ρ - densidade do ar

A - área varrida pelo rotor

n - n° de horas do ano

V_i - velocidade do ar em cada hora

Energia útil gerada pelo rotor

$$E_u = \frac{1}{2} \rho A \sum_{i=1}^n CP(\xi_i) \cdot V_i^3 \quad (6.2)$$

sendo

$$\xi_i = \frac{\omega \cdot R}{V_i} \quad (6.3)$$

Os valores dos coeficientes de potência $CP(\xi_i)$ são obtidos diretamente das funções já referidas.

Definindo-se coeficiente de potência média por

$$\overline{CP} = \frac{E_u}{E_v} \quad (6.4)$$

tem-se

$$\overline{CP} = \frac{\sum_{i=1}^n CP(\xi_i) V_i^3}{\sum_{i=1}^n V_i^3} \quad (6.5)$$

que representa a fração de energia do vento que o rotor absorve anualmente.

Da eq.(6.4) tem-se

$$E_u = \overline{CP} \cdot E_v \quad (6.6)$$

ou

$$E_u = \overline{CP} \cdot \frac{1}{2} \rho A \sum_{i=1}^n V_i^3 \quad (6.7)$$

Definindo-se velocidade de projeto (V_p) como a velocidade constante capaz de gerar esta mesma energia útil obtém-se

$$E_u = \overline{CP} \cdot \frac{1}{2} \rho A n V_p^3 \quad (6.8)$$

pois

$$\sum_{i=1}^n V_i^3 = n V_p^3 \quad (6.9)$$

Visto que V_p é constante. Da eq. (6.9) vem

$$V_p^3 = \frac{\sum_{i=1}^n V_i^3}{n} \quad (6.10)$$

A vel. média do ar é dada por

$$\bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n} \quad (6.11)$$

É possível então definir o fator de projeto (K_p) por

$$K_p = \frac{V_p}{\bar{V}} \quad (6.12)$$

Deste modo a energia útil anual pode ser dada por

$$E_u = \overline{CP} \cdot \frac{1}{2} \rho A n (K_p \bar{V})^3 \quad (6.13)$$

e a potência média

$$\bar{P} = \overline{CP} \cdot \frac{1}{2} \rho A (K_p \bar{V})^3 \quad (6.14)$$

Para as simulações poder-se-ia utilizar um rotor de geometria definida. Isto porém acarretaria em resultados particulares a este catavento específico, não podendo ser estendido a outros de dimensões diferentes, uma vez que variando as dimensões do modelo, para uma dada rotação, varia também a razão de velocidades e consequentemente o coeficiente de potência.

Visando então uma generalização do problema utilizou-se uma área unitária, de modo que se obteve energia por unidade de área. Ao invés de fazer a rotação (ω) constante fez-se a velocidade do perfil na posição de raio máximo (ωR) constante. Deste modo a razão de velocidades é função somente da velocidade do ar, além de tornar a simulação válida para qualquer rotor.

Foram feitas então várias simulações de funcionamento para este rotor de área unitária afim de se determinar a velocidade do perfil ótima, ou seja, a velocidade na qual o rotor absorveria mais energia do vento.

Este procedimento foi repetido para todas as curvas já obtidas dos coeficientes de potência apresentadas no Capítulo V para os rotores com duas pás.

Deste modo, para um determinado rotor de área A_0 e raio máximo R_0 a potência média gerada seria dada por

$$\bar{P}_0 = \bar{P} \times A_0 \quad (6.15)$$

a uma rotação

$$\omega_0 = \frac{\omega R}{R_0} \quad (6.16)$$

Duas regiões foram escolhidas para as simulações: Fernando de Noronha e Fortaleza (CE).

Na primeira região tem-se uma maior constância dos ventos, portanto já se esperava para esta os melhores resultados.

Os dados de vento colhidos hora a hora utilizados nestas simulações foram efetuados no período de 01/07/79 à 30/06/80, em Fernando de Noronha e de 01/01/72 à 31/12/76 em Fortaleza.

A seguir são apresentados os resultados obtidos, isto é, a velocidade ótima do perfil, coeficiente de potência média e demais conclusões, separados por local e período.

No apêndice 7 são mostrados os programas utilizados nestas simulações, bem como os resultados parciais obtidos.

Das equações (6.10), (6.11) e (6.12) o fator de projeto (K_p) pode ser interpretado como fator de constância dos ventos na região. Por exemplo: se o vento fosse constante ter-se-ia $K_p = 1.0$. A partir deste valor, tal fator crescerá com o aumento da variação da velocidade do ar.

Dos resultados apresentados pode-se notar o que foi previsto anteriormente, ou seja, devido à maior constância dos ventos em Fernando de Noronha obteve-se $K_p = 1.054$ enquanto que para Fortaleza o valor deste mesmo fator situou-se na faixa de 1.320, o que justifica o melhor desempenho para as simulações feitas com os dados da primeira região.

Como pode ser visto, com rotação constante em Fernan

do de Noronha obtêm-se coeficientes de potência média da ordem de 28,5%. Estes valores podem ser considerados bons quando levado em conta a simplicidade do sistema de controle.

Ao analisar os resultados encontrados para a região de Fortaleza nota-se imediatamente que o desempenho do rotor Darrieus a uma velocidade angular constante nesta região não é tão bom. O coeficiente de potência média situa-se próximo aos 22%. Somente uma análise de custos poderia garantir a inviabilidade do sistema simulado. O bom senso porém, leva a crer que dificilmente, neste caso, o critério de rotação constante prevaleceria sobre o de razão de velocidades constante.

A viabilidade de utilização deste sistema em Fernando de Noronha assim como em qualquer outro lugar só pode ser garantida a partir de estudos econômicos. Neste caso porém, um $\overline{CP} \approx 28,5\%$ é suficiente para que este princípio seja encarado otimisticamente.

Como previsto no Capítulo V a escolha da solidez deve ser cuidadosamente feita. Pode-se notar que a energia gerada anualmente por um rotor de solidez 0.30 ($CP_{max} \approx 0.36$) é praticamente igual à gerada por outro com $\sigma = 0.25$ ($CP_{max} \approx 0.35$). A diferença em caso algum chega a 1%. É verificado inclusive que, nas simulações feitas com os dados de 1973, de Fortaleza, o rotor com $\sigma = 0.25$ superou o rotor com $\sigma = 0.30$. Este fato se deve ao maior achatamento da curva que compensa seu pico mais baixo por produzir energia numa maior faixa de razões de velocidades.

Pelo que foi visto anteriormente, num confronto entre estes dois rotores, certamente a escolha recai no de menor solidez. Por empregar mais material (44% a mais em volume nas lâminas), o rotor com $\sigma = 0.30$ torna-se mais pesado e caro. Pode ainda ser verificado, nos resultados obtidos, que o rotor de solidez 0.25 possui para velocidade ótima do perfil um maior valor, o que implica numa menor multiplicação, ou seja, menos perdas.

Sem dúvida, dos dois rotores acima mencionados, o de solidez 0.25 é o mais aconselhável. Torna-se porém necessário compará-lo a rotores de menor solidez ainda. Pelos dados apresentados nota-se uma queda significativa na energia gerada quando se passa de $\sigma = 0.25$ para $\sigma = 0.20$. Para compensar a velocidade ótima do perfil é acrescida em cerca de 12%.

Por tudo que se pode ver nesta simulação, quando levados em conta todos os fatores como: coeficiente de potência mêdia, rotação ideal, eficiência de transmissão, material usado, etc., numa análise de custo-benefício a opção final deve recair num rotor de solidez entre 0.20 e 0.25.

RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

FERNANDO DE NORONHA

Período : 01/07/1979 a 30/06/1980

$$\begin{aligned}
 E_v &= 3961.14 \text{ KWh/m}^2 \\
 \bar{V} &= 8.83 \text{ m/s} \\
 V_p &= 9.30 \text{ m/s} \\
 K_p &= 1.054
 \end{aligned}$$

σ	E_u KWh/m ²	CP %	P W/m ²	ωR_{max} m/s
0.167	897.24	22.65	102.14	58.70
0.20	999.55	25.23	113.79	54.10
0.25	1123.40	28.36	127.90	48.50
0.30	1129.93	28.53	128.63	45.40

FORTALEZA

Ano : 1972

$$E_v = 1050.77 \text{ KWh/m}^2$$

$$\bar{V} = 4.85 \text{ m/s}$$

$$V_p = 5.98 \text{ m/s}$$

$$K_p = 1.232$$

σ	E_u KWh/m ²	$\overline{CP}$ %	$\bar{P}$ W/m ²	ωR_{max} m/s
0.167	188.72	17.96	21.48	46.00
0.20	213.40	20.31	24.29	42.00
0.25	239.58	22.80	27.27	35.60
0.30	241.45	22.98	27.49	33.40

Ano : 1973

$$E_v = 891.65 \text{ KWh/m}^2$$

$$\bar{V} = 4.21 \text{ m/s}$$

$$V_p = 5.66 \text{ m/s}$$

$$K_p = 1.347$$

σ	E_u KWh/m ²	$\overline{CP}$ %	$\bar{P}$ W/m ²	ωR_{max} m/s
0.167	158.10	17.73	18.05	46.80
0.20	178.23	19.99	20.35	42.50
0.25	199.44	22.37	22.77	39.50
0.30	198.76	22.29	22.69	33.40

Ano : 1974

$$\begin{aligned} E_v &= 777.93 \text{ KWh/m}^2 & \bar{V} &= 3.90 \text{ m/s} \\ V_p &= 5.41 \text{ m/s} & K_p &= 1.389 \end{aligned}$$

σ	E_u KWh/m ²	CP %	P W/m ²	$\omega R_{\max}$ m/s
0.167	130.61	16.79	14.91	46.80
0.20	147.09	18.91	16.79	42.50
0.25	164.90	21.20	18.82	39.50
0.30	165.76	21.31	18.92	33.20

Ano : 1975

$$\begin{aligned} E_v &= 785.89 \text{ KWh/m}^2 & \bar{V} &= 3.99 \text{ m/s} \\ V_p &= 5.43 \text{ m/s} & K_p &= 1.361 \end{aligned}$$

σ	E_u KWh/m ²	CP %	P W/m ²	$\omega R_{\max}$ m/s
0.167	127.87	16.27	14.60	46.20
0.20	145.39	18.50	16.60	37.50
0.25	166.69	21.21	19.03	35.60
0.30	167.84	21.36	19.16	33.20

Ano : 1976

$$E_v = 968.72 \text{ KWh/m}^2$$

$$\bar{V} = 4.59 \text{ m/s}$$

$$V_p = 5.82 \text{ m/s}$$

$$K_p = 1.269$$

σ	E_u KWh/m ²	$\overline{CP}$ %	$\bar{P}$ W/m ²	ωR_{max} m/s
0.167	160.54	16.57	18.28	46.80
0.20	181.09	18.69	20.62	42.75
0.25	204.91	21.15	23.33	35.60
0.30	205.93	21.26	23.44	33.20

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos a partir do método dinâmico para a determinação da potência gerada se mostraram bastante satisfatórios. Ficou comprovada então a viabilidade de testes com modelos reduzidos em túneis de pequenas dimensões. Este procedimento além de possibilitar os testes, torná-los mais rápidos e simples, reduz em muito os custos destes.

Na bibliografia apresentada não foi encontrado nenhum outro trabalho que utilizasse modelos reduzidos. O menor rotor pesquisado tem 2m de diâmetro.

Ao se comparar as curvas do coeficiente de potência com as apresentadas em estudos teóricos [11,12], observou-se que valores mais altos são obtidos nos modelos analíticos. Este fato deve-se ao baixo número de Reynolds conseguido no túnel, devido principalmente, ao pequeno valor da corda do perfil. Números de Reynolds bem mais elevados foram usados em [11,12].

Em todos os testes realizados utilizou-se o perfil NACA 0012. Foram construídos os seis rotores abaixo relacionados:

De três lâminas

$$\sigma = 0.25$$

$$\sigma = 0.30$$

De duas lâminas

$$\sigma = 0.167$$

$$\sigma = 0.20$$

$$\sigma = 0.25$$

$$\sigma = 0.30$$

Dos resultados obtidos para o coeficiente de potência verifica-se que, com o decréscimo da solidez (σ), tem-se progressivamente uma diminuição em seu máximo valor, sendo porém mais achatadas as curvas. Outro ponto observado é que os rotores de menor solidez trabalham numa maior faixa de razão de velocidades, atingindo maiores valores desta.

A tabela a seguir relaciona a solidez dos rotores testados com o ponto de máximo do respectivo coeficiente de potência. Foram excluídos os rotores de três lâminas uma vez que os resultados obtidos foram prejudicados pela interferência das pás. Em rotores de maiores dimensões, sendo menor a rotação, este problema desaparece.

σ	CP(%)	ξ
0.167	29.8	5.96
0.20	31.9	5.43
0.25	34.9	4.93
0.30	36.6	4.67

Uma vez que a literatura pesquisada não registra qualquer referência, foi feita uma simulação do funcionamento do

catavento para duas cidades do Brasil. Promovendo a interação entre o catavento e a região, a simulação informa, antecipadamente, os valores da energia fornecida pelo rotor durante um certo período, quando instalado num determinado local. Para tal foram utilizados os levantamentos eólicos destas cidades (características do vento tomadas hora a hora) e as curvas do coeficiente de potência obtidas neste trabalho.

Dois são os tipos básicos de operação do catavento: rotação constante e razão de velocidades constante.

Das simulações feitas a uma rotação constante, ficou comprovado, face aos resultados apresentados no Capítulo VI que, tão importante quanto as curvas do coeficiente de potência é a distribuição dos ventos ao longo do ano. O fator de projeto (K_p), ou fator de constância dos ventos, como também poderia ser chamado, é de extrema importância quando da escolha do tipo de controle a se utilizar. Outro ponto relevante também apresentado, está no fato de que maior atenção deve ser dada ao formato da curva do CP e não somente ao seu ponto de máximo, que não deixa, é claro, de ter sua importância, principalmente em funcionamento a razão de velocidade constante.

A eficiência média anual, da ordem de 28%, encontrada nas simulações em Fernando de Noronha, mostra a viabilidade de utilização do rotor a uma rotação constante. Um valor máximo perto dos 35% seria obtido se o sistema operasse com uma razão de velocidades constante. Por outro lado, Fortaleza apresentou um valor médio anual de 22%. Faz-se portanto necessário um prévio estudo econômico para a escolha do tipo adequado de o

peração no local considerado.

Como sugestões a futuros trabalhos podem ser cita
das:

- a) Estudar rotores Darrieus com pás retas para pequenas e médias instalações. Apresentam as desvantagens do mo
mento fletor nas lâminas, compensadas porém pela sim
plicidade de construção e possibilidade de variação
do ângulo de ataque ao se posicionar a linha de cen
tro do perfil fora da tangente ao círculo de rotação.
- b) Pesquisar outros tipos de perfis
- c) Estender as simulações a outras regiões.
- d) Realizar estudos econômicos afim de verificar a viabi
lidade de sistemas eólicos para geração de energia e
létrica em regiões carentes.

APÊNDICE 1

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O princípio de funcionamento da turbina eólica de eixo vertical Darrieus é análogo ao princípio de aerodinâmica da asa (aerofólio). Quando um fluido escoar através de um aerofólio, exerce neste uma força aerodinâmica. Esta força é geralmente dividida em forças de sustentação e arraste. A força de arraste é paralela ao escoamento enquanto que a de sustentação é perpendicular a este.

Para entender a origem do torque aerodinâmico produzido pela turbina Darrieus, deve-se voltar a atenção para a seção de uma das lâminas. Um plano horizontal passando pelo ponto de raio máximo do rotor é mostrado na figura A1.

Devido a rotação da turbina, o escoamento atuante no aerofólio não é simplesmente a velocidade absoluta do ar (v) e sim a velocidade do ar em relação ao aerofólio, ou seja, a velocidade absoluta do ar menos a velocidade do perfil ($R\omega$). Este vetor diferença de velocidade (W) aparece também indicado na figura. Para um aerofólio girante o ângulo de ataque (α) é o ângulo entre a velocidade relativa (W) e a corda do aerofólio. Neste caso, por ser simétrica a seção do perfil, a corda coincide com a linha de centro.

Como pode ser visto, o ângulo de ataque (α) depende da velocidade do ar (v), da velocidade do aerofólio ($R\omega$) e da

Figura A.1 - Forças Aerodinâmicas no Perfil do Rotor.

da posição angular deste (θ).

Deste modo a velocidade relativa do ar W , atuando com um ângulo de ataque, α , cria uma força aerodinâmica (F), de composta nas convencionais forças de sustentação (F_L) e de arraste (F_D). Sendo a corda do perfil tangente ao círculo de rotação, o torque aerodinâmico será positivo sempre que a componente da força de sustentação superar a componente da força de arraste, ambas na direção da corda. O torque total da turbina é determinado integrando-se as forças ao longo de todo o comprimento de cada perfil e para cada posição das lâminas durante a revolução.

A característica geral da maioria dos aerofólios é que a razão entre as forças de sustentação e arraste (L/D) aumenta quando aumenta o ângulo de ataque, até o ponto onde ocorre o descolamento do fluxo no aerofólio. Este deslocamento é geralmente chamado de "stall". Uma vez que o ângulo de ataque é suficientemente grande para causar o "stall", a razão L/D diminui enquanto aumenta este ângulo. Para um ótimo desempenho o "stall" deve ser evitado.

A respeito da discussão relatada observa-se que uma alta razão L/D é característica desejada de uma seção do aerofólio para a turbina Darrieus. Sendo as forças de sustentação e arraste funções muito fortes do ângulo de ataque local α , deve-se verificar a variação deste. Para uma dada posição o ângulo de ataque decresce quando aumenta a razão de velocidades ($R\omega/V$). por isso, para valores suficientemente altos desta o aerofólio não mais "estola" durante a revolução. Todavia para

uma razão de velocidades baixa, o aerofólio "estola" numa apreciável porção da rotação, diminuindo muito o desempenho aerodinâmico pois o ângulo de ataque cresce excedendo o ângulo de "stall", o que provoca um decréscimo na razão L/D e eventualmente pode levar o torque aerodinâmico a um valor negativo.

Observa-se assim que uma fraca performance aerodinâmica pode ocorrer para baixas razões velocidades (grandes ângulos de ataque) devido ao "stall" e também para altos $R\omega/V$ (pequenos ângulos de ataque) mas por razão totalmente diferente, pois neste caso a razão L/D tende a zero juntamente com o ângulo de ataque (α), ficando o desempenho ótimo para ângulos de ataque um pouco abaixo do ângulo de "stall". Para seções simétricas, a faixa de ângulos de ataque para um torque positivo pode ser dada por: $2^\circ < |\alpha| < 15^\circ$. Estes valores são suficientemente grandes para obter-se altos valores para a razão L/D sem no entanto causar o "stall". Como estes limites dependem das variáveis do nº de Reynolds e da rugosidade da superfície, a faixa indicada é só aproximadamente válida.

A figura A.2 mostra a variação do ângulo de ataque com a posição angular do perfil para alguns valores da razão de velocidade local ($R\omega/V$). Para pequenas razões de velocidade a variação de α é um pouco larga e pode exceder o ângulo de "stall". Para razões de velocidade local suficientemente grandes (aproximadamente 4) o ângulo de ataque é pequeno o bastante de modo a não ocorrer "stall" no plano equatorial durante a revolução. A variação é mostrada somente em função da porção da revolução onde o ângulo de ataque é positivo. Para a outra porção o ângu

Figura A.2 - Variação do ângulo de ataque com a posição angular do perfil .

lo de ataque pode ser negativo. Se a velocidade do vento local, $\bar{V}$, não mudar de uma porção para a outra da revolução a variação do ângulo de ataque pode ser dada por $-|\alpha_{\max}| \leq \alpha \leq |\alpha_{\max}|$. Somente para este caso o maior ângulo de ataque positivo é igual ao maior módulo dos ângulos de ataque negativos. A figura A.2 confirma o que foi visto anteriormente, ou seja, para uma dada posição angular a variação do ângulo de ataque faz-se inversamente a razão de velocidade.

Devido ao "stall" a baixas razões de velocidades a força (ou torque) tangencial média pode ser negativa, isto implica que a turbina Darrieus não parte do repouso. Este fato pode ser observado experimentalmente nos numerosos modelos em funcionamento. Para tal deve-se instalar um dispositivo auxiliar para dar partida ao sistema. Um motor auxiliar, por exemplo, acrescenta muito pouco custo ou complexidade ao maquinário acoplado ao eixo de uma turbina de grande porte. Para turbinas menores um rotor impulsinado basicamente pela força de arraste fixo ao eixo central pode ser usado como "starter" por posuir boas características de torque a baixas velocidades rotacionais relativas. O rotor "Savonius" é um forte candidato neste caso. Uma vez impulsinado o sistema até uma razão de velocidades aproximadamente igual a 3, os perfis começam a impulsioná-lo. O "starter" é dimensionado de modo que quando os aerofólios estejam operando na maior eficiência, o "starter" também o esteja.

O triângulo da velocidade relativa da figura A.1 pode também ser usado para determinar a variação da velocidade re

lativa W . A figura A.3 mostra a velocidade relativa (normalizada por $R\omega$) como função da posição angular para determinadas razões de velocidades. Nas baixas razões tem-se uma considerável variação na magnitude da velocidade relativa do vento com a posição angular. Com o aumento da razão de velocidades ($R\omega/V$) a variação da razão $W/R\omega$ decresce.

O número de Reynolds usado para caracterizar o fluxo em cada secção do perfil pode ser baseado na velocidade relativa do vento. Consequentemente a figura A.3 mostra como o número de Reynolds no perfil varia com a posição e razão de velocidades local. Se uma velocidade única pode ser usada para caracterizar a condição de operação da turbina, isto se faz com a velocidade $R\omega$ ($Re_c = \rho \frac{R\omega c}{\mu}$)

Figura A.3 - Velocidade relativa do ar (adimensionalizada pela velocidade do perfil) como função da posição angular do perfil .

APÊNDICE 2

DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DO AR

A tabela a seguir apresenta os valores medidos para a diferença de pressão

$$\Delta P = P_0 - P_1$$

onde

P_0 = pressão de estagnação

e

P_1 = pressão estática

As medidas foram efetuadas nos 81 pontos mostrados na figura 4.1.

Na primeira linha da tabela aparece a numeração das colunas medidas e na primeira coluna a numeração das linhas.

A partir da equação (4.10)

$$V_{\infty n} = \left(\frac{2 K \Delta P}{\rho} \right)^{1/2}$$

sendo

$$K = 9.81 \text{ kg}/(\text{m.s}^2.\text{mm.c.a})$$

foram determinadas as velocidades do ar nos pontos acima tabelados. A tabela A2.2 mostra os resultados obtidos.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2.1	2.2	2.3	2.5	2.5	2.3	2.4	2.4	2.2
2	2.3	2.5	2.8	3.0	3.1	3.0	2.7	2.7	2.5
3	2.5	3.0	3.2	3.3	3.5	3.3	3.0	2.8	2.7
4	2.7	3.4	3.5	3.9	3.9	3.4	3.2	3.0	2.7
5	2.7	3.3	3.6	3.8	3.9	3.5	3.3	3.1	2.7
6	2.5	2.7	3.4	3.6	3.7	3.5	3.2	2.7	2.5
7	2.2	2.6	2.7	3.2	3.4	3.3	2.9	2.3	1.8
8	1.5	1.9	2.3	2.7	3.0	2.9	2.5	1.8	1.1
9	1.2	1.4	1.9	2.2	2.5	2.2	1.6	1.2	0.7

Tabela A2.1 - Diferença de pressão em mm.c.a.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	6.07	6.21	6.35	6.62	6.62	6.35	6.48	6.48	6.21
2	6.35	6.62	7.00	7.25	7.37	7.25	6.88	6.88	6.62
3	6.62	7.25	7.49	7.60	7.83	7.60	7.25	7.00	6.88
4	6.88	7.72	7.83	8.27	8.27	7.72	7.49	7.25	6.88
5	6.88	7.60	7.94	8.16	8.27	7.83	7.60	7.37	6.88
6	6.62	6.88	7.72	7.94	8.05	7.83	7.49	6.88	6.62
7	6.21	6.75	6.88	7.49	7.72	7.60	7.13	6.35	5.62
8	5.13	5.77	6.35	6.88	7.25	7.13	6.62	5.62	4.39
9	4.58	4.95	5.77	6.21	6.62	6.21	5.29	4.58	3.50

Tabela A2.2 - Velocidade do ar em m/s.

APÊNDICE 3

AJUSTE DOS DADOS EXPERIMENTAIS PARA CÁLCULO DA POTÊNCIA DO CATA-
VENTO

Um procedimento usual para ajuste de dados experimentais é obtido pelo método dos mínimos quadrados, fazendo-se com que o somatório do quadrado da diferença entre o valor experimental e o valor ajustado seja o mínimo para a curva de ajuste escolhida. Nitidamente percebe-se que este ajuste é função da curva escolhida e que somente a experiência pode determinar a melhor escolha. Existe necessidade da utilização do método dos mínimos quadrados porque o número de dados experimentais é normalmente superior aos dos coeficientes a determinar da curva em questão.

O valor ajustado da junção, entretanto, não varia muito desde que um certo critério, baseado na experiência, seja utilizado para a escolha da curva de ajuste. O mesmo não acontece com as derivadas da junção que são bastante sensíveis ao tipo de ajuste. A situação se torna crítica quando ao se traçar um gráfico para os pontos experimentais percebe-se que não apenas uma curva descreva o fenômeno em questão. De fato existe necessidade de se ajustar, também pelo método dos mínimos quadrados, uma curva para cada intervalo da variável independente em questão. A divisão ótima é naturalmente função da experiência e um bom auxiliar para a divisão é a observação visual dos pontos experimentais.

Um polinômio do 3º grau é normalmente utilizado como junção para este procedimento, e os coeficientes para cada intervalo são então determinados.

O inconveniente deste procedimento entretanto é que o ajuste pode ser descontínuo nos pontos de junção dos intervalos, fazendo com que uma suavidade requerida para o ajuste seja difícil de ser obtida.

A técnica empregada nestes casos é a introdução de restrições nos pontos de junção dos intervalos, conduzindo ao uso dos multiplicadores de Lagrange para a minimização requerida no processo dos mínimos quadrados. As restrições empregadas no presente estudo são as seguintes:

- . Valor da função deve ser o mesmo no ponto de junção;
- . Valor da 1ª derivada da função deve ser o mesmo no ponto de junção para as duas junções;
- . Valor da 2ª derivada da função deve ser o mesmo para garantir a curvatura do ajuste (evitar pontos de inflexão)

O processo de ajuste pode ser então descrito da seguinte forma.

Seja um polinômio do 3º grau utilizado para ajuste no intervalo i

$f_i(x) = a_i + b_i x + c_i x^2 + d_i x^3$, e $y_i(x_i)$ o valor experimental.

As restrições podem ser obtidas da seguinte forma

. Valor da função no ponto de junção x_i

$$\phi_i = f_i(x_i) - f_{i+1}(x_i) = 0 \quad \text{ou}$$

$$\phi_i = (a_i + b_i x_i + c_i x_i^2 + d_i x_i^3) - (a_{i+1} + b_{i+1} x_i + c_{i+1} x_i^2 + d_{i+1} x_i^3) = 0$$

. O valor da 1ª derivada no ponto de junção x_i

$$\theta_i = f'_i(x_i) - f'_{i+1}(x_i) = 0 \quad \text{ou}$$

$$\theta_i = (b_i + 2c_i x_i + 3d_i x_i^2) - (b_{i+1} + 2c_{i+1} x_i + 3d_{i+1} x_i^2) = 0$$

. O valor da segunda derivada no ponto de junção x_i

$$\psi_i = f''_i(x_i) - f''_{i+1}(x_i) = 0 \quad \text{ou}$$

$$\psi_i = (2c_i + 6d_i x_i) - (2c_{i+1} + 6d_{i+1} x_i) = 0$$

Pelo método dos multiplicadores de Lagrange, a função a ser minimizada é a seguinte

$$F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[f_i(x_j) - y_i(x_j) \right]^2 + \sum_{i=1}^{m-1} \lambda_{1,i} \phi_i + \sum_{i=1}^{m-1} \lambda_{2,i} \theta_i + \sum_{i=1}^{m-1} \lambda_{3,i} \psi_i$$

onde

m é o número de intervalos escolhidos

n é o número de pontos experimentais

e no cálculo do primeiro termo do lado direito da expressão anterior, deve ser utilizada para cada intervalo definido como um conjunto de pontos x a função equivalente $f_i(x)$

A minimização pode ser então obtida, derivando-se a função F em relação a cada uma das variáveis independentes que são as seguintes:

- (a) coeficientes dos polinômios do 3º grau
4 coeficientes por intervalo $\times$ m intervalos = $(4m)$ variáveis.
- (b) Multiplicador de Lagrange correspondentes a restrição do valor da função (ϕ_i)
1 multiplicador $\times$ $(m-1)$ pontos de junção = $(m-1)$ variáveis
- (c) Multiplicador de Lagrange correspondentes a restrição da 1ª derivada (θ_i)
1 multiplicador $\times$ $(m-1)$ pontos de junção = $(m-1)$ variáveis.
- (d) Multiplicador de Lagrange correspondentes a restrição da 2ª derivada (ψ_i)
1 multiplicador $\times$ $(m-1)$ pontos de junção = $(m-1)$ variáveis.

total de variáveis:

$$4m + (m-1) + (m-1) + (m-1) = 7m - 3$$

Assim tem-se um sistema de $(7m-3)$ equações lineares por $(7m-3)$ incógnitas a ser resolvido.

Este método é conhecido como Método dos mínimos quadrados para ajuste de spline.

APÊNDICE 4

DETERMINAÇÃO DA FUNÇÃO COEFICIENTE DE POTÊNCIA LÍQUIDA

Neste apêndice é apresentado o programa utilizado na determinação da função coeficiente de potência líquida

CPL(ξ)

A seguir são apresentados os gráficos que relacionam a rotação com o tempo para cada rotor. Em cada gráfico são plotadas duas curvas. A primeira delas mostra os pontos experimentais "O". A segunda, os pontos ajustados pelo método numérico "X". Em caso de coincidência aparece a letra "M".

Abaixo de cada gráfico encontram-se os pontos que dividem a variável tempo em intervalos, nos quais são ajustados os polinômios pelo método de "splines".

1
2
3
4
5
6
7
8
9
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9

```

DO 200 I=1,NI
K=4*(I-1)
DO 200 J=1,4
L=K+J
DO 200 N=J,4
M=K+N
I1=IP(I)+1
I2=IP(I+1)
DO 160 IJ=I1,I2
160 A(L,M)=A(L,M)+2.*(X(IJ)-XJ(1))*((N+J-2)
A(M,L)=A(L,M)
200 CONTINUE
KE=4*NI
NE=NI-1
DO 250 I=1,NE
L=KE+(I-1)*3+1
M=4*(I-1)
DO 250 K=1,2
DO 210 N=1,4
MJ=M+N+(K-1)*4
A(L,MJ)=(XJ(I+1)-XJ(1))*((N-1)
A(L,MJ)=A(L,MJ)*(-1)*((K+1)
210 A(MJ,L)=A(L,MJ)
DO 220 N=2,4
MJ=M+N+(K-1)*4
A(L+1,MJ)=(N-1)*(XJ(I+1)-XJ(1))*((N-2)
A(L+1,MJ)=A(L+1,MJ)*(-1)*((K+1)
220 A(MJ,L+1)=A(L+1,MJ)
DO 230 N=3,4
MJ=M+N+(K-1)*4
A(L+2,MJ)=(N-1)*(N-2)*(XJ(I+1)-XJ(1))*((N-3)
A(L+2,MJ)=A(L+2,MJ)*(-1)*((K+1)
230 A(MJ,L+2)=A(L+2,MJ)
250 CONTINUE
DO 300 I=1,NI
L=(I-1)*4
DO 300 J=1,4
M=L+J
I1=IP(I)+1
I2=IP(I+1)
DO 300 N=I1,I2
300 B(M)=B(M)+Y(N)*2.*(X(N)-XJ(1))*((J-1)
CALL SOLVE(A,B,NF,120)
WRITE(6,310)
310 FORMAT(1H1)
N=NI+1
XX(1)=0.0
DO 390 I=1,NI
L=(I-1)*4
DO 350 J=1,4
M=L+J
COEF(I,J)=B(M)
WRITE(6,400) I,J,B(M)
350 CONTINUE
XX(I+1)=COEF(I,1)+COEF(I,2)*XJ(I+1)+COEF(I,3)*XJ(I+1)**2.+COEF(I,
*4)*XJ(I+1)**3.
390 CONTINUE
400 FORMAT(1X,'A(',I1,',',I1,',')=',D14.7)
WRITE(6,420)
420 FORMAT(1H1)
DO 450 I=1,NI
I1=IP(I)+1
I2=IP(I+1)
L=(I-1)*4
DO 450 N=I1,I2
YP=0.
YPP=0.
DO 440 J=1,4
M=L+J
YP=YP+B(M)*(X(N)-XJ(1))*((J-1)
YPP=YPP+(J-1)*B(M)*(X(N)-XJ(1))*((J-2)
YPO=YPP*YP
440 CONTINUE
W(N)=YP
YX(N,1)=Y(N)
YX(N,2)=W(N)
YY(N,1)=YPO
WRITE(6,445) N,X(N),Y(N),W(N),YY(N,1),YPP

```

```

445 FORMAT(1X,'N=',I4,5X,'T=',F10.4,5X,'ROT=',F10.4,5X,'ROT.A=',D14.7,
*5X,'YY=',D14.7,5X,'ACEL=',D14.7)

```

```

450 CONTINUE

```

```

*****

```

```

*

```

```

* DETERMINACAO DO MOMENTO DE INERCIA ' ' HH ' '

```

```

*

```

```

*****

```

```

SI=0.0

```

```

N=1

```

```

DO 598 I=1,LL

```

```

IF(WE(I).GE.XX(2)) N=2

```

```

IF(WE(I).GE.XX(3)) N=3

```

```

IF(WE(I).GE.XX(4)) N=4

```

```

IF(WE(I).GE.XX(5)) N=5

```

```

IF(WE(I).GE.XX(6)) N=6

```

```

IF(WE(I).GE.XX(7)) N=7

```

```

IF(WE(I).GE.XX(8)) N=8

```

```

L=(N-1)*4

```

```

DO 470 J=1,4

```

```

M=L+J

```

```

470 BB(J)=B(M)

```

```

AB(1)=BB(4)

```

```

AB(2)=BB(3)

```

```

AB(3)=BB(2)

```

```

AB(4)=BB(1)-WE(I)

```

```

CALL ZPOLR(AB,NDEG,Z,IER)

```

```

TS1=0.00

```

```

TS2=0.00

```

```

DO 590 J=1,3

```

```

GG=DIMAG(Z(J))

```

```

G=DABS(GG)

```

```

IF(G.LE.1D-16) TS2=DREAL(Z(J))

```

```

ALFA=AB(3)+2.*AB(2)*TS2+3.*AB(1)*DABS(TS2)**2.

```

```

IF(ALFA.GE.0.00) TS1=TS2

```

```

590 CONTINUE

```

```

ALFA=AB(3)+2.*AB(2)*TS1+3.*AB(1)*DABS(TS1)**2.

```

```

HI(I)=T(I)/ALFA

```

```

SI=SI+HI(I)

```

```

598 CONTINUE

```

```

HH=SI/LL

```

```

WRITE(6,599)

```

```

599 FORMAT(1H1)

```

```

WRITE(6,600) (HI(I),I=1,LL)

```

```

600 FORMAT(1X,'MOMENTO DE INERCIA =',D14.7,/)

```

```

WRITE(6,605) HH

```

```

605 FORMAT(1X,'MOMENTO DE INERCIA MEDIO =',D14.7)

```

```

VV=7.24

```

```

RO=1.12

```

```

S=0.2335

```

```

RAID=0.285

```

```

WRITE(6,606)

```

```

606 FORMAT(1H1)

```

```

DO 620 N=1,NP

```

```

YY(N,1)=(YY(N,1)*HH)/(0.5*RO*S*(VV**3))

```

```

YW(N,1)=YY(N,1)

```

```

W(N)=W(N)*RAID/VV

```

```

WRITE(6,610) N,YY(N,1),W(N)

```

```

610 FORMAT(1X,'N=',I4,5X,'CP =',F10.6,5X,'W*R/VV=',F10.6)

```

```

620 CONTINUE

```

```

INC=1

```

```

IY=NP

```

```

NPO=NP

```

```

MW=1

```

```

MX=2

```

```

IOPT=1

```

```

CALL USPLTD(X,YX,IY,NPO,MX,INC,ITITLO,RANGC,ICAR,IOPT,IMAG4,IER)

```

```

WRITE(6,630) (XJ(I),I=1,9)

```

```

630 FORMAT(1X,'XJ=',F10.3,/)

```

```

CALL USPLTD(W,YY,IY,NPO,MW,INC,ITITLE,RANGE,ICAR,IOPT,IMAG4,IER)

```

```

*****

```

```

*

```

```

* AJUSTE DA CURVA DO CP EM FUNCAO DE QSI

```

```

*

```

```

*****

```

```

N=9

```

```

DO 700 I=1,N

```

```

700 XX(I)=XX(I)*RAID/VV

```

```

      DO 800 J=1,NP
      IF (XX(N).LT.W(J)) XX(N)=W(J)
800  CONTINUE
      I=1
      IP(1)=0
      J=1
1250  XP=XX(I+1)
      L=J
      DO 1400 J=L,NP
      IF (W(J)-XP) 1400,1400,1350
1350  I=I+1
      IP(I)=J-1
      GO TO 1250
1400  CONTINUE
      IP(N)=NP
1500  NF=7*NI-3
      DO 1550 I=1,NF
      B(I)=0.
      DO 1550 J=1,NF
1550  A(I,J)=0.
      DO 2000 I=1,NI
      K=4*(I-1)
      DO 2000 J=1,4
      L=K+J
      DO 2000 N=J,4
      M=K+N
      I1=IP(I)+1
      I2=IP(I+1)
      DO 1600 IJ=I1,I2
1600  A(L,M)=A(L,M)+2.*(W(IJ)-XX(1))*(N+J-2)
      A(M,L)=A(L,M)
2000  CONTINUE
      KE=4*NI
      NE=NI-1
      DO 2500 I=1,NE
      L=KE+(I-1)*3+1
      M=4*(I-1)
      DO 2500 K=1,2
      DO 2100 N=1,4
      MJ=M+N+(K-1)*4
      A(L,MJ)=(XX(I+1)-XX(1))*(N-1)
      A(L,MJ)=A(L,MJ)*(-1)*(K+1)
2100  A(MJ,L)=A(L,MJ)
      DO 2200 N=2,4
      MJ=M+N+(K-1)*4
      A(L+1,MJ)=(N-1)*(XX(I+1)-XX(1))*(N-2)
      A(L+1,MJ)=A(L+1,MJ)*(-1)*(K+1)
2200  A(MJ,L+1)=A(L+1,MJ)
      DO 2300 N=3,4
      MJ=M+N+(K-1)*4
      A(L+2,MJ)=(N-1)*(N-2)*(XX(I+1)-XX(1))*(N-3)
      A(L+2,MJ)=A(L+2,MJ)*(-1)*(K+1)
2300  A(MJ,L+2)=A(L+2,MJ)
2500  CONTINUE
      DO 3000 I=1,NI
      L=(I-1)*4
      DO 3000 J=1,4
      M=L+J
      I1=IP(I)+1
      I2=IP(I+1)
      DO 3000 N=I1,I2
3000  B(M)=B(M)+YY(N,1)*2.*(W(N)-XX(1))*(J-1)
      CALL SOLVE (A,B,NF,120)
      WRITE(6,3100)
3100  FORMAT(1H1)
      N=NI+1
      DO 3500 I=1,NI
      L=(I-1)*4
      DO 3500 J=1,4
      M=L+J
      WRITE(6,4000) I,J,B(M)
3500  CONTINUE
4000  FORMAT(1X,'C(',I1,',',I1,')=',D14.7)
      WRITE(6,4040)
4040  FORMAT(1H1)
      DO 4500 I=1,NI
      I1=IP(I)+1
      I2=IP(I+1)

```



```

L=(I-1)*4
DO 4500 N=I1,I2
YP=0.
YPP=0.
DO 4400 J=1,4
M=L+J
YP=YP+B(M)*(W(N)-XX(1))*J
YPP=YPP+(J-1)*B(M)*(W(N)-XX(1))*J
4400 CONTINUE
WRITE(6,4450) W(N),YP,YY(N,1)
4450 FORMAT(1X,'QSI=',F10.4,5X,'CPA=',F10.4,5X,'CP=',F10.4)
YW(N,2)=YP
4500 CONTINUE
CALL USPLTD(W,YW,IY,NPD,MX,INC,ITITLI,RANGE,ICHAR,IOPT,IMAG4,IER)
WRITE(6,4510) (XX(I),I=1,9)
4510 FORMAT(1X,'XX=',F10.3,/)
STOP
END

```

SUBROUTINE SOLVE (A,X,N,ND)

SOLUTION OF N SIMULTANEOUS LINEAR ALGEBRAIC EQUATIONS

```

C
C
C
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
REAL*8 A(ND,ND),X(ND),E
NM1=N-1
DO 50 K=1,NM1
M=N-K+1
DO 8 I=1,M
C=0.0
DO 4 J=1,M
CX=DABS(A(I,J))
IF (CX-C) 4,4,3
3 C=CX
4 CONTINUE
C=1.0D0/C
X(I)=X(I)*C
DO 7 J=1,M
7 A(I,J)=A(I,J)*C
8 CONTINUE
C=0.0
DO 12 I=1,M
CX=DABS(A(I,M))
IF (CX-C) 12,12,10
10 C=CX
IP=I
12 CONTINUE
IF (C) 70,70,13
13 IF (IP-M) 14,20,20
14 DO 16 J=1,M
E=A(IP,J)
A(IP,J)=A(M,J)
16 A(M,J)=E
E=X(IP)
X(IP)=X(M)
X(M)=E
20 MM1=M-1
DO 30 I=1,MM1
E=A(I,M)/A(M,M)
X(I)=X(I)-E*X(M)
DO 30 J=1,MM1
30 A(I,J)=A(I,J)-E*A(M,J)
50 CONTINUE
C
C=DABS(A(1,1))
IF (C) 70,70,54
54 X(1)=X(1)/A(1,1)
DO 60 I=2,N
IM1=I-1
E=X(I)
DO 57 J=1,IM1
57 E=E-A(I,J)*X(J)
60 X(I)=E/A(I,I)
RETURN
70 WRITE (6,75)
75 FORMAT (22HOSOLVE SYSTEM SINGULAR)
RETURN
END

```

AJUSTE DA ROTACAO 'O' = PONTOS EXPERIMENTAIS 'X' = PONTOS AJUSTADOS

XJ= 0.0
 XJ= 28.200
 XJ= 38.100
 XJ= 44.400
 XJ= 48.500
 XJ= 53.000
 XJ= 57.000

$$N = 2 \quad \sigma = 0.167$$

AJUSTE DA ROTACAO 'D' = PTDS EXPERIMENTAIS 'X' = PTC: AJUSTADOS

0.1853) + (3

0.17375+03

0-15210+03

0.1505>4C3

0.1383) + (3

0.1273) + (3

0.1157) + (3

0.10412+03

0.9255 + i2

0.80962 + C2

 0.6937×10^2 10460217 • C
 10460217 • C

2010.2106D+20

 $0.4099C+0.2$

20+3539.0

0.8086D+02

0.108D+0;

ROTAVAX

0
5
2
3
1

0.0 = 0.0

XJ= 31.000

XJ= 40.500

XJ= 46.000

XJ= 51.000

XX = \$5.00

60-0000

$$N = 2 \quad \sigma = 0.20$$
 $\sigma = 0.20$

AJUSTE DA ROTACAO 'O' = PTOS EXPERIMENTAIS 'X' = PTCS AJUSTACCS

0.1753)+C3

0.1634)+C3

0.1509)+C3

0.1383)+C3

0.1260)+C3

0.1135)+C3

0.1012)+C3

0.8873)+C2

0.7629)+C2

0.6385)+C2

0.5142)+C2

3.1120)+01

ROTACAO

XJ= 0.0

XJ= 54.000

XJ= 71.000

XJ= 81.000

XJ= 87.000

XJ= 92.000

XJ= 100.000

TEMPD

N = 2 $\sigma = 0.25$

0.1344D+03

0.1077D+03

0.8155D+02

0.5443D+02

0.2778D+02

3.1120)+01

AJUSTE DA ROTACAO 'O' = PTOS EXPERIMENTAIS 'X' = PTOS AJUSTADOS

XJ= 0.0

XJ= 49.800

XJ= 65.900

XJ= 72.000

XJ= 76.300

XJ= 81.800

XJ= 89.400

XJ= 99.300

N = 2

$\sigma = 0.30$

AJUSTE DA ROTACAO 'D' = PTOS EXPERIMENTAIS 'X' = PTOS AJUSTADOS

ROTACAO

TEMPD

- XJ= 0.0
- XJ= 41.500
- XJ= 51.000
- XJ= 57.000
- XJ= 62.300
- XJ= 67.000
- XJ= 72.300

N = 3 σ = 0.25

0.1641)+C3
0.1551)+C3
0.1461)+C3
0.1372)+C3
0.1282)+C3
0.1192)+C3
0.1103)+C3
0.1013)+C3
0.9233)+C2
0.8333)+C2
0.7436)+C2
0.2106D+02
0.4099D+02
0.6052D+02
0.8086D+02
0.1008D+03

AJUSTE DA ROTACAO 'O' = PTOS EXPERIMENTAIS 'X' = PTOS AJUSTADOS

0.1544) + C3

0.1453) + C3

0.1362) + C3

0.1271) + C3

0.1180) + C3

0.1089) + C3

0.9975) + C2

0.9066) + C2

0.8155) + C2

0.7245) + C2

0.6335) + C2

ROTACAO

XJ= 0.0

XJ= 48.800

XJ= 61.600

XJ= 68.700

XJ= 73.000

XJ= 77.000

XJ= 83.500

N = 3 $\sigma = 0.30$

T E M P O

0.1120D+01

0.2330D+02

0.4547D+02

0.6765D+02

0.8982D+02

0.1120D+0

APÊNDICE 5

CÁLCULO DO MOMENTO DE INÉRCIA DO SISTEMA GIRANTE SEM CATAVENTO

Sem o rotor, o sistema girante se resume a:

- Disco do frequencímetro
- Eixo
- Tambor de freio.

O momento de inércia de um cilindro é dado por

$$I = \frac{1}{2} m r^2$$

sendo m a massa e r o raio deste.

Rearrmando a expressão acima tem-se

$$I = \rho \frac{\pi}{32} D^4 \ell$$

onde

ρ é a densidade do material

D o diâmetro do cilindro

ℓ o comprimento do cilindro

- Momento de inércia do disco

A figura A 4 mostra o disco em corte. A massa deste vale 1009 g e calculando seu volume obtêm-se 365.147 mm^3 .

Logo, para o alumínio empregado,

Figura A4 - Disco de frquencímetro

Figura A5 - Tambor de freio

$$\rho_{al} = 2,764 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^3$$

O momento de inércia dos 60 furos em relação ao eixo pode ser calculado com o auxílio do teorema de Steiner por:

$$I_{\text{furos}} = 60 \times \rho \frac{\pi}{4} \left[\frac{D^4 \ell}{8} + D^2 \ell \cdot d^2 \right]$$

onde

D é o diâmetro dos furos

ℓ a espessura do disco

d a distância do centro dos furos ao centro do eixo.

logo

$$I_{\text{furos}} = 370550 \text{ g mm}^2$$

O momento de inércia do disco é então dado por:

$$I_{\text{disco}} = \rho \frac{\pi}{32} \left[(306,6^4 - 28,6^4) \times 4,65 + 50,5^4 \times 14 + 28,6^4 \times 8 - 10^4 \times \right. \\ \left. \times 22 \right] - I_{\text{furos}} = 10.805.051 \text{ g.mm}^2 \quad \text{ou}$$

$$I_{\text{disco}} = 1.081 \times 10^{-2} \text{ kg m}^2$$

- Momento de Inércia do Eixo

Composto por 3 diferentes diâmetros, seu momento de inércia foi calculado em 3 partes. Abaixo se encontram os diâmetros com os respectivos comprimentos e volumes.

$D_1 = 10 \text{ mm}$	$\ell_1 = 100 \text{ mm}$	$V_1 = 7.854 \text{ mm}^3$
$D_2 = 16 \text{ mm}$	$\ell_2 = 8 \text{ mm}$	$V_2 = 1.609 \text{ mm}^3$
$D_3 = 19,1 \text{ mm}$	$\ell_3 = 742 \text{ mm}$	$V_3 = 221.599 \text{ mm}^3$

Sendo a massa do eixo 1761,3 g tem-se

$$\rho_{\text{eixo}} = 7,932 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^3$$

Sendo

$$I = \rho \cdot \frac{\pi}{32} \cdot D^4 \cdot \ell \quad \text{tem-se}$$

$$I_1 = 778.683 \text{ g.mm}^2$$

$$I_2 = 408.254 \text{ g.mm}^2$$

$$I_3 = 76.894.990 \text{ g.mm}^2$$

ou

$$I_{\text{eixo}} = 7.808 \times 10^{-5} \text{ kg.m}^2$$

- Momento de Inércia do Tambor de Freio

A figura A5 mostra o tambor de freio em corte. Co

mo pode ser visto, este foi construído em dois materiais. A parte externa é de ferro fundido enquanto que a interna é em a lumínio.

A densidade do ferro fundido foi obtida por diferença visto que o alumínio aqui empregado foi o mesmo usado no disco.

Deste modo

$$\rho_{al} = 2,764 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^3$$

e

$$\rho_{fe} = 9.647 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^3$$

Parte interna

$$I_{al} = \rho_{al} \frac{\pi}{32} \left[34,5^4 \times 21,9 + 31,7^4 \times 10,5 - 10^4 \times 32,4 \right]$$

$$I_{al} = 11.208 \text{ g.mm}^2$$

Parte externa

$$I_{fe} = \rho_{fe} \frac{\pi}{32} \left[2 \times 53,4^4 \times 2,7 + 42,5^4 \times 16,4 - 34,5^4 \times \right. \\ \left. \times 21,8 \right]$$

$$I_{fe} = 63013 \text{ g.mm}^2$$

$$I_{\text{Tambor}} = 74221 \text{ g.mm} \quad \text{ou}$$

$$I_{\text{Tambor}} = 7,422 \times 10^{-5} \text{ kgm}^2$$

Logo, o momento de inércia procurado

$$I_D = I_{\text{disco}} + I_{\text{eixo}} + I_{\text{Tambor}} =$$

$$I_D = 1.095735 \times 10^{-2} \text{ kgm}^2$$

APÊNDICE 6

DETERMINAÇÃO DA FUNÇÃO COEFICIENTE DE POTÊNCIA DISSIPADA

Neste apêndice é apresentado o programa utilizado na determinação da função coeficiente de potência dissipada

CPD(ξ)

A seguir é apresentado um gráfico que mostra o decaimento da rotação com o tempo do sistema girante sem o rotor. Este gráfico mostra a faixa de rotações estudada para o rotor de solidez $\sigma=0.25$. Como as curvas para todos os rotores foram obtidas de uma mesma corrida, torna-se desnecessário a apresentação de todas elas.

Pode ser verificado no gráfico apresentado o perfeito ajuste conseguido pelo método numérico. A letra "M" representa a coincidência entre o valor experimental "O" e o valor ajustado "X". Abaixo do gráfico se encontram os pontos que dividem a variável tempo para o ajuste.

```

IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
DIMENSION YY(90,1),YX(90,2),YM(90,2)
DIMENSION ITITLE(144),ITITLD(144),ITITLI(144),IMAG4(5151),RANGE(4)
DIMENSION XJ(10),X(130),Y(120),IP(10),A(120,120),B(120),W(120)
DIMENSION ICHAR(10),XX(10),WT(120),YT(120)
DATA RANGE/4*0.0/,ICHAR(1)/'D'/,ICHAR(2)/'X' /
CALL JGETIO (1,NIN,NOUT)
READ (NIN,5) (ITITLE(I),I=1,144)
5 FORMAT(72A1)
READ(5,6) (ITITLD(I),I=1,144)
6 FORMAT(72A1)
READ(5,7) (ITITLI(I),I=1,144)
7 FORMAT(72A1)
READ(5,10) (XX(I),I=1,9)
10 FORMAT(9F8.0)
READ(5,100) N,(XJ(I),I=1,N),LI
100 FORMAT(I1,2X,9F6.0,8X,I3)
C *****
C *
C * N=NUMERO DE JUNCOES MAIS OS DOIS EXTREMOS
C *
C * XJ(I)= COORDENADA DOS N PONTOS
C *
C * X(I)=ABCISSA DOS PONTOS EXPERIMENTAIS
C *
C * Y(I)=ORDENADA DOS PONTOS EXPERIMENTAIS
C *
C * YY=POTENCIA CALCULADA APARTIR DE W AJUSTADA
C *
C *****
HHM=0.01095735
X(1)=1.12
I=0
105 I=I+1
IF(I.EQ.LI) GO TO 120
READ(5,110) Y(I)
110 FORMAT(F10.0)
Y(I)=Y(I)*0.10471976
X(I+1)=X(I)+1.12
GO TO 105
120 NP=I-1
NI=N-1
I=1
IP(1)=0
J=1
125 XP=XJ(I+1)
L=J
DO 140 J=L,NP
IF(X(J)-XP) 140,140,135
135 I=I+1
IP(I)=J-1
GO TO 125
140 CONTINUE
IP(N)=NP
150 NF=7*NI-3
DO 155 I=1,NF
B(I)=0.
DO 155 J=1,NF
155 A(I,J)=0.
DO 200 I=1,NI
K=4*(I-1)
DO 200 J=1,4
L=K+J
DO 200 N=J,4
M=K+N
I1=IP(I)+1
I2=IP(I+1)
DO 160 IJ=I1,I2
160 A(L,M)=A(L,M)+2.*(X(IJ)-XJ(1))*(N+J-2)
A(M,L)=A(L,M)
200 CONTINUE
KE=4*NI
NE=NI-1

```

```

DO 250 I=1,NE
L=KE+(I-1)*3+1
M=4*(I-1)
DO 250 K=1,2
DO 210 N=1,4
MJ=M+N+(K-1)*4
A(L,MJ)=(XJ(I+1)-XJ(I))**(N-1)
A(L,MJ)=A(L,MJ)*(-1)**(K+1)
210 A(MJ,L)=A(L,MJ)
DO 220 N=2,4
MJ=M+N+(K-1)*4
A(L+1,MJ)=(N-1)*(XJ(I+1)-XJ(I))**(N-2)
A(L+1,MJ)=A(L+1,MJ)*(-1)**(K+1)
220 A(MJ,L+1)=A(L+1,MJ)
DO 230 N=3,4
MJ=M+N+(K-1)*4
A(L+2,MJ)=(N-1)*(N-2)*(XJ(I+1)-XJ(I))**(N-3)
A(L+2,MJ)=A(L+2,MJ)*(-1)**(K+1)
230 A(MJ,L+2)=A(L+2,MJ)
250 CONTINUE
DO 300 I=1,NI
L=(I-1)*4
DO 300 J=1,4
M=L+J
I1=IP(I)+1
I2=IP(I+1)
DO 300 N=I1,I2
300 B(M)=B(M)+Y(N)*2.*(X(N)-XJ(1))**(J-1)
CALL SOLVE (A,B,NF,120)
WRITE(6,310)
310 FORMAT(1H1)
N=NI+1
DO 350 I=1,NI
L=(I-1)*4
DO 350 J=1,4
M=L+J
WRITE(6,400) I,J,B(M)
350 CONTINUE
400 FORMAT(1X,'A(',I1,',',I1,')=',D14.7)
WRITE(6,420)
420 FORMAT(1H1)
DO 450 I=1,NI
I1=IP(I)+1
I2=IP(I+1)
L=(I-1)*4
DO 450 N=I1,I2
YP=0.
YPP=0.
DO 440 J=1,4
M=L+J
YP=YP+B(M)*(X(N)-XJ(1))**(J-1)
YPP=YPP+(J-1)*B(M)*(X(N)-XJ(1))**(J-2)
YPO=YPP*YP
440 CONTINUE
W(N)=YP
YX(N,1)=Y(N)
YX(N,2)=W(N)
YY(N,1)=YPO*HHM*(-1.)
WRITE(6,445) N,X(N),Y(N),W(N),YY(N,1),YPP
445 FORMAT(1X,'N=',I4,5X,'T=',F10.4,5X,'ROT=',F10.4,5X,'ROT.A=',D14.7,
*5X,'POT. DISSIPADA =',D14.7,5X,'ACEL=',D14.7)
450 CONTINUE
VV=7.24
RD=1.12
S=0.2335
RAIO=0.285
WRITE(6,606)
606 FORMAT(1H1)
DO 620 N=1,NP
YY(N,1)=YY(N,1)/(0.5*RD*S*(VV**3.))
W(N)=W(N)*RAIO/VV
WRITE(6,610) N,YY(N,1),W(N)
610 FORMAT(1X,'N=',I4,5X,'CP =',F10.6,5X,'W*R/VV=',F10.6)
620 CONTINUE
INC=1
IY=NP
NPD=NP
NW=1

```



```

MX=2
IOPT=1
CALL USPLTD(X,YX,IY,NPO,MX,INC,ITITLO,RANGE,ICHAR,IOPT,IMAG4,IER)
WRITE(6,630) (XJ(I),I=1,9)
630 FORMAT(1X,'XJ=',F10.3,/)
CALL JSPLTD(W,YY,IY,NPO,MW,INC,ITITLE,RANGE,ICHAR,IOPT,IMAG4,IER)
C *****
C *
C * AJUSTE DA CURVA DO CP EM FUNCAO DE QS1 *
C *
C *****
N=9
DO 800 J=1,NP
IF (XX(N).LT.W(J)) XX(N)=W(J)
NT=NP+1.-J
WT(J)=W(NT)
YT(J)=YY(NT,1)
800 CONTINUE
DO 900 J=1,NP
W(J)=WT(J)
YY(J,1)=YT(J)
YW(J,1)=YY(J,1)
900 CONTINUE
I=1
IP(1)=0
J=1
1250 XP=XX(I+1)
L=J
DO 1400 J=L,NP
IF (W(J)-XP) 1400,1400,1350
1350 I=I+1
IP(I)=J-1
GO TO 1250
1400 CONTINUE
IP(N)=NP
1500 NF=7*NI-3
DO 1550 I=1,NF
3(I)=0.
DO 1550 J=1,NF
1550 A(I,J)=0.
DO 2000 I=1,NI
K=4*(I-1)
DO 2000 J=1,4
L=K+J
DO 2000 N=J,4
M=K+N
I1=IP(I)+1
I2=IP(I+1)
DO 1600 IJ=I1,I2
1600 A(L,M)=A(L,M)+2.*(W(IJ)-XX(1))**(N+J-2)
A(M,-)=A(L,M)
2000 CONTINUE
KE=4*NI
NE=NI-1
DO 2500 I=1,NE
L=KE+(I-1)*3+1
M=4*(I-1)
DO 2500 K=1,2
DO 2100 N=1,4
MJ=M+N+(K-1)*4
A(L,MJ)=(XX(I+1)-XX(1))**(N-1)
A(L,MJ)=A(L,MJ)*(-1)**(K+1)
2100 A(MJ,L)=A(L,MJ)
DO 2200 N=2,4
MJ=M+N+(K-1)*4
A(L+1,MJ)=(N-1)*(XX(I+1)-XX(1))**(N-2)
A(L+1,MJ)=A(L+1,MJ)*(-1)**(K+1)
2200 A(MJ,L+1)=A(L+1,MJ)
DO 2300 N=3,4
MJ=M+N+(K-1)*4
A(L+2,MJ)=(N-1)*(N-2)*(XX(I+1)-XX(1))**(N-3)
A(L+2,MJ)=A(L+2,MJ)*(-1)**(K+1)
2300 A(MJ,L+2)=A(L+2,MJ)
2500 CONTINUE
DO 3000 I=1,NI
L=(I-1)*4
DO 3000 J=1,4
N=L+J

```

```

I1=IP(I)+1
I2=IP(I+1)
DO 3000 N=I1,I2
300 J 3(M)=3(M)+YY(N,1)*2.*(W(N)-XX(1))*J-1)
CALL SOLVE (A,B,NF,120)
WRITE(6,3100)
310 J FORMAT(1H1)
N=NI+1
DO 3500 I=1,NI
L=(I-1)*4
DO 3500 J=1,4
M=L+J
WRITE(6,4000) I,J,B(M)
350 J CONTINUE
400 J FORMAT(1X,'D(',I1,',',I1,',')=','D14.7)
WRITE(6,4040)
404 J FORMAT(1H1)
DO 4500 I=1,NI
I1=IP(I)+1
I2=IP(I+1)
L=(I-1)*4
DO 4500 N=I1,I2
YP=0.
YPP=0.
DO 4400 J=1,4
M=L+J
YP=YP+B(M)*(W(N)-XX(1))*J-1)
YPP=YPP+(J-1)*3(M)*(W(N)-XX(1))*J-2)
440 J CONTINUE
WRITE(6,4450) W(N),YP,YY(N,1)
445 J FORMAT(1X,'QSI=',F10.4,5X,'CPA=',F10.4,5X,'CP=',F10.4)
YW(N,2)=YP
450 J CONTINUE
CALL USPLTD(W,YW,IY,NPD,MX,INC,ITITL I,RANGE,I CHAR,I OPT,IMAG4,I ER)
WRITE(6,4510) (XX(I),I=1,9)
451 J FORMAT(1X,'XX=',F10.3,/)
STOP
END

```

SUBROUTINE SOLVE (A,X,N,ND)

SOLUTION OF N SIMULTANEOUS LINEAR ALGEBRAIC EQUATIONS

```

C
C
C
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
REAL*8 A(ND,ND),X(ND),E
NM1=N-1
DO 50 K=1,NM1
  M=N-K+1
  DO 8 I=1,M
    C=0.0
    DO 4 J=1,M
      CX=DABS(A(I,J))
      IF (CX-C) 4,4,3
3    C=CX
4    CONTINUE
    C=1.0D0/C
    X(I)=X(I)*C
    DO 7 J=1,M
7    A(I,J)=A(I,J)*C
3    CONTINUE
    C=0.0
    DO 12 I=1,M
      CX=DABS(A(I,M))
      IF (CX-C) 12,12,10
10   C=CX
      IP=I
12   CONTINUE
      IF (C) 70,70,13
13   IF (IP-M) 14,20,20
14   DO 16 J=1,M
      E=A(IP,J)
      A(IP,J)=A(M,J)
15   A(M,J)=E
      E=X(IP)
      X(IP)=X(M)
      X(M)=E
20   NM1=M-1
      DO 30 I=1,NM1
      E=A(I,M)/A(M,M)
      X(I)=X(I)-E*X(M)
      DO 30 J=1,NM1
30   A(I,J)=A(I,J)-E*A(M,J)
50   CONTINUE

C
C=DABS(A(1,1))
IF (C) 70,70,54
54  X(1)=X(1)/A(1,1)
DO 60 I=2,N
  IM1=I-1
  E=X(I)
  DO 57 J=1,IM1
57  E=E-A(I,J)*X(J)
60  X(I)=E/A(I,1)
  RETURN
70  WRITE (6,75)
75  FORMAT (22H0SOLVE SYSTEM SINGULAR)
  RETURN
END

```

AJUSTE DA ROTACAO 'Q' = PTOS. EXPERIMENTAIS 'X' = PTOS. AJUSTADOS

0.1761D+C3

0.1637D+C3

0.1512D+C3

0.1388D+C3

0.1263D+C3

0.1138D+C3

0.1014D+C3

0.8890D+C2

0.7644D+C2

0.6398D+C2

0.5152D+C2

0.2240D+01

0.3584D+02

0.1030D+03

0.1366D+03

0.1702D+03

ROTACAO

XJ= 0.0

XJ= 21.300

XJ= 42.600

XJ= 63.600

XJ= 85.100

XJ= 106.400

XJ= 127.700

TEMPO

APÊNDICE 7

PROGRAMA TÍPICO DAS SIMULAÇÕES

Neste apêndice se encontra um programa típico utilizado numa das simulações.

No final deste podem ainda ser encontrados os gráficos que relacionam a energia gerada ao longo de um ano com a velocidade do perfil no ponto de máximo raio do rotor.

O primeiro gráfico apresentado corresponde ao período de 01/07/1979 a 30/06/1980 em Fernando de Noronha. Os demais são relativos à cidade de Fortaleza e correspondentes aos anos de 1972 a 1976 respectivamente. Em todos os gráficos constam quatro curvas ; uma para cada rotor.

As correspondências entre as curvas e os rotores são as seguintes :

"1"_____	$\sigma = 0.167$
"2"_____	$\sigma = 0.20$
"3"_____	$\sigma = 0.25$
"4"_____	$\sigma = 0.30$

[illegible]

```

4600 FORMAT(1H1)
4700 CONTINUE
    IY=50
    NPC=50
    MX=4
    INC=1
    IPT=1
    CALL UNLTE(IPT,INER,IY,NFI,MX,INC,ITITLE,E,CI,ICB,ICF,ICF1,ICF2,ICF3,
    *ICF4)
    WRITE(6,4150)
4800 FORMAT(1H1)
    SV=0.0
    SED=0.0
    SVB=0.0
    DO 4900 I=1,NV
    SVB=SVB+V(I)*V(I)
    SV=SV+V(I)
    ED=0.0+ED+V(I)*V(I)
    SED=SED+V(I)
4900 CONTINUE
    VM=SV/NV
    VPROJ=(SVB/NV)**(1./I.)
    CPEDJ=VPROJ/VM
    SEA=SED/1000.
    DO 5000 M=1,4
    CPM(M)=100.*EM(M)/SEA
    PMED(M)=EM(M)/NV
    WM(M)=EM(M)/1000.
5000 CONTINUE
    WRITE(6,5010)
    WRITE(6,5020) SEA
    WRITE(6,5030) VM
    WRITE(6,5040) VPROJ
    WRITE(6,5050) CPEDJ
    WRITE(6,5060) (WM(M),M=1,4)
    WRITE(6,5070) (CPM(M),M=1,4)
    WRITE(6,5080) (PMED(M),M=1,4)
    WRITE(6,5090) (WM(M),M=1,4)
5020 FORMAT(1X,'PERICTE DE 01/07/78',/,'01/07/78',/)
5040 FORMAT(2X,'ENERGIA MAXIMA APROXIMADA',/,'(12.F11.7),02.'X11.7)
5050 FORMAT(2X,'POTENCIA MAXIMA',1X,'(12.F11.7),03.'X11.7)
5060 FORMAT(2X,'VM MAXIMIZADA',/,'(12.F11.7),04.'X11.7)
5070 FORMAT(1X,'VELOCIDADE MAXIMA',/,'(12.F11.7),05.'X11.7)
5080 FORMAT(1X,'VELOCIDADE DE PROJETO',/,'(12.F11.7),06.'X11.7)
5090 FORMAT(1X,'K DE PROJETO',/,'(12.F11.7),07.'X11.7)
5100 FORMAT(1X,'ENERGIA MAXIMA',/,'(12.F11.7),08.'X11.7)
5110 FORMAT(1X,'EFICIENCIA MAXIMA',/,'(12.F11.7),09.'X11.7)
    ST
    EN

```


WZWRCHA AZDAL EH W/M**2

0.19040+06

0.1850+06

0.17150+06

9.15710+06

0.14350+06

0.12950+06

0.1155D+06

 $0.10150 + 0.06$

0.07550+05

0.7356D+05

0.5950+0.00

$$0.27500 + 0.2$$
$$0.32405 + 0.2$$
 $-0.37360+12$

70+0.7247.3

70+10124.0

$$0.520\text{CO} + 0.2$$

VELOCITAD DE CORRIENTE

ENERGIA ANDA EM M/M**2

0.165591.0

9.040151.0

0.14360+06

0.1326D+06

0.12170+06

0.11C7D+06

0.99865

0.9830+05

0.7790D+05

$$0.66960 + 0.5$$

0.56010+0.50.

0.2750b+c2

0.32406+02

0.3720+1.2

20+01224.0

0.47162

0.521750

VELOCIDADE DO PERFIL EM M/S

VELOCIDADE CO PERFIL EM. M/S

WZURCHA ANDAJ EM M/M**2

VELOCIDADE DO PERFIL EM M/S

[illegible]

onde

$$\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 = \frac{2}{I \sqrt{m}} \left(\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (I_i - I)^2 \right) \quad (A8.6)$$

sendo

m o número de pontos medidos

I o momento de inércia média

e

I_i o momento de inércia calculado a partir da equação (3.10)

Para as experiências realizadas encontrou-se para valor médio

$$\frac{\Delta I}{I} = 2.78\%$$

Da equação (4.10)

$$V = (2 k \Delta P / \rho)^{1/2}$$

e sendo $\Delta P = h$ em mm.c.a tem-se

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{1}{2} \frac{\Delta h}{h} \quad (A8.7)$$

onde $\Delta h = 1$ mm.c.a e $h = 3$ mm.c.a.

donde

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{1}{60} = 1.67\%$$

Sendo χ uma função de ω ,

$$\frac{\Delta\chi}{\chi} = \frac{\partial\chi}{\partial\omega} \cdot \frac{\Delta\omega}{\chi} \quad (\text{A8.8})$$

Nas experiências efetuadas foi encontrada para valor médio

$$\frac{\Delta\chi}{\chi} \approx 2.0\%$$

É bom ressaltar que este valor nos pontos de importância da curva do CP, ou seja, na sua parte mais elevada mostrou -se menor que a média, portanto mais confiável.

Deste modo, tem-se

$$\frac{\Delta\text{CP}}{\text{CP}} \approx 6.1\%$$

Fazendo-se a mesma análise para o coeficiente de potência dissipada encontrar-se-ia um valor ainda menor que 6%, devido ao momento de inércia neste caso ser calculado analiticamente.

APÊNDICE 8

ANÁLISE DE INCERTEZA

Da equação (4.28)

$$CP = \frac{I \cdot \omega \frac{d\omega}{dt}}{\frac{1}{2} \rho A V_{\infty}^3} \quad (A8.1)$$

e fazendo

$$\chi = \omega \frac{d\omega}{dt} \quad (A8.2)$$

obtem-se

$$CP = \frac{I \chi}{\frac{1}{2} \rho A V_{\infty}^3} \quad (A8.3)$$

Para o cálculo da incerteza tem-se:

$$(\Delta CP)^2 = \left(\frac{\partial CP}{\partial I} \right)^2 (\Delta I)^2 + \left(\frac{\partial CP}{\partial \chi} \right)^2 (\Delta \chi)^2 + \left(\frac{\partial CP}{\partial V_{\infty}} \right)^2 (\Delta V_{\infty})^2 \quad (A8.4)$$

ou

$$\left(\frac{\Delta CP}{CP} \right)^2 = \left(\frac{\Delta I}{I} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \chi}{\chi} \right)^2 + 9 \cdot \left(\frac{\Delta V_{\infty}}{V_{\infty}} \right)^2 \quad (A8.5)$$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Savonius, S.J. "The S-Rotor and its applications" Mechanical Engineering, 1931.
- [2] A Fletter, "The Story of the Rotor". F.O. Willhoft 1926
- [3] G.J.M. Darrieus "Turbine Having its Rotating Shaft Transverse to the Flow of the Current" United States Patent No. 1835, 018 December 8, 1931)
- [4] P. South and R.S. Rangs "Preliminary Tests of a High Speed Vertical. Axis Windmill Model" National Research Council of Canada, LTR-LA-74 (March-1971)
- [5] R.E. Sheldahl and B.F. Blackwell, "Free-Air Performance Tests of a 5-metre Diameter" Darrieus Turbine SAND 77-1063 Sandia Laboratories, Albuquerque, NM, Dec.1977
- [6] R.J. Murara and R.J. Equillotte "Wind Tunnel Investigation of a 14-ft Vertical-Axis Windmill", Langley Research Center, NASA TM X-72663 (March 1975).
- [7] P. South and R.S. Rangi "A Wind Tunnel Investigation of a 14-ft Diameter Vertical-Axis Windmill" National Aeronautical Establishment of National Research Council of Canada LTR-LA 105 (September 1972)

- [8] B.F. Blackwell, R.E. Sheldahl, and L.V. Feltz "Wind Tunnel Performance Data for Two-and Three Cup Savonius Rotors" Sandia Laboratories, SAND 76-0131, to be published.

- [9] I.H. Abbott and A.E. Von Doenhoff "Theory of Wing Sections" Dover

- [10] Fox and McDonald "Introduction to Fluid Mechanics" Wiley

- [11] J.H. Strickland "The Darrieus Turbine: A Performance Prediction Model Using Multiple Sreamtubes" Sandia Laboratories SAND 75-0431 (October 1975)

- [12] P.C. Klimas and R.E. Shedahl "Four Aerodynamic Prediction Schemes for Vertical-Axis Wind Turbines. A Compendium" Sandia Laboratories, SAND 78-0014 (June 1978)