

1377781

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

3415

## **ESTUDO SOBRE TURBINAS EÓLICAS**

**Marcelo Aragona**

**Ricardo F. Camacho**

**Orientador:**

**Prof. Dr. Marcos de M. Pimenta**

**São Paulo**

**1994**

**Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**

**Departamento de Engenharia Mecânica**

## **Estudo sobre Turbinas Eólicas**

Marcelo Aragona

Ricardo F. Camacho

Orientador:

Prof. Dr. Marcos de M. Pimenta

São Paulo

1994

Aos nossos pais pelo apoio e  
compreensão.e ao espirito de  
união e amizade com o qual nos  
deparamos neste difícil período  
de nossas vidas.



### Agradecimentos :

Ao orientador Prof. Dr. Marcos de M. Pimenta pela inspiração e disposição para a elaboração deste trabalho.

Ao Ilustríssimo casal Sr. Alfredo J. Aragona Vallejo e Sra. Oneyde B. Aragona pela incansável disposição e auxílio técnico.

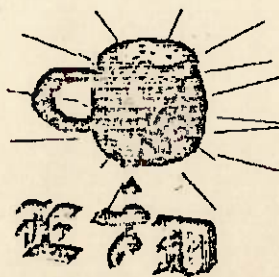
Ao Sr. Paulo , Srta. Rejane e Sr. Bigode que tanto colaboraram para a concretização da nossa formatura.

Ao povo dracenense pelos seus maravilhosos bailes carnavalescos e sua hospitalidade.

Ao Sr. Robert Halford pelo fundo musical.

Aos Etílicos do Sétimo Dia pelo eterno apoio espiritual nos momentos de desespero.

*Etílicos do Sétimo Dia*  
*espultivamente apurados.*





## SUMÁRIO

<b>1 . ENERGIA EÓLICA.....</b>	<b>1</b>
1.1 Introdução.....	1
1.2 História da Energia Eólica.....	2
1.2.1 A Civilização Eletrificada.....	6
1.3 Tipos de Geradores Eólicos.....	9
1.4 Conversão e Armazenamento de Energia Eólica.....	13
1.5 Estimativas de Eficiência e Potência.....	16
1.6 Estimativas de Custos.....	20
1.7 As Condições Atuais dos Geradores Eólicos.....	20
<b>2 . PROJETO DE UM GERADOR EÓLICO.....</b>	<b>27</b>
2.1 Considerações Gerais.....	27
2.1.1 Escolha do Sistema Eólico.....	28
2.1.2 Sistema Eólico Para Geração de Energia Elétrica.....	30
2.2 Considerações sobre os Cálculos das pás para Máquinas Eólicas de Eixo Horizontal.....	30
2.3 Teoria Simplificada para Cálculos Relativos às Pás.....	32
2.3.1 Determinação de uma Relação para o Cálculo da Largura das Pás.....	33
2.3.2 Estudo da Relação Obtida - Simplificação.....	37
2.3.3 Aplicação ao Cálculo da Largura das pás - Princípio do Cálculo e Observação.....	40
2.3.4 Rendimento Aerodinâmico Teórico do elemento de pá - ângulo de Incidência Ótimo.....	41
2.4 Teoria Turbilhonar de Glauert.....	43
2.4.1 Sistema Turbilhonar Associado às Pás.....	44

2.4.2 Sistema Elétrico Equivalente.....	46
2.4.3 Avaliação dos Esforços Axiais e Tangenciais.....	52
2.4.4 Coeficiente de Potência Local.....	56
2.4.5 Valores Ótimos do Ângulo de Inclinação e para a Quantidade Czpl.....	59
2.4.6 Coeficiente de Potência Susceptível de ser Atingido por Pás Imperfeitas Tendo Resistência de Arraste- Ângulo de Incidência Ótimo.....	64
2.4.7 Influência do número de Pás.....	66
2.4.8 Determinação da Largura das Pás e Ângulo de Calage.....	68
2.5 Influência da Inclinação das Pás no Desempenho da máquina Eólica.....	71
2.6 Roteiro para Cálculo e Aplicações.....	76
2.6.1 Exemplo de Cálculo.....	83
3 . CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS.....	92
APÊNDICE 1 : LISTAGEM DO PROGRAMA DE CÁLCULO.....	94
APÊNDICE 2 : PERFIS MAIS UTILIZADOS EM MÁQUINAS EÓLICAS.....	99
BIBLIOGRAFIA.....	102



## **Estudo sobre Turbinas Eólicas**

### **1- Energia Eólica**

#### **1.1 - Introdução**

O final do século XX é marcado pelo possível colapso do sistema energético interligado, se forem mantidos os atuais níveis de crescimento da demanda energética, quer seja pelo aumento dos atuais usuários, como pelo surgimento de novos pólos consumidores, extendendo as redes de abastecimento a novas indústrias e a locais ainda não abastecidos.

Para evitar que seja interrompido o processo de desenvolvimento destas áreas e o crescimento industrial sem comprometer a estabilidade das redes já existentes devem ser tomadas uma série de medidas que começam com o uso racional de energia evitando desperdícios, passam por um aperfeiçoamento das unidades geradoras existentes para um melhor aproveitamento de seu potencial energético e levam a um desenvolvimento de formas alternativas de geração. É fato conhecido que a descoberta de novos locais com potenciais hidráulicos aproveitáveis vem se tornando cada vez mais difícil, inclusive no Brasil, apesar de sua vasta rede hidrográfica que corta seu território. Além disso, existe também um grave problema ligado à distribuição dessa energia para regiões afastadas dos centros geradores, o que acaba se tornando um obstáculo ao desenvolvimento dessas localidades.

Dentre as alternativas para geração de energia surge a energia eólica com certo destaque, principalmente levando-se em conta fatores ambientais e humanos, mostrando-se uma fonte pouco explorada e muito promissora, ainda mais quando é levado em conta o fato de que esta energia está disponível em toda extensão da superfície terrestre, distribuída em várias intensidades.



Para se ter uma idéia desse potencial , a energia solar incidente sobre a superfície da Terra é aproximadamente  $10^{18}$  Kwh por ano. Parte desta energia é convertida em movimentação de massas de ar , sendo estimada em  $1,5 \cdot 10^{16}$  Kwh por ano. Em outras palavras , cerca de 1,5% de toda energia solar recebida pela superfície terrestre é convertida em energia eólica. Uma pequena fração apenas desta energia , a qual é acessível nos primeiros 100 m de altura , supera todos os recursos mundiais de geração hidráulica , estimados em  $2 \cdot 10^{13}$  Kwh por ano.

## 1.2 - História da Energia Eólica

O homem soube bastante cedo se servir da força do vento com fins de ventilar naturalmente seus abrigos, de secar roupa, e sobretudo para impulsionar seus barcos à vela. Numerosos milhares de anos A.C. já havia navios à vela sobre o Nilo (o vento exerce uma pressão sobre a vela, portanto uma força sobre o mastro e o barco que recupera assim trabalho útil no sentido de seu deslocamento mesmo que este último não seja àquele da direção do vento).

A roda em movimento giratório sempre no mesmo sentido, causa um desequilíbrio mecânico permanente que deve ser compensado. Foi necessário inventá-la e depois pensar em utilizar este princípio de rotação para se servir da força do vento.

Nos tempos antigos foram aprimorados moinhos de eixo vertical (chamado também de panémones ou pananémones) onde o elemento essencial era um rotor que o vento fazia girar. A potência rotativa era em geral transmitida à uma mola que girava uma bomba hidráulica com rosca de Archimedes ou uma bomba com depósitos (copinhos) sobre rodas. Supõe-se que os chineses ou os egípcios utilizaram os moinhos 3600 A.C. para moer os grãos e bombear água. O mais antigo modelo conhecido é um moinho Persa datado de 644 A.C. onde o ar (vento) era canalizado e inseria sobre um rotor que se assemelhava a um carrossel com placa verticais. Esse moinho era utilizado para moer grãos. O aparecimento sobre a Terra de numerosos modelos com eixo vertical se situa em torno do ano 1000 D.C. , como o modelo chinês onde as velas que alteiavam o vento colocavam-se

paralelamente a este, afim de não fazer resistência, e colocavam-se em posição eficaz logo que elas começavam a se mover na direção do vento. Um modelo aperfeiçoado deste último foi construído nos EUA no século XVII. Gengis Khan propaga com ele a invenção asiática dos panémones que se espalham pela Europa. Porém em 915 D.C., os Persas tinham feito progressos no desenvolvimento de moinhos. Eles desenvolveram os primeiros moinhos com eixo horizontal e as Cruzadas importaram essa invenção para Europa continental por volta de 1050 D.C. Esses modelos primitivos compunham-se um rotor com dez cunhas em madeira dispostas radialmente ao redor de um eixo de rotação. Sobre essas cunhas, enrolavam-se telas de tecidos com geometria variável. Encontram-se ainda desses moinhos em Mykonos na Grécia e em Portugal, onde eram utilizados para moer grãos.

Em 1105, concedeu-se na França a permissão de construir moinhos patenteados. No século XII na Grã-Bretanha, por volta de 1180 viu-se aparecer os primeiros moinhos com hélices quadripalas com tela que se tornaram corrente na Itália do século XII; no século XIV eram conhecidos por moinhos de giro na Holanda e no século XV ainda eram ignorados na Espanha onde era comum os primitivos moinhos com velas de 8 a 12 cunhas. É necessário explicar que os moinhos de eixos verticais são indiferente à direção do vento e quase não necessitam de mecânica na parte do rotor. Entretanto eles perdem energia ao alterar novamente o vento a cada volta e tendem portanto a não ter um bom rendimento. Os moinhos de eixo horizontal podem rodar rápido, pois sua geometria é ativa e permanente, fornecendo potência de acordo com a condição de orientação deste face ao vento.

A técnica de construção dos moinhos de vento foi nitidamente melhorada por volta do século XV desenvolvido para a moagem de grãos. Em 1420 no período da Alta Idade Média surgiram moinhos com quatro hélices com as velas em madeira persiana. Feitas frequentemente de 30 metros de envergadura que podiam fornecer até 50 cv para um vento de velocidade superior ou igual a 7 m/s.

Em 1450 aparecem na Holanda os moinhos de bombear água que se espalham em seguida por toda Europa com objetivo de drenagem. Eles em geral, possuíam um "edifício" habitável que servia de estrutura sólida para a parte mecânica do moinho.



No século XVI, Jacques Besson apresentou em sua "Teoria de Instrumentos Matemáticos e Mecânicos", as características de um moinho vertical 'recebedor' de todos os ventos e utilizando bombas em série. O modelo é bastante próximo dos modernos rotores 'S' de Savonius, com quatro pás. O capitão Sigurd J. Savonius obteve sua primeira patente em 1924 na Finlândia. Os primeiros modelos construídos eram de tela e em 1929 eles já eram comercializados como um sistema para bombeamento de água. Outro moderno "panémone" é aquele que M. Darrieus patenteou na França em 1920 do qual voltaremos a falar.

Em 1582 construiu-se o primeiro moinho a óleo na Holanda e em 1586, em seguida, devido a demanda de papel ligada à descoberta da imprensa, o primeiro moinho a papel. Em 1750 utiliza-se correntemente o vento para fins semi-industriais, isto é, para serrar madeira e pedras, para prensar plantas, linho, cravo, girassol, nozes e outros e assim produzir óleo vegetal, para fabricar o papel e para martelagem e o trabalho em metal. As mecânicas de moinhos eram então revestidas de estruturas armadas pesadas. Os edifícios de trabalho ou habitações estavam ligadas a sua concepção.

Melhoramentos técnicos foram trazidos sem cessar com o passar dos anos. Em 1724, em Leipzig, Jacob Lempold concebeu um rotor com 8 asas de hélice (pás), autoregulantes as quais eram calçadas com uma cunha variável e se afastavam progressivamente assim que o vento forçava. Esta máquina comandava uma bomba de pistão de efeito simples e atingia velocidades bastante constante na presença de ventos médio e grande. Essa máquina não possuía leme e se fixava em uma direção preferencial do vento. Em 1731, o francês Parent um moinho de quatro pás elípticas em madeira fixada ou colada sobre uma tela e catavento-leme. Em 1772 Andreux Meikle inventou também um mecanismo para ajustar o enfraquecimento do conjunto de velas seguindo o vento. Em 1775 Edmond Lee inventava na Inglaterra o leme feito de uma roda secundária com pás que permitia a orientação automática da hélice face ao vento. Nesse projeto, a hélice secundária ficava em um plano perpendicular ao plano da hélice principal e um redutor de 3000 para 1 permitia utilizar a energia do vento para fazer girar o equipamento móvel e o teto do moinho.

Em 1787 Thomas Mead introduziu o princípio de utilização de forças centrífugas para assegurar a regulação com calçamento com cunha variável. Em 1789 Stephen Hooper inventou, na Inglaterra um cilindro para



controlar o conjunto de velas ao vento, e em 1807 Sir William Cubitt patenteava um "persiennage" variável automática. Na região parisiense e no norte da França constituiu-se então moinhos com quatro pás, cada uma com 12 à 14 metros de comprimento por 2 metros de largura, feitas de uma moldura em madeira persiana podendo ser fixadas pelos períodos de ventos fracos. A rotação útil variava de 6 a 12 rpm. As pás com portas de madeira montadas sobre dobradiças tiveram sua grande produção no século XIX. Para fornecer a orientação dos moinhos no sentido do vento, todas estas máquinas deviam ter um mecanismo e um telhado girando de 360° ao redor de um eixo central ou uma coroa cilíndrica (podendo ser dentada) formando o caminho do rolamento. Nesse último caso eram frequentes os moinhos seguirem o modelo de E. Lee possuindo uma roda secundária para servir de leme. Eles produziram um par igual e opostos àquele provocado pelo retorno de ângulo horizontal-vertical da energia mecânica capturada. Em meados do século XIX pode-se estimar que existiam pelo menos nove mil moinhos de vento em atividade na Holanda (construídos em madeira e com zona de trabalho dispostas em camadas e pivo central construído com tábuas, com zona de habitação inferior e maquinaria e cobertura giratória no nível superior).

Em 1860 os burgueses se dispuseram a patrocinar os projetos de novos moinhos gerando grande concorrência, novas tendências e diversas patentes de freios, modos de captura e segurança. Acha-se em particular os freios aerodinâmicos colocados nos extremos das hélices e saindo fora do perfil quando havia pouco vento. Por volta de 1880, se desenvolve no oeste dos EUA uma indústria de moinhos eólicos ligados à bombas hidráulicas destinada a equipar os ranchos da região. Esses moinhos eram baseados nos trabalhos do inglês John Smeaton que em 1759 já observava o potencial energético dos moinhos à vela. A indústria chamava-se Batavia, sediada em Illinois, fabricou a partir de 1883 um modelo com 6 pás de 3,6 metros de diâmetro, fornecendo mais de 1KW para um vento de 9 m/s e 20 W para ventos de 2,2 m/s. Em 1900 surge um moinho americano com rotor feito de multilâminas metálicas.

### 1.2.1 - A Civilização Eletrificada

Se os Antigos já sabiam que o âmbar adquiria o atrito de atrair a poeira e corpos leves, tudo como certos corpos friccionados e eletrizados podem fazer, as leis de Eletromagnetismo só foram enunciadas a partir do fim do século XVIII e durante a primeira metade do século XIX por Galvani (experiência da rã e do metal), Volta (pilha metálica), Oersted, Ampere, Faraday (produção e utilização) e por fim Gramme, operário belga, inventor do dínamo e do motor (1873). Vinrent e Ruhmorff (geradores de alta tensão), Gauss (telegrafo), Bell (telefone), Edson (iluminação artificial), Planté (acumuladores), etc. Também o desejo cultural que manifestava Lord Kelvin em 1802 de fabricar a eletricidade a partir do vento (como as máquinas eletrostáticas) foi substituído progressivamente pela idéia de produzir corrente elétrica para fins industriais.

Em 1804, Sir Francis Beaufort, hidrógrafo da marinha britânica, cria a famosa escala da força do vento utilizada até hoje. Racionalisava-se assim o impalpável. Em 1841, um belga chamado Nollet patenteia um aerogerador. Em 1887, o duque de Feltre instalou um farol e um moinho de vento de 12 metros de diâmetro para alimentar com eletricidade uma bancada de baterias (acumuladores). Em 1890, o professor dinamarquês Paul La Cour publicou algumas notas e fórmulas de aerodinâmica e instalou um moinho de quatro pás (sem construir o "edifício", rompendo com o uso corrente) ao cume de uma torre. O moinho possuía uma base móvel com leme e um rotor ligado à transmissão de rodas dentadas cônicas, ao eixo vertical ao pé da torre a qual se encontrava o dínamo gerador de eixo horizontal (que lhe é ligado por um segundo retorno de ângulo). A potência de moinhos um pouco mais recentes (porem semelhantes) era de aproximadamente de 30 KW.

Esta máquina foi projetada por Askov e foi produzida em série pela firma dinamarquesa Lykkegaard. Ela possuía uma embreagem automática e uma "caixa de transmissão" que realizava a mudança de velocidade do rotor através do escorregamento progressivo de uma correia sobre um cone gerando velocidades aproximadamente constantes no eixo do gerador. Ela abastecia a escola e uma grande parte da cidade. Depois dessa época os dinamarqueses passaram a utilizar aerogeradores em seus moinhos. Em 1904, a máquina de Askov foi exportada para a Suécia para uma região



onde os vento atingiam médias de 6,75 m/s. Um moinho de 2 KW custava US\$ 322; de 4 KW custava US\$ 616; de 6 KW custava US\$ 885. Essas máquinas funcionaram de 1890 até 1929. Algumas delas sobreviveram na Europa até 1960 (com o auxílio de muitos reparos) quando alimentavam de eletricidade vilas inteiras.

Em 1894 um explorador das regiões do Artico chamado Fridtjof Nansen traz com ele um moinho holandês, com dínamo e bateria. Ou seja no polo Norte já havia a corrente elétrica para a iluminação enquanto que as cidades como Londres e Nova York ainda queimavam gás para iluminação. Os holandeses adaptaram em 1900 alguns de seus moinhos de moenda para produzir energia elétrica. Em 1920, com seus problemas de aeronáutica, G.Darrieus obtinha sua primeira patente por um "moinho" de três pás e eixo vertical. Em 1927, A.J.Dekker aplicou as teorias aerodinâmicas à concepção das bordas de ataque de perfis eólicos. Na mesma época aparecia em Göttingen na Alemanha a teoria do Momentum detalhada por Betz em 1927, que fixava o rendimento máximo de uma hélice, a menos de 60% da energia cinética do vento incidente. Em 1931 foi erguido na URSS a famosa central eólica de Balaklava ( com 100 KW e 30 metros de diâmetro, vento médio anual de 6,75 m/s e produção de 280.000 KW/h por ano), colocada em serviço em 1933; Putman escreve que ela era pesada para o seu consumo, de fraco rendimento, e de pesada tecnologia. Foi o primeiro monstro eólico e teve destino habitual: muito grande ele foi destruído diante de uma rajada de vento muito forte. De 1935 a 1955, os soviéticos produziram um certo número de máquinas de 30 KW, ligadas à rede nacional mas elas eram bem mais pesadas e caras. Depois dessa experiência russa muitos outros monstros eólicos foram construídos como a de Grand Pa's Knob criada por Putman em Vermont (EUA), e que de 1940 a 1944 ficou a maior parte do tempo inutilizada (fornecendo apenas 60.000KW/h por ano). Em 1961, numa conferência da ONU, os gregos propõe que a escala correta para uma utilização de longa duração do vento seja uma escala descentralizada e a produção em série de modelos de pequena e média potência.

A partir das necessidades rurais isoladas e de novos conhecimentos em aerogeração um certo número de companhias foram criadas na Europa e EUA durante o "boon" econômico que sucedeu a 1ª Guerra Mundial. É preciso citar a carreira de M.M.L.Jacobs como exemplo. Nascido em 1903, ele construiu aos 19 anos o seu primeiro aerogerador, para bombeamento de



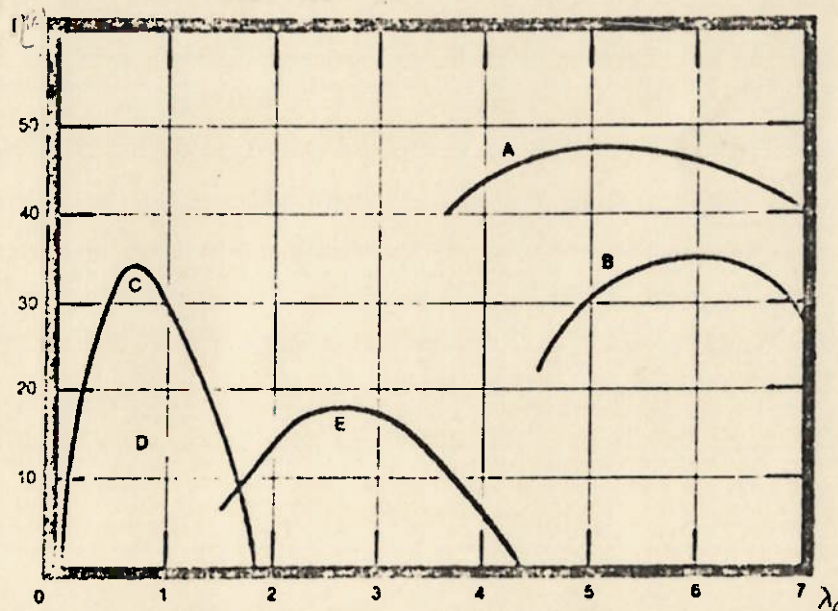
água, com com rotor de múltiplas pás do tipo "americano" e um dínamo de automóvel. Depois como Herr Schaufelberger ( da firma suíça Elektro), faz sua aprendizagem de piloto aéreo e aprimora seus conhecimentos de mecânica, aerodinâmica e eletricidade. O 1o modelo comercial, feito de forma artesanal data de 1927 a 1931, que produziu mais de 20 máquinas. A partir de 1931 ocorreu o "rush". Durante os anos 30, cerca de 300 sociedades fabricantes de "moinhos eólicos" ou relativas a esse mercado se formaram no mundo. Entre elas podemos citar a Delco, Rurallite, WinPower, etc., e principalmente a Jacobs e a WinCharger. Nessa época já era comum várias dessas empresas venderem mais de 1000 unidades por mês com potência variando de 200 a 2500 W (eram na maioria modelos pequenos, baratos e resistentes). Em 1940, com o início da 2a Guerra Mundial e uma grande diversidade de produtos, a produção americana de geradores eólicos tornou-se mais lenta. Com o fim da guerra e a chegada da eletricidade ao meio rural inviabilizou a compra de geradores eólicos, e fez despencar a sua produção mundial e consequentemente a sua fase de desenvolvimento tecnológico.

Durante o período de 1950 a 1956 a Jacobs propôs diversos projetos de organização energética eólica descentralizada. Ele já pensava em aliviar a demanda de ponta, instalando suas máquinas sobre as torres linhas de transmissão de corrente, o que restringeria os gastos. Mas, isto não era do interesse das estruturas de produção da época, baseadas sobre o petróleo barato. A partir dessa época muitas empresas fecharam suas portas inclusive a Jacobs (1956) e WinCharger (1953).

Em 1957, Louis Vadot publicava na França seus famosos artigos sobre os geradores eólicos. Nesses artigos foram feitas duras críticas aos inventores como Gendrier, Darrieus, Morel, Neyrpic e outros dizendo que esse inventores não tiveram a noção exata do impacto (que deveriam ter tido) causado pela produção e consumo de energia elétrica na França, sobre o modo de vida das pessoas. De certa forma todo o auxílio técnico e financeiro que os inventores tiveram apenas serviu apenas para o desenvolvimento de novos modelos de geradores com direito à instalação de protótipos antes de partir para novos projetos.

### 1.3 - Tipos de geradores eólicos

De um modo grosseiro os geradores eólicos podem ser divididos em geradores de eixo horizontal ou vertical. Apesar de apresentarem algumas vantagens como a de funcionarem com vento soprando de qualquer direção e do sistema mecânico de transmissão da energia do eixo motor à base ser mais simples, as máquinas de eixo vertical apresentam eficiências inferiores se comparadas às máquinas de eixo horizontal. Isto pode ser mais facilmente visto no gráfico da figura 1.3.1, onde são apresentados alguns valores dessa eficiência, assunto a ser abordado mais profundamente em separado.



- A = máquina com hélice de duas pás, alta velocidade
- B = rotor DARRIEUS
- C = rotor SAVONIUS
- D = molho de vento com múltiplas pás
- E = molho holandês com quatro pás

Fig.1.3.1 - Eficiências de Geradores Eólicos



O "Propeller", o "sail wing", o "jumbo", o "battle-ax", o "fair wheel" e o "bicycle wheel" podem ser citados como exemplos de máquinas de eixo horizontal. Para a obtenção de sua máxima eficiência, o plano de rotação das pás deve ser mantido perpendicular à direção em que sopra o vento, procurando desta forma além do maior rendimento, evitar esforços danosos na direção axial da máquina. Isto é conseguido atualmente através de dispositivos de controle que monitoram a direção dos ventos e acionam um sistema de "giro planetário" que faz o posicionamento da turbina na direção certa através do acionamento de um conjunto motor elétrico/engrenagens.

O "savonius", o "darrieus" e o "merry-go-round" são exemplos de tipos de máquinas de eixo vertical. O rotor Savonius, conhecido também como rotor em "S" foi patenteado em 1929 e seu uso foi rapidamente difundido entre países em fase de desenvolvimento devido a sua simplicidade e baixo custo. Os tipos de máquinas de eixo vertical e horizontal citados são ilustrados na figura 1.3.2.

Podem ainda ser citados dois tipos de rotores "híbridos", menos convencionais: o rotor Magnus e o rotor eólico/solar. A figura 1.3.3 mostra o esquema de um rotor Magnus. Ele possui uma série de cilindros montados sobre rolamentos, livres para girarem sobre seus eixos. Cada um destes cilindros é movido por um rotor Savonius ou por uma combinação de rotores Darrieus-Savonius de alta velocidade. Uma força de sustentação derivada do chamado "efeito Magnus" dá origem a um torque em toda a roda em torno do eixo horizontal. Para efeito de comparação, tem-se que para perfis convencionais o coeficiente de sustentação é da ordem de 1,5, enquanto que para o arranjo Magnus é da ordem de 7 a 8. A fig. 1.3.4 ilustra um tipo de rotor eólico/solar. Um rotor vertical tipo "bicycle-wheel" é montado em uma estrutura similar a um venturi. A seção superior possui um formato que induz um "vórtex" após o rotor na direção ascendente. A energia solar é absorvida pela parte inferior do venturi com o intuito de aquecer o ar, acelerando-o para que passe pelo rotor, o qual possui uma série de magnetos permanentes que excitam enrolamentos externos na parte fixa. Estes enrolamentos tem como função "coletar" correntes de alta frequência que são transformadas em uma corrente de frequência constante 60Hz por circuitos eletrônicos auxiliares, independente da velocidade de rotação do rotor.



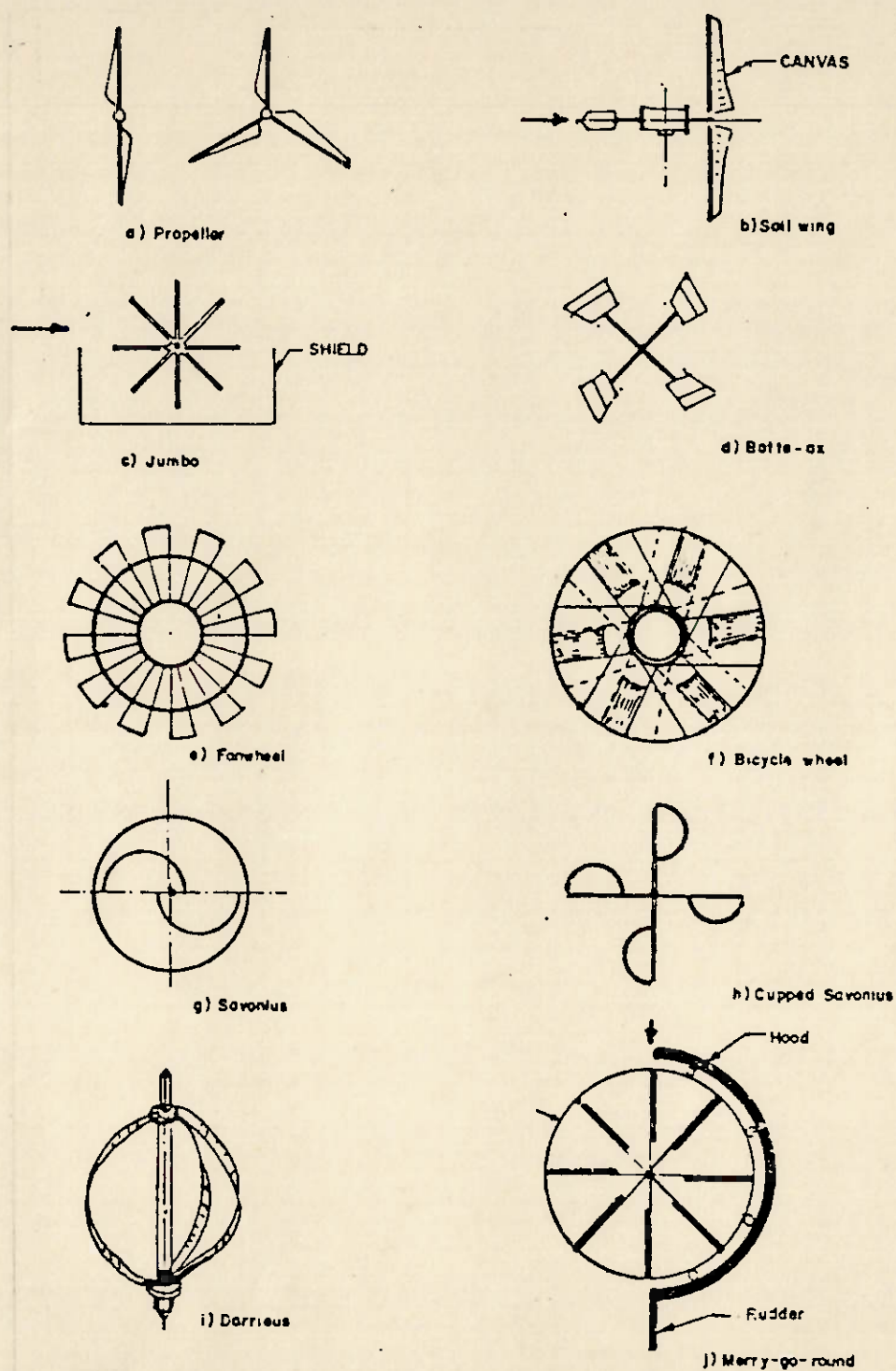


Fig. 1.3.2 - Turbinas de Eixo Horizontal e Vertical

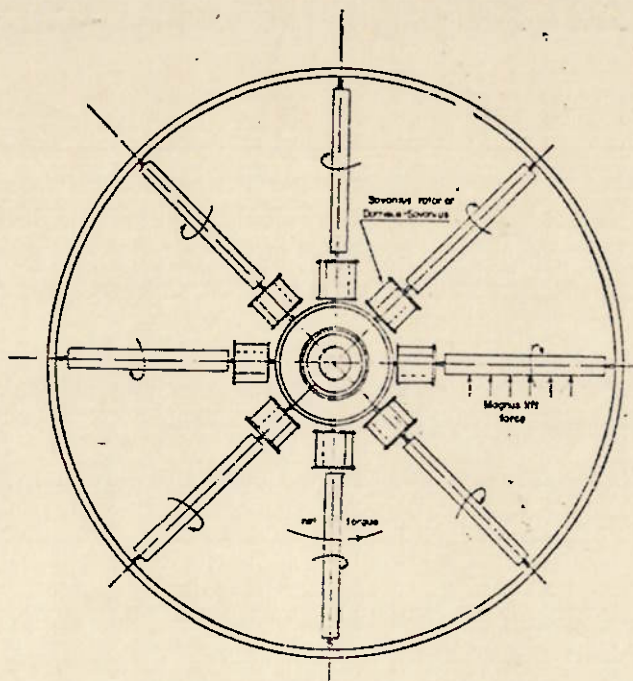


Fig. 1.3.3 - Rotor Magnus

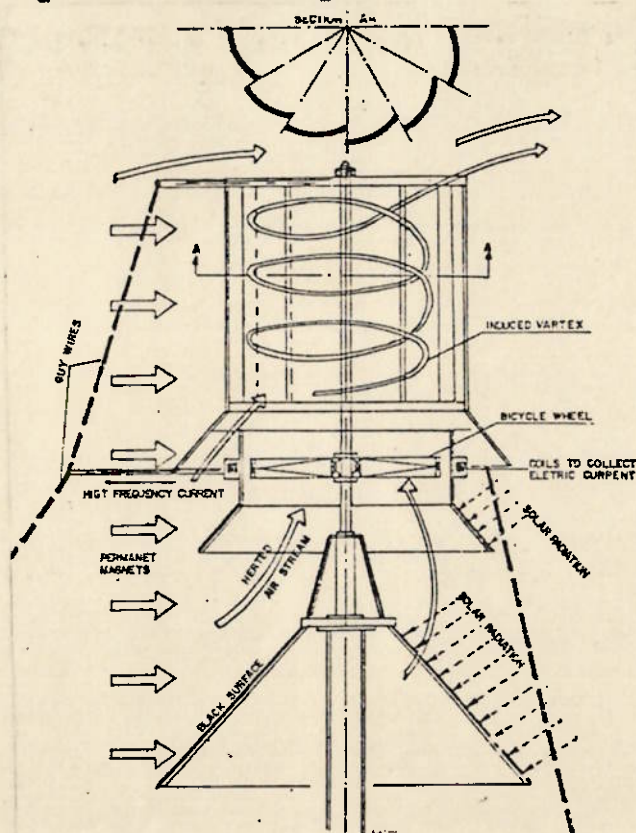


Fig. 1.3.4 - Rotor Solar-Eólico



## 1.4 - Conversão e armazenamento de energia eólica

Existem vários níveis de utilização para geradores eólicos , partindo desde utilizações simples como bombeamento de água até injeção de energia em uma rede, definindo assim as características que melhor convém para a determinação do tipo de gerador a ser utilizado.

A maneira mais simples de utilização de energia eólica consiste em transmitir diretamente o movimento rotativo da hélice até uma bomba de água ou moinho. Esta transmissão geralmente é feita através de engrenagens e mecanismos de redução ou multiplicação de velocidade.

Para outros usos , como por exemplo geração de energia elétrica para o abastecimento de casas e indústrias , o problema torna-se mais complexo , pois existe uma necessidade de se conciliar os picos de consumo com os picos de geração , sendo esses últimos dependentes dos ventos existentes na região no período. Na maioria das vezes estes picos não coincidem , sendo necessário a introdução de algum dispositivo de armazenamento , para que a energia excedente produzida em horários de pouco consumo possa suprir a falta em horários de pico de consumo.

Em grandes instalações , o excedente de energia é utilizado para o bombeamento de água para um reservatório natural ou um tanque localizado a uma altura superior em relação à turbina. Em caso de pico de consumo , é acionada uma turbina hidráulica que utiliza a água do reservatório para suprir a demanda de energia. Esse esquema é mostrado na figura 1.4.1.

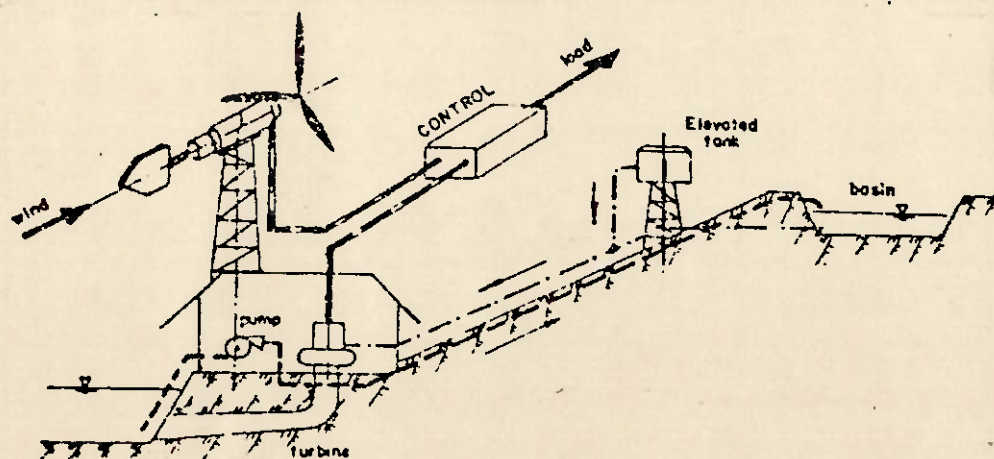


Fig. 1.4.1 - Instalação de Larga Escala

Em instalações médias, utiliza-se o excedente de energia para fazer eletrólise da água, separando-se assim o hidrogênio do oxigênio. Em caso de alto consumo, o hidrogênio produzido e armazenado é queimado em motores de combustão interna, gerando assim a energia que falta para o abastecimento. Esse esquema é mostrado na figura 1.4.2.

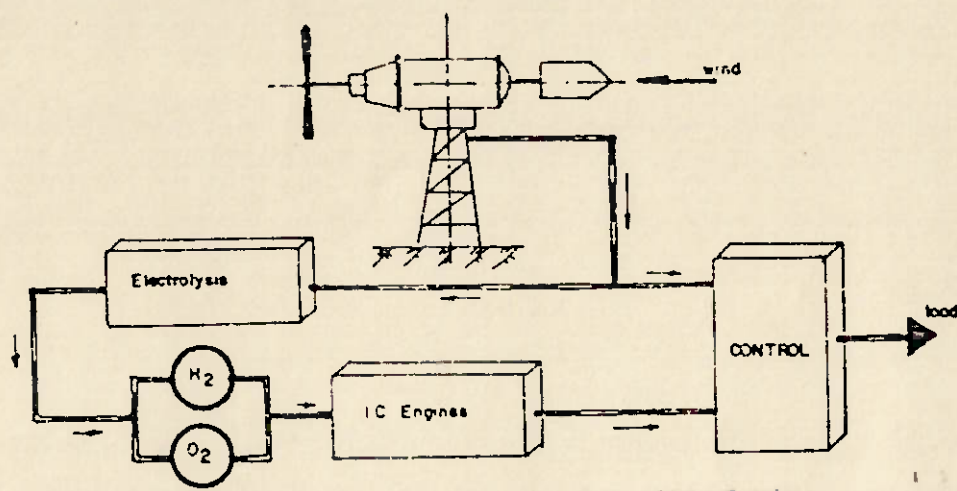


Fig. 1.4.2 - Instalação de Média Escala

Para pequenas instalações, assim como as existentes em fazendas no Rio Grande do Sul, um pequeno gerador eólico é acoplado a um conjunto de baterias onde é armazenado o excedente de energia para ser utilizada posteriormente em períodos de calmaria dos ventos. Este arranjo pode ser visto na figura 1.4.3.

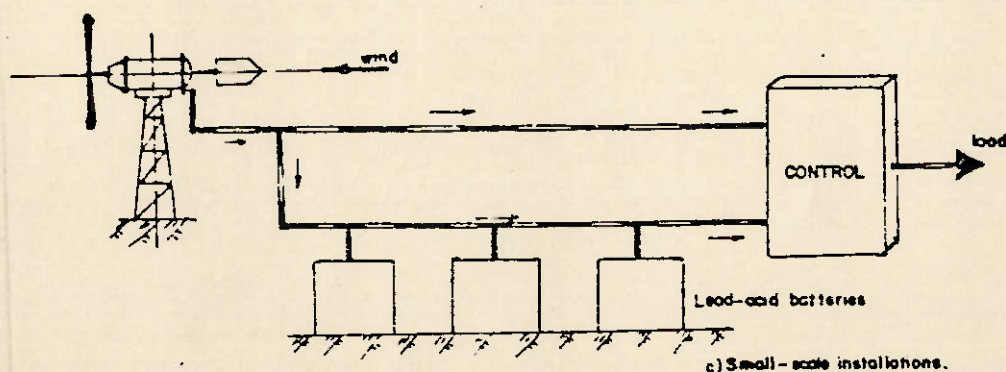


Fig. 1.4.3 - Esquema de Estocagem de Energia



Existem também máquinas com circuitos mais modernos que conseguem através de um gerador de alta rotação (ligado a turbina por um multiplicador de velocidade) produzir uma saída de frequência 60 Hz praticamente constante, independente da velocidade em que gira o gerador eólico. Esse arranjo permite uma injeção direta da energia gerada em uma rede, como mostra a figura 1.4.4. Um exemplo de instalação assim já pode ser encontrado em uma fazenda de vento da Califórnia, sistema esse que será melhor descrito em um tópico específico.

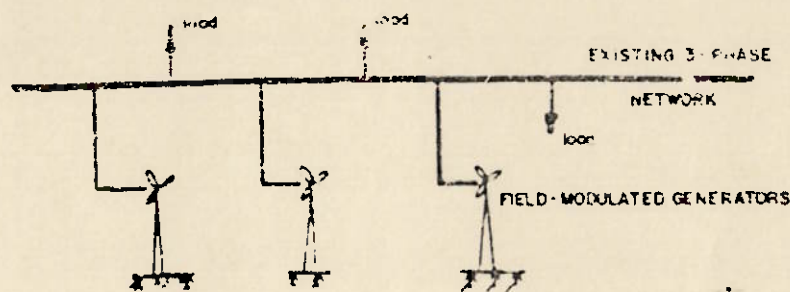


Fig. 1.4.4 - Conexão direta com a Rede

O gráfico da figura 1.4.5 ilustra comparativamente algumas formas de armazenamento, fornecendo valores em Kw\*h/lb que permitem uma análise em termos de eficiência/compactabilidade.

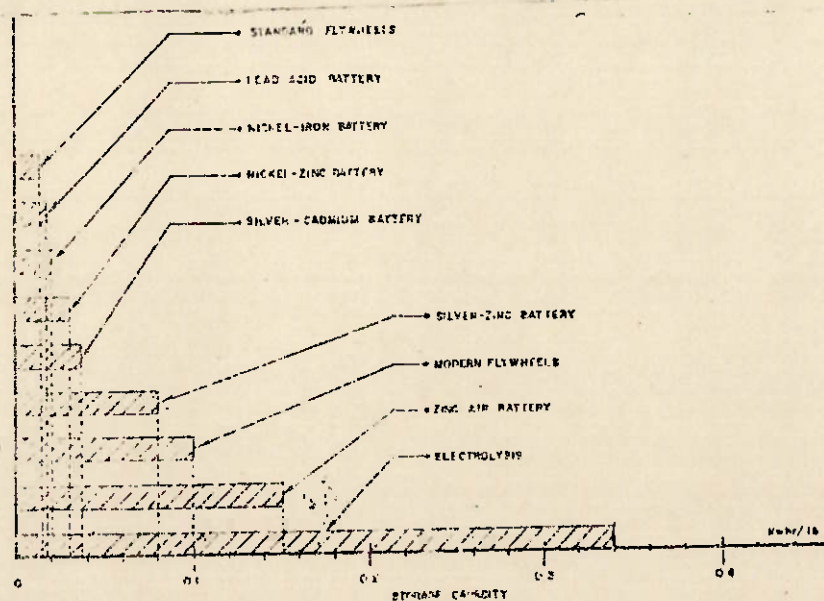


Fig. 1.4.5 - Comparação entre Formas de Estocagem

### 1.5 - Estimativas de eficiência e potência

Utilizando um gerador eólico de eixo horizontal, é possível fazer estimativas de sua performance e da influência dos seus diversos parâmetros nesta performance utilizando um conceito denominado 'princípio do disco atuante'.

Considerando o rotor mostrado na figura 1.5.1 podemos chamar de  $V$  e  $P$  a velocidade e pressão na seção livre de entrada. Na seção próxima ao rotor, a velocidade cai para  $(V-v)$  e a pressão assume um novo valor  $P_0$ ; passando por ele, a velocidade axial continua a mesma  $(V-v)$  e a pressão cai para  $(P_0-P')$ . Após certo tempo, o valor  $P$  da pressão é restabelecido e a velocidade assume um novo valor  $(V-v')$ .

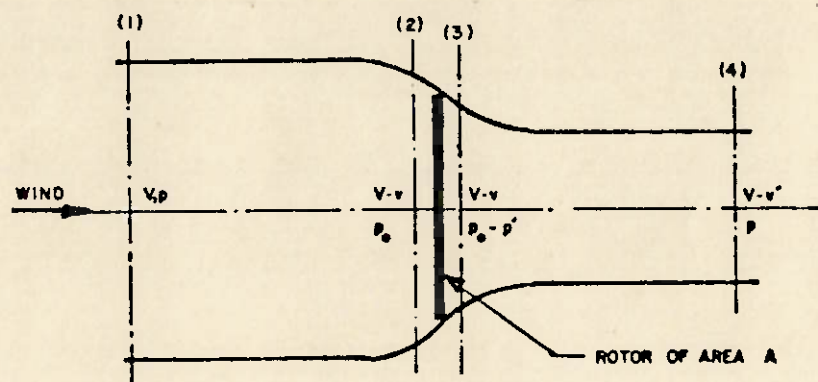


Fig. 1.5.1 - Esquema de Rotor Eólico

Assumindo escoamento irrotacional e aplicando a equação de Bernoulli:

$H_1$  = Carga antes do rotor

$$H_1 = P + 0.5 * \rho * V^2 = P_0 + 0.5 * \rho * (V - v)^2$$



$H_4$  = Carga após o rotor

$$H_4 = P + 0.5 * \rho * (V - v')^2 = (P_0 - P') + 0.5 * \rho * (V - v)^2$$

Das duas primeiras relações é possível obter:

$$H_1 - H_4 = P' = \rho * v' * (V - 0.5 * v') \quad (1.1)$$

A força de arrasto  $F_t$  atua da direita para a esquerda sobre o rotor e sua magnitude é igual a variação do momento linear na direção horizontal. Portanto:

$$F_t = A * \rho * (V - v) * (V - (V - v')) = A * \rho * v' * (V - v) \quad (1.2)$$

Mas a força de arrasto também pode ser escrita em função da diferença de pressão na passagem:

$$F_t = P' * A$$

Substituindo pela equação (1.1):

$$F_t = \rho * v' * A * (V - 0.5 * v') \quad (1.3)$$

Comparando as equações (1.2) e (1.3) :

$$v = 0.5 * v'$$

Implicando que metade da queda de velocidade ocorre antes do plano do rotor e a outra metade ocorre após. Podemos escrever agora a força de arrasto  $F_t$  como:

$$F_t = 2 * A * \rho * (V - v) * v \quad (1.4)$$

A potência absorvida pelo gerador eólico é dada por :

$$P_m = F_t * (V - v) = T * \Omega \quad (1.5)$$

Onde T é o torque fornecido pelo rotor e  $\Omega$  é sua rotação angular.  
A potência  $P_w$  disponível para o gerador eólico é dada por:

$$P_w = F_t * V \quad (1.6)$$

De (5) e (6) é possível retirar uma expressão de eficiência:

$$\eta = \frac{P_m}{P_w} = \frac{V - v}{V} \quad (1.7)$$

Substituindo (1.4) em (1.5):

$$P_m = 0.5 * \pi * D^2 * \rho * (V - v)^2 * v \quad (1.8)$$

Para o diâmetro D do rotor

Eliminando v entre (1.7) e (1.8):

$$\eta^2 * (1 - \eta) = \frac{2 * P_m}{\pi * D^2 * \rho * V^3} \quad (1.9)$$

O que expressa a potência de saída  $P_m$  em função da eficiência

Para V,  $\rho$  e D constantes é possível fazer a derivada  $\frac{dP_m}{d\eta} = 0$  ,

obtendo-se para máxima potência:

$$\eta = \frac{2}{3} \quad \text{e} \quad v = \frac{V}{3}$$

Substituindo esses valores em (1.8) , obtém-se:

$$(P_m)_{\max} = 0.233 * \rho * V^3 * D^2 \quad (1.10)$$

O que mostra que a potência gerada pela máquina eólica é proporcional a  $D^2$  e  $V^3$ .



Na prática, geralmente é possível ignorar a perturbação criada pelo gerador eólico, portanto podendo ser considerada como potência que realmente passa pelo gerador eólico:

$$P_{w'} = 0.5 * (A * \rho * V) * V^2 = \frac{\pi}{8} * D^2 * \rho * V^3 \quad (1.11)$$

Das equações (1.8) e (1.9) é possível retirar uma eficiência mais realista:

$$\eta' = \frac{P_m}{P_{w'}} = \frac{4 * (V - v)^2 * v}{V^3}$$

Substituindo  $v = \frac{V}{3}$  na expressão anterior, resulta:

$$(\eta')_{\max} = \frac{16}{27} = 0.59 \quad (1.12)$$

O coeficiente de potência  $C_p$  e de torque  $C_t$  são dois adimensionais muito usados na análise e projeto de geradores eólicos. Esses adimensionais são dados por:

$$C_p = \frac{P_m}{\frac{\pi}{8} * \rho * D^2 * V^3} \quad C_t = \frac{T}{\frac{\pi}{8} * \rho * D^3 * V^2} = \frac{C_p}{2 * \lambda}$$

onde  $\lambda = \frac{D * \Omega}{2 * V}$

Segundo o modelo do "Princípio do disco atuante", um gerador eólico pode retirar 59% da energia do vento. Na prática é possível retirar 70% deste valor (chamada eficiência aerodinâmica) máximo. Partindo dessa, a eficiência global de conversão (energia eólica em energia mecânica no eixo) é aproximadamente 40%. Considerando a transmissão mecânica, eficiência do gerador elétrico e da transmissão de eletricidade este valor chega a 30%.

### 1.6 - Estimativas de custos

O fator custo Talvez tenha sido , ao lado da falta de maturidade tecnológica , um dos fatores que mais atrapalhou o desenvolvimento dos geradores eólicos. Estimativas atuais apontam valores considerados competitivos para geração de energia em pequena e média escala. Para uma turbina de eixo horizontal , estima-se em U\$ 1000 o custo fixo por Kw\*h instalado , sendo de aproximadamente 1,5% desse total o custo anual de manutenção. Por exemplo para uma turbina como a instalada em Fernando de Noronha de 75 Kw o custo total de instalação é de aproximadamente U\$ 75000 e o custo anual de manutenção chega próximo a U\$ 1300. Como se pode perceber , esses valores confirmam que para pequenas e médias instalações os custos das turbinas eólicas são baixos , principalmente à medida em que cresce a distância entre as estações geradoras convencionais e a região consumidora e à medida em que cresce a frequência e intensidade dos ventos na região , aumentando assim a quantidade de energia produzida por ano. Atualmente , com o grande volume de pesquisa na área , já começam a surgir novos designs de turbinas mais compactas , construídas com materiais mais leves e resistentes juntamente com novos sistemas de controle , o que faz com que o aproveitamento de energia eólica desponte como uma das mais promissoras opções entre as formas de geração alternativa para geração em grande escala.

### 1.7 - As Condições Atuais dos Geradores Eólicos

O grande desenvolvimento das turbinas eólicas ocorreram no início dos anos 70, graças a um programa federal do governo dos E.U.A. em conjunto com a NASA, sobre o comando do DoE (Departament of Energy).

O primeiro modelo desenvolvido foi o MOD - 2s com 2,5 MW de potência e rotor construído pela Boing Co. com 300 ft de diâmetro. Um conjunto de três dessas turbinas foram construídas e instaladas em Goodnoe Hill, Washington em 1981, abastecendo de 2000 a 3000 casas a um custo inferior a 8 ¢/KWh. O preço dessa turbina era de US\$ 13 milhões cada.



Porém, uma série de problemas estruturais e mecânicos com os protótipos e o preço elevado, desqualificaram a turbina para uso comercial. Mesmo assim o programa teve continuidade e muitas modificações foram inseridas nos protótipos posteriores principalmente o controlador do ângulo das pás e rotor em balanço.

Nos anos 80, com o alto preço dos combustíveis fósseis no mercado internacional e com as previsões pessimistas que as reservas naturais desses combustíveis durariam apenas mais trinta anos, vários programas de energia alternativa (recursos renováveis) foram desenvolvidos, dentre eles programas de Energia Eólica.

O estado da Califórnia nos Estados Unidos foi um dos grandes pioneiros nessa área devido à suas condições ambientais favoráveis, com potencial estimado na época de 13.000 MW. Além disso desde a década de 70, existiam leis que obrigavam a Califórnia, no ano de 1990, a ter 30% de sua demanda de energia abastecida por fontes de energia alternativa.

Dentro desse espírito, muitos programas e experiências de turbinas eólicas foram desenvolvidas, entre eles, em 1980 a construção de uma turbina com 3 MW de potência, na época a maior do mundo. Essa turbina operava numa faixa útil de vento entre 17 e 36 m/s (presentes em apenas um terço do ano), gerando 6 milhões de KWh ano. Ela tinha eixo horizontal, 200 ft de altura, rotor com pás de madeira laminada e fiberglass com 165 ft de comprimento e vida útil estimada em 30 anos. Na época, o preço dessa turbina para se produzir em série era de US\$ 4 milhões, com um custo entre 5 ¢/KWh e 8 ¢/KWh dependendo do número de unidades produzidas.

Em 1983, o preço do petróleo começa a cair no mercado internacional. Mesmo assim, no Estados Unidos, muita pesquisa particular e programas federal continuavam a ser realizadas na área de geradores eólicos. Nesses programas, os geradores variavam de 100 a 2000 KW de potência, com eixo vertical, eixo horizontal, controlador de ângulo das pás, banco de baterias, estruturas tubulares, etc. . Nessa época ainda procurava-se entender todos os efeitos dinâmicos do vento sobre as estruturas e sobre a vida útil dessas máquinas. O principal objetivo desses estudos era descobrir um tamanho (potência) ótimo para os geradores, comercialmente competitivos numa produção em série. Essa potência ótima é estimada em torno de 1MW.

Por outro lado, o governo americano proporcionava incentivos fiscais aos compradores de turbinas eólicas pequenas (até 100 KW, rotor

entre 8 e 33 ft e faixa útil de vento entre 4 e 12 m/s), ligando esses geradores à rede elétrica e permitindo a venda do excesso gerado à malha elétrica. Existiam mais de 40 empresas produtoras dessas pequenas turbinas nessa época.

Nos anos de 1985 e 1986, muitas dessas pequenas turbinas eólicas desenvolvidas não duraram quando os incentivos fiscais à essas máquinas foram suspensos. Isso ocorreu pois sem os incentivos fiscais e o baixo preço do barril de petróleo ficou impossível para as empresas competir contra tecnologias convencionais de geração de energia. Apesar disso algumas companhias como a However, Kenetech/WindPower, Livermore, Calif, San Francisco permaneceram no negócio.

A partir do ano de 1987, começam a surgir muitos resultados e experiências de geradores eólicos desenvolvidos na Europa. É o caso de um sistema testado na Irlanda (consórcio entre a SMA Regel Systeme GmbH, ISET, e a Universidade de Gh - Kassel) que combinava um gerador eólico/motor diesel/ banco de baterias. O sistema possuía dois conversores eólicos de 30 KW de potência cada, um motor diesel acoplado a um gerador síncrono e um conjunto de baterias com capacidade de 100 KW/h ligado a um conversor AC

Após um ano de testes, esse sistema mostrou algumas conclusões:

I) A combinação utilizando o banco de baterias mostrou vantagens tecnológicas e econômicas, principalmente nos momentos em que o pico de consumo não coincidia com o pico de geração da turbina eólica.

II) A adição de um controlador para operação, supervisão do sistema e racionalização do consumo possibilitou a minimização do banco de baterias.

III) O sistema acima mostrou uma economia entre 25 e 35 % se comparado a uma instalação de mesmo porte que queima diesel.

Em 1989, "The Electricity Act", determinou ao Departamento de Energia na Europa (Comunidade Européia) uma porcentagem obrigatória de geração de energia vinda de recursos renováveis. Essa determinação deverá incentivar ainda mais o aumento de fazendas eólicas. Com isso, o valor de 50 MW instalados em 1992 deverá atingir 600 MW de potência gerada por turbina eólicas até o final do século.



No Reino Unido a expectativa é que a energia eólica possa abastecer mais de 20% do consumo. Na Itália já existe a produção em série das turbinas M7 e M30 com 5,2 e 200 KW de potência respectivamente, combinando baixo custo com alta tecnologia.

As duas maiores novidades em termos de geradores eólicos são a turbina Bonus 450 KW desenvolvida por um conglomerado de empresas dinamarquesas e a WindPower 450 KW da empresa Kenetech/WindPower. A seguir temos uma visão mais aprofundada de cada projeto:

### **Bonus 450 KW**

A Bonus 450 KW foi construída com base nas anteriores Bonus 120/150 KW trazendo consigo algumas características tradicionais da indústria dinamarquesa de geradores eólicos, como rotor de três pás e um sistema de controle de ângulo das pás próprio. Temos abaixo uma descrição mais detalhada dos componentes principais:

*Rotor* - O rotor possui três pás com 75 metros de diâmetro, em balanço montado no topo da torre. As extremidades das pás são pivotadas podendo girar de 90° em relação ao cubo e assim atuar como freios aerodinâmicos. A extremidade das pás é feita de fibra de carbono e outras partes responsáveis pela sustentação é feita de aço carbono muito resistente. O cubo do rotor é de ferro fundido montado em um eixo fixo sobre o mancal principal. Ele tem o sistema hidráulico para atuação das pás ( sistema independente nas três pás), montados dentro dele, que mantém elas em posição correta quando em funcionamento.

*Caixa de Transmissão* - É uma caixa de transmissão Flender de três estágios do tipo planetária/helicoidal. A lubrificação é feita por respingo com superfícies resfriadas, não precisando de bomba de óleo ou sistemas pressurizados. Além disso, a caixa possui um total isolamento reduzindo assim o ruído a níveis mínimos.

*Freios de Parada* - São fixados ao eixo principal da turbina, possuindo 4 sapatas hidráulicas.

*Geradores* - O gerador de 450 KW é um gerador assíncrono de 4 polos resfriado internamente e com controle externo de temperatura

*Sistema de Acionamento* - O sistema hidráulico é acionado por um motor elétrico com freio a tambor acionado hidráulicamente.

*Torre* - Possui 33 metros de altura e é construída em estrutura tubular de aço.

*Operação e Sistemas de Segurança* - A Bonus 450 KW é totalmente automática. Quando o vento apresenta velocidades superiores a 5 ou 6 m/s, a turbina é acionada sozinha. Essa velocidade já é suficiente para colocar o rotor na velocidade síncrona e em seguida a turbina conecta a malha com o módulo de acionamento para redução das perdas e estabilização na transmissão de energia. A energia gerada cresce linearmente até o vento alcançar 14 ou 15 m/s. Nesse ponto a energia é limitada pela capacidade do rotor. O aumento do vento acima deste valor causa alguma redução da energia. Essa redução é importante pois evita picos de energia no sistema de transmissão. No caso da velocidade do vento exceder 25 m/s por mais de 10 minutos, a turbina é desligada completamente pelo freios principais (freios aerodinâmicos), que causam um transitório insignificante. As extremidades das pás são retráteis com a redução da pressão hidráulica. O sistema de redução de pressão é outro corretivo em caso de falhas com vários graus de redundância. Esse sistema inclui monitoramento da velocidade do rotor, monitoramento da pressão nas extremidades das pás e monitoramento em caso de rompimento dos discos do sistema hidráulico do rotor. Nesse caso, a turbina para com apenas duas pás funcionando como freios aerodinâmico.

### WindPower 450 KW

Em Altamont Pass, a empresa Kenetech/WindPower empurrou a tecnologia de turbinas eólicas um passo adiante ao desenvolver uma turbina com capacidade de produzir mais de 450KW com custo esperado de 5c/KWh. Estudando o comportamento de 22 unidades dessa turbina em Altamont,



muitas empresas de renome como a New England Electric System and Pacific Corp. comunicaram o interesse em produzir turbinas eólicas baseada nessa tecnologia. Por seu papel na comercialização dessas avançadas turbinas eólicas, a empresa Windpower recebeu o prêmio Power's 1993 Powerplant Award.

Essa nova turbina foi desenvolvida e projetada por uma consórcio de várias empresas. A NASA auxiliou o desenvolvimento das modernas pás do rotor feitas de lâminas de fiberglass. Com 54ft de comprimento, as pás são mais leves e duráveis se comparadas com as atuais. A companhia tem em seus planos a construção de turbinas com pás de 23 ft de comprimento.

A turbina possui três pás e converte a energia eólica em força de rotação que movimenta um par idêntico de geradores por indução. Além disso um motor hidráulico mantém a turbina sempre na direção do vento todo o tempo. Um anemoscópio identifica a direção do vento e manda um sinal para o controlador do motor hidráulico para que a turbina seja movida para a direção do vento. Esse fato evita que o vento insida sobre as pás numa direção que tenda a fletir as pás como ocorria nas antigas turbinas sem esse dispositivo. Nessas turbinas, o rotor girava livremente pelo vento

O anemômetro envia um signal ao controlador que liga o desliga a turbina em função da velocidade do vento. A faixa de trabalho da turbina fica entre ventos de 14,5 e 104 Km/h (4 e 29 m/s). Essa é uma melhora significativa quando comparada com as turbinas atuais, e mesmo com o projeto anterior da empresa que exigia ventos entre 17,5 e 70,5 Km/h (4,9 e 19,5 m/s). Essa característica de trabalhar com uma faixa maior de ventos significa uma aumento na capacidade de gerar energia, além de permitir o desenvolvimento da energia eólica em novas regiões.

O desligamento automático da turbina e a alteração do ângulo das pás (o vento atravessa pelo meio) viza protege-la de possíveis danos que possam ocorrer durante condições extremas de vento. O ângulo das pás é controlado por um ariete hidráulico que atua diretamente sobre um sistema articulado no cubo do rotor. O ângulo das pás é controlado automaticamente buscando a eficiência ótima para todas as velocidades de vento.

Um importante aspecto dessa nova turbina é sua habilidade em operar acima do amplo limite de velocidades de rotação. Isso ocorre graças a um módulo eletrônico acoplado na base da torre da turbina. Esse módulo converte as várias frequência de saída do gerador em sinas de frequência de

60 Hz. No caso de tempestades, as antigas turbinas tinham de resistir ao aumento excessivo de torque e fadiga dinâmica que ocasionavam em stress do material. Nas novas turbinas, com a redução desses fatores foi possível desenvolver componentes móveis e estruturas mais baratas e mais leves.

O módulo eletrônico também é capaz de controlar as operações da planta no que se refere as condições atuais e futuras reações dos componentes responsáveis pela geração de energia, aumentando a eficiência da transmissão e estabilidade da voltagem. O aumento da monitoração da planta pelo controlador é importante porque a proximidade dos geradores com as turbinas de vento induz neste a atração de uma quantidade muito grande de força reativa presente no sistema. Assim a presença desse módulo pode eliminar a necessidade de muitos capacitores corretivos na linha de transmissão.

Outra vantagem adicional construtiva dos módulos eletrônicos é uma grande redução no potencial na indução de harmônicos na linha.

Os principais componentes dessa turbina de vento estão localizados no topo da torre protegida por uma carcaça de fiberglass. Essa carcaça é grande o suficiente para permitir a entrada de pessoas responsáveis pela manutenção e reparos. O equipamentos contidos no interior da carcaça são:

- microprocessador responsável pelo controle da velocidade da turbina e do passo das pás.
- caixa de engrenagens
- sistema móvel do ariete hidráulico
- sistema hidráulico do ângulo das pás
- dois geradores de 480V

Para finalizar, essas turbinas e muitas outras com potências variando de 15 KW a 1MW podem ser encontradas em anúncios de revistas pois já são produzidas em série e apresentam preços comercialmente competitivos se comparados com tecnologias convencionais de geração de energia.



## 2 - Projeto de um gerador eólico

### 2.1 - Considerações gerais

Na parte anterior deste estudo foram mostradas várias configurações existentes de máquinas eólicas, suas diversas aplicações e algumas vantagens e desvantagens das mesmas. A partir deste conhecimento, deve ser escolhido um sistema eólico adequado precedido de um estudo de viabilidade de sua implantação de forma a compatibilizar o potencial eólico da região com as necessidades energéticas existentes. Em seguida, deve ser definida a configuração do sistema eólico a ser implantado, isto é, são determinadas sua geometria e condições de operação, para finalmente passar para a etapa de projeto, onde serão definidas as dimensões e especificações dos diversos componentes mecânicos. Essas fases podem ser vistas no fluxograma a seguir:

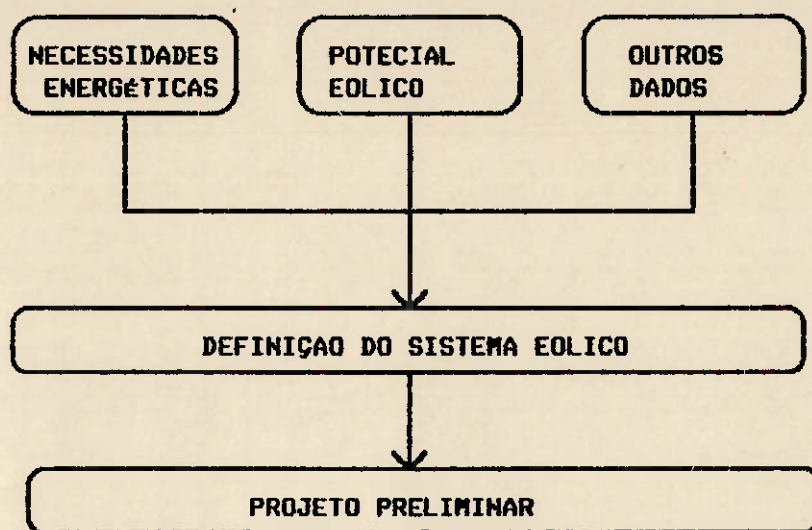


Fig 2.1.1 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DE PROJETO

Levando em conta as muitas configurações existentes e seus extensos desdobramentos, a escolha de uma dessas configurações torna-se necessária para uma melhor e mais completa apreciação do problema, sendo possível ainda a execução de uma etapa intermediária com a finalidade de entender-se melhor como esta escolha é feita de acordo com as diversas necessidades. Esta etapa intermediária será retratada superficialmente nos dois sub-ítems a seguir, apenas para referência e melhor encadeamento lógico, partindo logo em seguida para a abordagem de um problema prático que consistirá na análise do principal componente de uma máquina eólica : o projeto das pás e a sua influência no desempenho global da máquina.

### 2.1.1 - Escolha do sistema eólico



Dadas as necessidades e o potencial eólico disponível para uma dada região, é possível direcionar a escolha do sistema eólico adequado levando em conta as características dos diversos sistemas existentes com relação ao seu desempenho em função destes fatores.

Como já foi apresentado, máquinas eólicas de eixo vertical possuem eficiências mais baixas quando comparadas às de eixo horizontal, além de apresentarem seus maiores rendimentos para valores baixos de velocidade específica ( Define-se velocidade específica como sendo a relação entre a velocidade periférica na ponta das pás da máquina eólica e a velocidade do vento). As máquinas de eixo horizontal, por sua vez, apresentam suas maiores eficiências para valores altos de velocidade específica, o que favorece o aproveitamento de ventos de maior intensidade. Em outras palavras, regiões que possuem ventos fortes e constantes ou que precisem de maiores velocidades de rotação no eixo, como é o caso da utilização de geradores elétricos acoplados ao eixo girante da máquina eólica , é indicada a utilização de máquinas de eixo horizontal, adotando-se altas velocidades específicas para limitar ao máximo a relação de transmissão entre o gerador e a máquina eólica. Se por outro lado se deseja por exemplo construir uma máquina para bombeamento de água em uma determinada região ou se os ventos forem mais fracos, deve-se adotar uma máquina de eixo vertical ou uma máquina de eixo horizontal denominada "lenta" , as quais possuem velocidades específicas mais baixas.

### 2.1.2 - Sistema eólico para geração de energia elétrica

Considerando o que foi discutido no sub-ítem anterior é possível afirmar que uma máquina eólica de eixo horizontal pode ser considerada o sistema mais adequado a ser adotado para produção de energia elétrica podendo ser escolhida como objeto do nosso desenvolvimento de agora em diante, uma vez que é indiscutível a importância que as máquinas eólicas vem assumindo como fonte alternativa de geração de eletricidade.

Do projeto da máquina em si, as pás constituem o elemento que apresenta maior desafio em termos de desenvolvimento, possibilitando uma otimização do desempenho de toda a máquina baseada no estudo do seu formato assim como posicionamento das mesmas em relação ao vento. De fato, nota-se que os maiores avanços na área de geradores eólicos foram os relacionados a geometria, materiais constituintes, controle de inclinação e tamanho de suas pás motoras ( Ver seção sobre atualidade das máquinas eólicas na parte I deste trabalho que contem uma coletânea de artigos bem atuais sobre o assunto). Procuraremos concentrar o restante deste estudo para apreciação destes pontos, esperando esclarecer sobre a influência destes fatores no desempenho global da máquina eólica e estudar formas de otimizá-los.

### 2.2 - Considerações sobre os cálculos das pás para máquinas eólicas de eixo horizontal



Para a construção de um gerador eólico deve-se levar em conta as velocidades de vento para as quais ele irá trabalhar assim como a potência que este deverá fornecer. Para a construção de um aerogerador deve-se utilizar uma velocidade específica alta, por exemplo entre 5 e 8, de forma a limitar o coeficiente de multiplicação de velocidades do eixo da máquina eólica para o gerador elétrico, conforme já foi mencionado. Na prática, a faixa de velocidades específicas escolhida já define o número de pás que a máquina eólica deverá ter, conforme a tabela a seguir:

Vel. específica	Núm. de pás
1	8 a 24
2	6 a 12
3	3 a 6
4	2 a 4
$\geq 5$	2 a 3

Fig. 2.2.1 - Número de pás de uma Eólica

O comprimento das pás ou diâmetro do rotor será definido pela potência e velocidade do vento, de acordo com uma estimativa empírica de potência média baseada na teoria de Betz desenvolvida na parte 1 deste estudo:

$$P = 0.20D^2V^3$$

Os perfis normalmente utilizados são perfis plano convexos ou biconvexos não simétricos ( NACA 4412, 4413, 4418, 23012, 23015, 23018)

É ainda necessário definir a largura do perfil em função da distância ao eixo de rotação e o ângulo de inclinação das pás, o que necessita a adoção de uma das teorias existentes para estudo do comportamento aerodinâmico das mesmas. Feito isso, a abordagem passará a ser dinâmica, isto é, será discutido como alterar o posicionamento dessas pás (inclinação) em relação ao vento para obter melhores eficiências da máquina eólica respondendo a variações na velocidade do vento incidente sobre a mesma.

### 2.3 - Teoria simplificada para cálculos relativos às pás

Esta teoria tem como finalidade o desenvolvimento de expressões que determinem a influência da largura da pá e da inclinação desta em relação ao vento na eficiência da máquina eólica, bem como a obtenção de valores ótimos para o projeto. Devido a simplicidade do modelo a seguir, será desenvolvida uma outra teoria posteriormente levando em conta efeitos de turbilhões induzidos pelas pontas das pás e pelo eixo de rotação da máquina, servindo portanto esta teoria como uma referência ou, em outras palavras, como uma análise inicial que, como veremos adiante, trará resultados muito bons apesar de sua simplicidade.



### 2.3.1 - Determinação de uma relação para o cálculo da largura das pás

Para determinar a largura das pás nós avaliaremos, o empuxo axial sobre o perfil compreendidos entre  $r$  e  $r+dr$  nas condições ótimas de funcionamento de duas formas

#### Primeira avaliação

Pela teoria de Euler, temos que o valor empuxo axial total sobre o conjunto da máquina eólica é igual a:

$$F = \rho Q(V_1 - V_2) = \rho S V (V_1 - V_2)$$

$$\text{porém } V = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

$$\text{resultando que } F = \frac{1}{2} \rho S (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.1)$$

onde  $V_1$  = velocidade à montante do rotor

$V_2$  = velocidade à jusante do rotor

(Esse resultado é demonstrado também na teoria de Betz).

A velocidade do vento ao atravessar a máquina eólica é

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (2.2)$$

A potência máxima ocorre para  $V_2 = \frac{V_1}{3}$

Então temos

$$F = \frac{4\rho S}{9} V_1^2 \quad (2.3)$$

e

$$V = \frac{2}{3} V_1 \quad (2.4)$$

e como consequência

$$F = \rho S V^2 \quad (2.5)$$

Admitindo que cada elemento da superfície da pá contribua proporcionalmente a sua área no empuxo axial. A contribuição desse empuxo dos elementos compreendidos entre as distâncias  $r$  e  $r+dr$  é :

$$dF = \rho V^2 dS = \rho V^2 (2\pi r dr) \quad (2.6)$$



Segunda avaliação

A velocidade de rotação ( $\omega$ ), a velocidade de arraste dos elementos das pás compreendidos entre os cilindros de raios  $r$  e  $r + dr$  é  $U=r\omega$ . Entre a velocidade absoluta absoluta do vento  $\vec{V}$  no momento em que atravessa a máquina eólica, a velocidade relativa do vento  $\vec{W}$  em relação aos perfis de asa considerados e a velocidade de arraste  $\vec{U}$  existe a relação:

$$\vec{V} = \vec{W} + \vec{U} \quad (2.7)$$

ou

$$\vec{W} = \vec{V} - \vec{U}$$

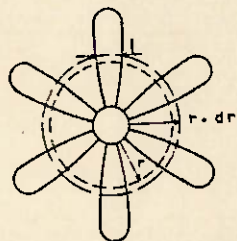


Fig. 2.3.1 - Esquema do Rotor

Representemos em corte um elemento de pá de comprimento  $dr$ . Avaliando os esforços aerodinâmicos aos quais ele está submetido, se obtém para a sustentação e o arraste elementares os valores:

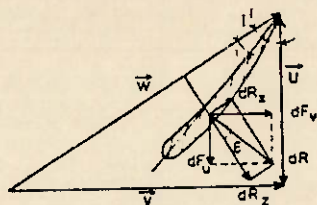


Fig. 2.3.2 - Seção da pá

$$dR_z = \frac{1}{2} \rho C_z W^2 l dr \quad (2.8)$$

$$dR_x = \frac{1}{2} \rho C_x W^2 l dr \quad (2.9)$$

e como resultado

$$dR = \frac{dR_z}{\cos \epsilon} \quad (2.10)$$

Onde  $\epsilon$  é o ângulo determinado pelas direções  $dR$  e  $dR_z$ , e  $l$  é a corda do perfil à distância  $r$ .

Observando que:

$$W = \frac{V}{\sin I} \quad (2.11)$$



Concluimos que

$$dR = \frac{1}{2} \rho C_z \frac{W^2 l}{\cos \varepsilon} dR = \frac{1}{2} \rho C_z \frac{V^2 l dr}{\sin^2 I \cos \varepsilon} \quad (2.12)$$

Projetemos  $dR$  sobre a direção do eixo de rotação e calculemos a contribuição  $dF$  dos perfis compreendidos entre os cilindros de raio  $r$  e  $r+dr$  no empuxo axial exercido sobre a máquina eólica.

Denotando por  $p$  o número de pás obtemos

$$dF = \frac{1}{2} \rho C_z p \frac{V^2 (\cos(I - \varepsilon) l dr)}{\sin^2 I \cos \varepsilon} \quad (2.13)$$

Igualando a relação acima com a expressão da equação ( 2.6 ) temos

$$C_z p l = 4 \pi r \frac{\sin^2 I \cos \varepsilon}{\cos(I - \varepsilon)} \quad (2.14)$$

### 2.3.2 - Estudo da relação obtida - simplificação

A relação obtida na equação (2.14) é de caráter geral, porém pouco funcional. Assim, vamos introduzir algumas hipóteses simplificadoras, com o objetivo de tornar a equação mais prática. Essas hipóteses são feitas de modo

a restringir o cálculo em torno do ponto ótimo de funcionamento, tornando possível obter-se os valores da largura da pá em função do raio.

A relação ( 2.14 ) pode ainda ser escrita desenvolvendo o  $\cos(I-\epsilon)$

$$C_{zpl} = 4\pi r \frac{\operatorname{tg}^2 I \cos I}{1 - \operatorname{tg} \epsilon \operatorname{tg} I} \quad (2.15)$$

Nas condições ótimas de funcionamento a velocidade do vento atravessando o rotor é  $V = \frac{2}{3} V_1$ , sendo  $V_1$  a velocidade do vento à montante. O ângulo de inclinação  $I$  é então relacionado à velocidade do vento  $V_1$  pela expressão

$$\cot g I = \frac{\omega r}{V_1} = \frac{3 \omega r}{2 V_1} = \frac{3}{2} \lambda \quad (2.16)$$

Substituindo-se a expressão ( 2.16 ) na expressão ( 2.15 ) utilizando as funções senoidais do ângulo  $I$  pelos valores em função de  $\lambda$ , obtemos

$$C_{zpl} = \frac{16\pi}{9} \frac{r}{\lambda \sqrt{\lambda^2 + \frac{4}{9}} \left(1 + \frac{2}{3} \operatorname{tg} \epsilon\right)} \quad (2.17)$$



onde  $\lambda$  = velocidade específica para cada  $r$

Em condições normais de utilização o valor de

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{dR_x}{dR_z} = \frac{C_x}{C_z} \quad (2.18)$$

é em geral extremamente baixo

Para incidências próximas a incidência ótima e para perfis aerodinâmicos usuais,  $\operatorname{tg} \varepsilon$  é da ordem de 0.005, e como consequência simplificamos a relação ( 2.18 ) para

$$C_{zpl} = \frac{16\pi}{9} \frac{r}{\lambda \sqrt{\lambda^2 + \frac{4}{9}}} \quad (2.19)$$

A relação entre as velocidades específicas  $\lambda$  e a velocidade no extremo da pá  $\lambda_0 = \frac{\omega R}{V_1}$  estão ligadas entre si através da expressão

$$\lambda = \lambda_0 \frac{r}{R} \quad (2.20)$$

Levando este valor na expressão ( 2.19 ) obtem-se

$$C_{zpl} = \frac{16\pi}{9} \frac{R}{\lambda_0 \sqrt{\lambda_0^2 \frac{r^2}{R^2} + \frac{4}{9}}} \quad (2.21)$$

### 2.3.3 - Aplicação ao cálculo da largura das pás - princípio do cálculo e observação

Com a expressão obtida no item anterior, pode-se desenvolver um procedimento de cálculo para a largura da pá ao longo do perfil, como segue abaixo.

A velocidade específica e o diâmetro da máquina eólica sendo conhecidos, o ângulo de inclinação  $I$  pode ser calculado para cada valor de  $r$  pela relação

$$\cot g I = \frac{3}{2} \lambda = \frac{3\lambda_0 r}{2R} \quad (2.22)$$

Se o ângulo de inclinação da pá em relação ao plano de rotação  $\alpha$  é fixado, o ângulo de incidência  $i$  também fica determinado ( $i = I - \alpha$ ).

É possível obter com ajuda das curvas características do perfil o valor de  $C_z$ . Se o número de pás  $p$  é dado, a expressão ( 2.21 ) de  $C_{zpl}$



permite então calcular sem dificuldades a largura  $l$  das diversas pás em função da distância  $r$  ao eixo.

A expressão que calcula o valor de  $C_{xpl}$  mostra que a largura  $l$  do perfil à distância  $r$  do eixo decresce com o aumento da velocidade específica  $\lambda_0$ , significando que a velocidade de rotação  $\omega$  é importante. Assim, as máquinas serão mais leves à medida que elas giram mais rápido.

A relação indica igualmente que se o valor de  $C_x$  ficar constante ao longo da pá, a largura  $l$  cresce da extremidade da pá para o cubo do rotor. É conveniente assinalar que isso é passível de distorções. Em certas máquinas, o valor de  $C_x$  varia de uma extremidade à outra da pá, indicando que a largura da pá não decresce forçosamente à medida em que a distância ao eixo aumenta.

#### 2.3.4 - Rendimento aerodinâmico teórico do elemento de pá.

##### ângulo de incidência ótimo

A partir do estudo do ângulo de inclinação  $I$  e de  $tgs$  (que depende do ângulo de incidência  $I$ ) de um elemento de pá é possível definir o rendimento aerodinâmico teórico desse elemento em função desses parâmetros. A partir desse resultado determina-se a situação em que esse rendimento é máximo.

É possível definir o rendimento aerodinâmico do elemento de pá compreendido entre as distâncias  $r$  e  $r+dr$  como a relação entre a potência útil comunicada à pá e a potência total fornecida pelo vento atuando sobre este elemento

$$\eta = \frac{dP_u}{dP_t} = \frac{\omega(dM)}{V(dF_v)} = \frac{U(dF_u)}{V(dF_v)} \quad (2.23)$$

onde  $dF_u$  e  $dF_v$  são as respectivas projeções das resultantes aerodinâmicas sobre o plano de rotação da pá e sobre o eixo da hélice.

$$dF_u = dR_z \sin I - dR_x \cos I \quad (2.24)$$

$$dF_v = dR_z \cos I + dR_x \sin I \quad (2.25)$$

$$\cotg I = \frac{U}{V}$$

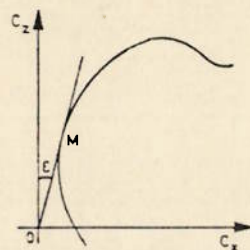


Fig. 2.3.3 - Polar de um Perfil

com isso, o rendimento do elementar procurado é:

$$\eta = \frac{dR_z \sin I - dR_x \cos I}{dR_z \cos I + dR_x \sin I} \cotg I \quad (2.26)$$



A partir da expressão ( 2.18 ) temos

$$\text{tgs} = \frac{dR_x}{dR_z} = \frac{C_x}{C_z}$$

o que resulta em:

$$\eta = \frac{1 - \text{tgs} \cot g I}{\cot g I + \text{tgs}} \cot g I = \frac{1 - \text{tgs} \cot g I}{1 + \text{tgs} \cdot \text{tg} I} \quad (2.27)$$

Quanto menor o valor de  $\text{tgs}$ , melhor é o rendimento. No limite se  $\text{tgs}$  for igual a zero, o rendimento aerodinâmico será igual a um. Na realidade o valor de  $\text{tgs}$  é fixado pelo valor do ângulo de incidência  $i$ . A curva do perfil mostra que  $\text{tgs}$  é mínima para incidência relativa ao seu ponto de tangência com a reta OM ( ver figura anterior). Para este valor particular de incidência o rendimento aerodinâmico é máximo.

#### 2.4 - Teoria Turbilhonar de Glauert aperfeiçoada pelos pesquisadores da universidade de AMHERST (Massachussets).

Apesar dos bons resultados obtidos a partir da teoria anterior ainda torna-se necessário considerar os efeitos de turbilhões presentes nos

extremos das pás e no centro do eixo de rotação. Além disso o desenvolvimento dessa teoria tem como consequência a definição do coeficiente de potência  $C_p$  para a eólica.

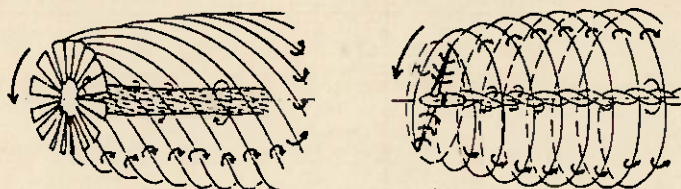
#### 2.4.1 - Sistema turbilhonar associado as pás

Assim como para os perfis de asa de envergadura limitada, existe a jusante de uma pá de hélice uma camada de turbilhões livres constituída essencialmente de 2 turbilhões marginais nascendo um perto do eixo da hélice e outro na extremidade da pá. Os turbilhões marginais das extremidades se enrolam em volta de hélices geométricas desprendendo-se das extremidades das pás. O raio dessas hélices crescem até se estabilizar num certo valor. Os turbilhões marginais que nascem no cubo do rotor se enrolam também em espiral ao redor do eixo do mesmo.

Por outro lado, do ponto de vista aerodinâmico esses turbilhões das extremidades podem ser substituídos pela determinação dos campos de velocidades associados dos mesmos, os quais giram em torno das próprias pás.

O conjunto dos sistemas turbilhonares pode ser esquematizado pelas figuras a seguir :





Eólica lenta

Eólica rápida

Fig. 2.4.1 - Sistemas de Turbilhões

Num ponto fixo pode-se considerar que a velocidade do ar é a resultante do vento natural e da velocidade induzida pelo sistema turbilhonar.

O campo de velocidades induzido pelo sistema turbilhonar pode ser considerado como resultante da superposição dos três sistemas turbilhonares seguintes:

- turbilhão central axial sobre o eixo do rotor de circulação  $p\Gamma = \Gamma_0$   
(  $\Gamma$  é a circulação ligada a uma pá;  $p$  = número de pás ).

- turbilhões ligados às pás

- Camada turbilhonar periférica constituída essencialmente pelos turbilhões marginais se enrolando em hélice em volta do eixo do rotor.

### 2.4.2 - Sistema elétrico equivalente- determinação das velocidades induzidas

A mecânica dos fluidos ensina que as velocidades induzidas pelos turbilhões livres ligados podem ser obtidos pela lei de Biot-Savart ou o teorema de Ampere da mesma forma que os campos magnéticos criados por correntes percorrendo circuitos tendo a mesma forma que os tubos turbilhões.

Vamos substituir esse sistema turbilhonar pelo sistema elétrico representado pela figura a seguir:

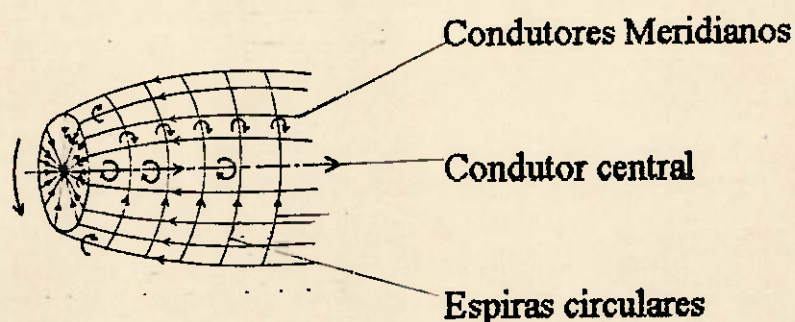


Fig. 2.4.2 - Sistema elétrico equivalente



, constituído por:

- Um condutor central percorrido por uma corrente  $pI = I_0$
- Um conjunto de  $p$  condutores de comprimento  $R$  dispostos em estrela sendo cada um percorrido por uma corrente  $I$  fornecendo em seu ponto comum a corrente  $I_0$  ao condutor precedente.
- Um conjunto de condutores se enrolando em hélice em volta do eixo do rotor fornecendo cada um uma corrente  $I$  aos condutores representativos das pás.

Para o cálculo do campo magnético esta camada pode ser substituída por um conjunto de espiras circulares centradas sobre o eixo da hélice e por um conjunto de condutores situados nos planos meridianos.

Calculemos os campos magnéticos criados por conjuntos de condutores na hipótese das pás estarem em número infinito, o que permite substituir o conjunto dos condutores em estrela por um disco recebendo a corrente  $I_0$  no seu centro.

Determinemos em primeiro lugar o campo magnético criado pelo condutor central, o disco e os condutores meridianos em planos perpendiculares ao eixo de rotação tão próximos quanto possível e colocados um a montante e o outro a jusante do disco representativo das pás.

As linhas de força do campo magnético são círculos centrados sobre o eixo do rotor por razões de simetria tanto a montante do disco quanto a jusante.

A jusante do disco os campos devidos aos diferentes condutores se somam. A montante isso não ocorre.

Convém, por outro lado, que os campos  $H_c$  e  $H_m$  criados pelo condutor central e pelos condutores meridianos respectivamente (teoricamente aqui em número infinito) tenham o mesmo valor a uma distância do eixo, quer se encontrem no plano a montante ou a jusante do disco ou no plano do próprio disco, em razão da pequena distância que separa estes planos.

Aplicando-se o teorema de Ampere a montante do disco ao longo de um círculo centrado sobre o eixo do rotor obtém-se um campo nulo, com nenhuma corrente atravessando o contorno circular considerado. Isso significa que o campo  $H_d$  devido às correntes que percorrem o disco é igual em amplitude e de direção oposta aos campos criados pelo condutor central e os condutores situados nos planos meridianos

$$H_d = H_c + H_m \quad (2.28)$$

A jusante estes diferentes campos se somam, sendo o campo resultante à mesma distância  $r$  do eixo

$$H = H_d + H_c + H_m = 2H_d \quad (2.29)$$



Os campos criados pelo disco e pelo condutor central e os condutores meridianos têm de fato o mesmo valor, dado que os planos são muito próximos.

No próprio plano do disco, o campo devido às correntes que percorrem o disco é nulo. Em cada ponto deste plano, se pode de fato associar ao campo criado por um setor angular elementar o campo oposto, criado pelo setor angular elementar simétrico em relação à reta que une o ponto considerado ao centro do disco.

Segue-se que o campo resultante no plano do disco à distância  $r$  do eixo de rotação tem por valor:

$$H = H_c + H_m = H_d \quad (2.30)$$

Onde  $H_d$  é a intensidade do campo magnético tangencial criado pelo disco na sua vizinhança imediata à distância  $r$  do centro.

Consideremos agora o campo criado pelas espiras circulares.

É conhecido que no centro de um solenóide o campo axial tem intensidade

$$H_s = n I \quad (2.31)$$

, onde  $n$  é o número de espiras por unidade de comprimento.

Na extremidade do solenóide, o campo axial igualmente vale

$$\frac{H_s}{2} = \frac{nI}{2} \quad (2.32)$$

Voltemos agora ao problema real da máquina eólica.

A jusante do disco, ao campo  $2H_d$  perpendicular ao eixo corresponde uma velocidade tangencial induzida  $v_\theta$ . Se observa uma rotação da linha de escoamento à velocidade angular  $\Omega$  no sentido contrário ao de rotação das pás. No plano do disco, ao campo  $H_d$  corresponde uma velocidade tangencial induzida  $\frac{v_\theta}{2}$  portanto uma velocidade angular  $\frac{\Omega}{2}$ .

A montante do disco, o campo resultante sendo nulo, a velocidade angular de rotação da linha de escoamento é nula.

Vamos chamar de  $v$  a velocidade axial induzida a jusante da máquina eólica pelos sistemas turbilhonares. Essa velocidade induzida que corresponde ao campo axial  $nI$  mencionado anteriormente é dirigida no sentido contrário ao da velocidade  $V_1$ . No plano de rotação da hélice a velocidade axial induzida aumenta a  $\frac{v}{2}$ , tendo o campo magnético correspondente  $\frac{nI}{2}$ .

Em definitivo a velocidade axial resultante tem por intensidade:

$$V = V_1 - \frac{v}{2} \text{ ao atravessar o rotor}$$

$$V_2 = V_1 - v \text{ à jusante do rotor}$$



Eliminando  $V$  das duas expressões, verifica-se que a relação de Betz ainda é válida, conforme mostrada na equação II.

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

A velocidade de rotação da linha de escoamento em relação às pás, a jusante da máquina eólica aumenta a  $\omega + \Omega$ .

$$\text{Seja } \omega + \Omega = h\omega \Rightarrow \Omega = (h - 1)\omega \quad (2.33)$$

Nessas condições, a velocidade de rotação das linhas de escoamento do fluido em relação às pás, ao atravessar o rotor, que vale  $\omega + \frac{\Omega}{2}$ , pode ser escrita como:

$$\omega + \frac{\Omega}{2} = \left(\frac{h+1}{2}\right)\omega \quad (2.34)$$

A uma distância  $r$  do eixo de rotação, corresponde a uma velocidade tangencial de:

$$U' = \left(\frac{h+1}{2}\right)\omega r \quad (2.35)$$

Fazendo  $V_2 = kV_1$ , a velocidade axial  $V$  ao atravessar o rotor, pode ser escrita como:

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} = \frac{1+k}{2} V_1 \quad (2.36)$$

A cotangente do ângulo de inclinação  $I$  e a velocidade relativa  $\bar{W} = \bar{V} - \bar{U}'$  à distância  $r$  do eixo são dadas então pelas seguintes expressões:

$$\cot g I = \frac{U'}{V} = \frac{\omega r (h+1)}{V_1 (k+1)} = \lambda \frac{(h+1)}{(k+1)} = \lambda_e \quad (2.37)$$

$$W = \frac{V}{\sin I} \Rightarrow W = \frac{V_1 (1+k)}{2 \sin I} = \frac{\omega r (1+h)}{2 \cos I} \quad (2.38)$$

#### 2.4.3 - Avaliação dos esforços axiais e tangenciais. Cálculo do momento.

O objetivo desse procedimento é encaminhar o desenvolvimento da expressão referente ao coeficiente de potência da eólica.

Considerando o elemento de pá compreendido entre as distâncias  $r$  e  $r+dr$ , vamos calcular os esforços sobre esse elemento de duas maneiras. Em primeiro lugar considerando a ação aerodinâmica direta e a seguir pelos teoremas gerais da mecânica.



Primeira Avaliação:

Utilizando as equações (2.8) e (2.9) definidas no modelo anterior, temos:

$$dR_z = \frac{1}{2} \rho C_z W^2 l dr$$

$$dR_x = \frac{1}{2} \rho C_x W^2 l dr$$

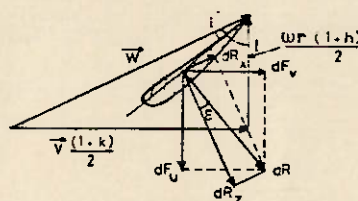


Fig. 2.4.3 - Seção da pá

Daqui resulta por projeção das forças de arrasto e de sustentação sobre o eixo do rotor, para a componente axial:

$$dF_v = dR_z \cos I + dR_x \sin I = \frac{1}{2} \rho l W^2 dr (C_z \cos I + C_x \sin I) \quad (2.39)$$

e por projeção das mesmas sobre a velocidade  $U'$  para a componente tangencial

$$dF_u = dR_z \sin I - dR_x \cos I = \frac{1}{2} \rho l W^2 dr (C_z \sin I - C_x \cos I) \quad (2.40)$$

Da equação (2.18),  $\operatorname{tg} s = \frac{dR_x}{dR_z} = \frac{C_x}{C_z}$

podemos reescrever as expressões acima como:

$$dF_v = \frac{1}{2} \rho l W^2 C_z \frac{\cos(I - \varepsilon)}{\cos \varepsilon} dr \quad (2.41)$$

$$dF_u = \frac{1}{2} \rho l W^2 C_z \frac{\sin(I - \varepsilon)}{\cos \varepsilon} dr \quad (2.42)$$

A contribuição dos elementos de pá do rotor situados entre a distância  $r$  e  $r+dr$  totalizam o empuxo axial elementar e o momento elementar, respectivamente.

$$dF = p(dF_v) = \frac{1}{2} \rho p l W^2 C_z \frac{\cos(I - \varepsilon)}{\cos \varepsilon} dr \quad (2.43)$$

$$dM = r p(dF_u) = \frac{1}{2} \rho p l r W^2 C_z \frac{\sin(I - \varepsilon)}{\cos \varepsilon} dr \quad (2.44)$$

### Segunda Avaliação

Vamos avaliar agora esses dois valores, aplicando os teoremas gerais da mecânica às linhas de escoamento fluido anular que atravessam o rotor entre os círculos de raio  $r$  e  $r+dr$ .



Aplicando o teorema de Euler obtemos para o empuxo axial elementar:

$$dF = \rho \pi r dr V_1 (1 - k^2) \quad (2.45)$$

e para o momento elementar,

$$dM = \rho \pi r^3 dr V_1 (1 + k) \Omega = \rho \pi r^3 dr V_1 \omega (1 + k) (h - 1) \quad (2.46)$$

igualando os valores de  $dF$  obtidos nos dois métodos, e substituindo o valor de  $W$  (equação 2.38) pelo seu valor em função de  $V_1$ , temos respectivamente.

$$C_{zpl} = \frac{2\pi r V_1 (1 - k^2) \cos \varepsilon}{W^2 \cos(I - \varepsilon)} \quad (2.47)$$

$$C_{zpl} = \frac{8\pi r (1 - k) \cos \varepsilon \sin^2 I}{(1 + k) \cos(I - \varepsilon)} \quad (2.48)$$

Procedendo da mesma forma para  $dM$ , temos:

$$C_{zpl} = \frac{2\pi \omega r V_1 (1 + k) (h - 1) \cos \varepsilon}{W^2 \sin(I - \varepsilon)} \quad (2.49)$$

$$C_{zpl} = \frac{4\pi r (h - 1) \cos \varepsilon \sin 2I}{(h + 1) \sin(I - \varepsilon)} \quad (2.50)$$

Dessas igualdades, podemos tirar as seguintes relações:

$$G = \frac{1-k}{1+k} = \frac{C_{zpl} \cos(I-s)}{8\pi r \cos s \sin^2 I} \quad (2.51)$$

$$E = \frac{h-1}{h+1} = \frac{C_{zpl} \sin(I-s)}{4\pi r \sin 2I \cos s} \quad (2.52)$$

Dividindo membro a membro, obtemos que:

$$\frac{G}{E} = \frac{(1-k)(1+h)}{(1+k)(h-1)} = \cot g(I-s) \cot g I \quad (2.53)$$

Esse resultado servirá posteriormente para simplificar a expressão do coeficiente de potência (definido no próximo item), para um rotor ideal.

#### 2.4.4 - Coeficiente de Potência Local

A potência suscetível extraída das linhas de escoamento do fluido elementar que atravessam o rotor entre os círculos de raios  $r$  e  $r+dr$  é dada pela expressão:

$$dP = \omega dM = \rho \pi r^3 dr \omega^2 V_1 (1+k)(h-1) \quad (2.54)$$

Esse valor corresponde a um coeficiente de potência local.

$$C_p = \frac{dP}{\rho \pi r dr V_1^3} = \frac{\omega^2 r^2}{V_1^2} (1+k)(h-1) = \lambda^2 (1+k)(h-1) \quad (2.55)$$

$$\text{onde } \lambda = \frac{\omega r}{V_1}$$

Valor máximo do coeficiente de potência local de um rotor ideal.

Vamos determinar o valor máximo que pode tomar o coeficiente de potência. Com esse objetivo consideremos um rotor ideal com pás de perfil de arrasto nulo ( $C_x = 0 \Rightarrow \operatorname{tg} \varepsilon = \frac{C_x}{C_z} = 0$ ). Nesse caso particular a relação

G/E se escreve

$$\frac{G}{E} = \frac{(1-k)(h+1)}{(h-1)(1+k)} = \cot g^2 I = \lambda^2 \frac{(1+h)^2}{(1+k)^2} \quad (2.56)$$

$$\text{onde tiramos } \lambda^2 = \frac{1-k^2}{h^2-1} \quad (2.57)$$

levando para a expressão de  $C_p$  o valor de  $h$  tirado da expressão anterior temos:

$$h = \sqrt{1 + \frac{1-k^2}{\lambda^2}} \quad (2.58)$$

$$C_p = \lambda^2 (1+k) \left( \sqrt{1 + \frac{1-k^2}{\lambda^2}} - 1 \right) \quad (2.59)$$



Para um valor de  $\lambda$  dado, o coeficiente de potência atinge o máximo em função de  $k$  quando  $\frac{dC_p}{dk} = 0$ . O cálculo dessa derivada mostra que o valor máximo de  $C_p$  ocorre para um valor de  $k$  tal que:

$$\lambda^2 = \frac{1-3k+4k^3}{3k-1} \Rightarrow 4k^3 - 3k(\lambda^2 + 1) + \lambda^2 + 1 = 0 \quad (2.60)$$

Utilizando um artifício matemático para solução de equações de terceiro grau, fazemos

$$k = \sqrt{\lambda^2 + 1} \cos \theta \quad (2.61)$$

Substituindo  $k$  por esse valor na igualdade anterior e depois dividindo por  $(\lambda^2 + 1)^{3/2}$  temos:

$$4 \cos^3 \theta - 3 \cos \theta + \frac{1}{\sqrt{\lambda^2 + 1}} = 0 \quad (2.62)$$

ou

$$4 \cos^3 \theta - 3 \cos \theta = \cos 3\theta \quad (2.63)$$

Portanto podemos escrever que:

$$\cos 3\theta = -\frac{1}{\sqrt{\lambda^2 + 1}} \quad \text{ou} \quad \cos(3\theta - \pi) = +\frac{1}{\sqrt{\lambda^2 + 1}} \quad (2.64)$$

logo

$$\theta = \frac{1}{3} \arccos \left( \frac{1}{\sqrt{\lambda^2 + 1}} \right) + \frac{\pi}{3} = \frac{1}{3} \arctg \lambda + \frac{\pi}{3} \quad (2.65)$$

Para cada valor de  $\lambda$ , podemos calcular o valor de  $\theta$  correspondente e portanto de  $k$  e por consequência o valor máximo do coeficiente de potência  $C_p$ .

#### 2.4.5 - Valores ótimos do ângulo de inclinação e para a quantidade $C_{zpl}$ .

Obtivemos anteriormente para o ângulo de inclinação  $I$  e para a quantidade  $C_{zpl}$  os seguintes valores:

$$\cot g I = \lambda_s = \lambda \frac{(h+1)}{(k+1)} \quad (2.66)$$

$$C_{zpl} = \frac{8\pi r(1-k) \cos \varepsilon \sin^2 I}{(1+k) \cos(I-\varepsilon)} \quad (2.67)$$

Pelos resultados obtidos no parágrafo anterior o cálculo do ângulo  $\theta$  pode ser efetuado para todo valor de  $\lambda$ . Os valores de  $h, k$ , e por consequência os valores de  $\lambda_s$  e  $I$  podem então ser determinados.

Para calcular os valores da quantidade  $C_{zpl}$ , vamos considerar uma eólica ideal munidas de pás sem arraste, o que significa igualar  $\varepsilon$  a zero na relação anterior.

Nessas condições obtemos para quantidade  $C_{zpl}$ ,

$$C_{zpl} = \left( \frac{8\pi(1-k)}{(1+k)} \right) \operatorname{tg}^2 I \cos I \quad (2.68)$$

considerando  $\cot g I = \lambda_e$

$$\frac{C_{zpl}}{r} = \left( \frac{8\pi(1-k)}{(1+k)} \right) \frac{1}{\lambda_e \sqrt{\lambda_e + 1}} \quad (2.69)$$

As relações acima permitem calcular os valores da quantidade de  $\frac{C_{zpl}}{r}$  e  $I$  para estar nas condições ótimas de funcionamento. O conhecimento dessas quantidades é indispensável para fixar em cada ponto da pá a largura  $I$  do perfil e o ângulo de calage.

Para facilitar a passagem às aplicações os valores de  $\lambda_e, k, h, C_p, \frac{C_{zpl}}{r}, I$  estão descritos na tabela abaixo para valores de  $\lambda$  compreendidos 0.100 e 10.000



$\lambda_e$	k	h	$C_p$	$C_{zpl/r}$	I	$\lambda$	$\lambda_e$	k	h	$C_p$	$C_{zpl/r}$	I
0.670	0.473	8.866	0.116	11.449	56.193	5.000	7.555	0.335	1.018	0.587	0.217	7.540
0.768	0.451	4.574	0.207	9.819	52.460	5.100	7.704	0.335	1.017	0.588	0.029	7.396
0.873	0.432	3.168	0.279	8.600	48.867	5.200	7.853	0.335	1.016	0.588	0.201	7.257
0.984	0.416	2.483	0.336	7.506	45.466	5.300	8.002	0.335	1.016	0.588	0.194	7.123
1.099	0.403	2.086	0.381	6.541	42.290	5.400	8.151	0.335	1.015	0.588	0.187	6.994
1.219	0.393	1.830	0.416	5.700	39.358	5.500	8.300	0.335	1.015	0.588	0.180	6.870
1.343	0.384	1.655	0.444	4.975	36.672	5.600	8.449	0.335	1.014	0.588	0.174	6.750
1.470	0.377	1.530	0.467	4.353	34.227	5.700	8.598	0.335	1.014	0.589	0.168	6.634
1.600	0.371	1.437	0.485	3.841	32.009	5.800	8.747	0.335	1.013	0.589	0.163	6.522
1.732	0.366	1.366	0.500	3.367	30.000	5.900	8.897	0.335	1.013	0.589	0.157	6.413
1.866	0.362	1.311	0.512	2.980	28.183	6.000	9.046	0.335	1.012	0.589	0.152	6.308
2.002	0.359	1.267	0.522	2.648	26.537	6.100	9.195	0.335	1.012	0.589	0.147	6.207
2.140	0.356	1.232	0.531	2.363	25.046	6.200	9.344	0.335	1.011	0.589	0.143	6.108
2.279	0.353	1.203	0.538	2.118	23.692	6.300	9.494	0.335	1.011	0.589	0.138	6.013
2.419	0.351	1.179	0.544	1.906	22.460	6.400	9.643	0.335	1.011	0.589	0.134	5.920
2.560	0.349	1.159	0.549	1.723	21.337	6.500	9.792	0.334	1.010	0.589	0.130	5.831
2.702	0.348	1.142	0.553	1.563	20.310	6.600	9.942	0.334	1.010	0.590	0.126	5.744
2.844	0.346	1.128	0.557	1.423	19.370	6.700	10.091	0.334	1.010	0.590	0.122	5.659
2.988	0.345	1.115	0.560	1.300	18.506	6.800	10.241	0.334	1.010	0.590	0.119	5.577
3.132	0.344	1.105	0.563	1.191	17.710	6.900	10.390	0.334	1.009	0.590	0.116	5.498
3.276	0.343	1.095	0.565	1.095	16.976	7.000	10.539	0.334	1.009	0.590	0.112	5.420
3.421	0.343	1.087	0.568	1.010	16.296	7.100	10.689	0.334	1.009	0.590	0.109	5.345
3.566	0.342	1.080	0.570	0.934	15.666	7.200	10.838	0.334	1.009	0.590	0.106	5.271
3.711	0.341	1.074	0.571	0.865	15.080	7.300	10.988	0.334	1.008	0.590	0.103	5.200
3.857	0.341	1.068	0.573	0.804	14.534	7.400	11.137	0.334	1.008	0.590	0.101	5.131
4.003	0.340	1.063	0.574	0.749	14.025	7.500	11.287	0.334	1.008	0.590	0.098	5.063
4.150	0.340	1.059	0.576	0.699	13.549	7.600	11.436	0.334	1.008	0.590	0.096	4.997
4.296	0.339	1.055	0.577	0.654	13.103	7.700	11.586	0.334	1.007	0.590	0.093	4.933
4.443	0.339	1.051	0.578	0.613	12.684	7.800	11.735	0.334	1.007	0.590	0.091	4.871
4.590	0.339	1.048	0.579	0.586	12.290	7.900	11.885	0.334	1.007	0.590	0.088	4.810
4.737	0.338	1.045	0.580	0.562	11.919	8.000	12.034	0.334	1.007	0.591	0.086	4.750
4.884	0.338	1.042	0.580	0.541	11.569	8.100	12.184	0.334	1.007	0.591	0.084	4.692
5.032	0.338	1.040	0.581	0.522	11.239	8.200	12.334	0.334	1.007	0.591	0.082	4.635
5.180	0.337	1.038	0.582	0.506	10.926	8.300	12.483	0.334	1.006	0.591	0.080	4.580
5.328	0.337	1.036	0.582	0.491	10.630	8.400	12.633	0.334	1.006	0.591	0.078	4.526
5.476	0.337	1.034	0.583	0.478	10.349	8.500	12.782	0.334	1.006	0.591	0.077	4.473
5.624	0.337	1.032	0.583	0.468	10.083	8.600	12.932	0.334	1.006	0.591	0.075	4.422
5.772	0.337	1.030	0.584	0.460	9.829	8.700	13.082	0.334	1.006	0.591	0.073	4.371
5.920	0.336	1.029	0.584	0.451	9.588	8.800	13.231	0.334	1.006	0.591	0.071	4.322
6.068	0.336	1.027	0.585	0.444	9.358	8.900	13.381	0.334	1.006	0.591	0.070	4.274
6.217	0.336	1.026	0.585	0.439	9.138	9.000	13.531	0.334	1.005	0.591	0.068	4.227
6.365	0.336	1.025	0.585	0.435	8.928	9.100	13.680	0.334	1.005	0.591	0.067	4.181
6.514	0.336	1.024	0.586	0.431	8.728	9.200	13.830	0.334	1.005	0.591	0.065	4.136
6.662	0.336	1.023	0.586	0.428	8.536	9.300	13.980	0.334	1.005	0.591	0.064	4.092
6.811	0.336	1.022	0.586	0.426	8.353	9.400	14.129	0.334	1.005	0.591	0.063	4.048
6.960	0.336	1.021	0.586	0.425	8.177	9.500	14.279	0.334	1.005	0.591	0.061	4.006
7.108	0.336	1.020	0.587	0.425	8.008	9.600	14.429	0.334	1.005	0.591	0.060	3.965
7.257	0.335	1.019	0.587	0.425	7.846	9.700	14.578	0.334	1.005	0.591	0.059	3.924
7.406	0.335	1.018	0.587	0.426	7.690	9.800	14.728	0.334	1.005	0.591	0.058	3.884
						9.900	14.878	0.334	1.005	0.591	0.057	3.845
						10.000	15.028	0.334	1.004	0.591	0.055	3.807

Fig. 2.4.4 - Valores nas condições ótimas de funcionamento

Tendo o valor de  $\lambda_0 = \left(\frac{r}{R}\right) \left(\lambda = \lambda_0 * \left(\frac{r}{R}\right)\right)$ , o valor de  $\lambda$  está

definido. Na tabela temos relacionados outros valores importantes em função do valores de  $\lambda$ . Esses valores mostrados na tabela foram obtidos do ábaco abaixo e das relações desenvolvidas anteriormente.

O diagrama já citado representa as curvas de variação das quantidades  $\frac{C_{zpl}}{r}$  e I em função de  $\lambda$ . Este ábaco permite determinar

rapidamente para uma eólica, em função da posição dos perfis da pá fixada pela relação  $r/R$ , os valores de inclinação  $I$  e os valores que se deve dar à quantidade  $\frac{C_z p l}{r}$  para que a eólica tenha um melhor rendimento para a velocidade específica  $\lambda_0$  escolhida. Conhecendo a velocidade específica  $\lambda_0$  para a qual a eólica deve ter o rendimento máximo, é suficiente traçar pelo ponto de intersecção da reta oblíqua caracterizando a velocidade específica de extremidade  $\lambda_0$  (reta de equação  $\lambda = \lambda_0 \left( \frac{r}{R} \right)$ ) e da horizontal correspondente à posição do perfil fixado para o valor de  $r/R$  uma reta vertical. Essa reta vertical corta as curvas  $I(\lambda)$  e  $\frac{C_z p l}{r}$  em dois pontos cujas ordenadas são os valores de  $I$  e  $\frac{C_z p l}{r}$  procurados.



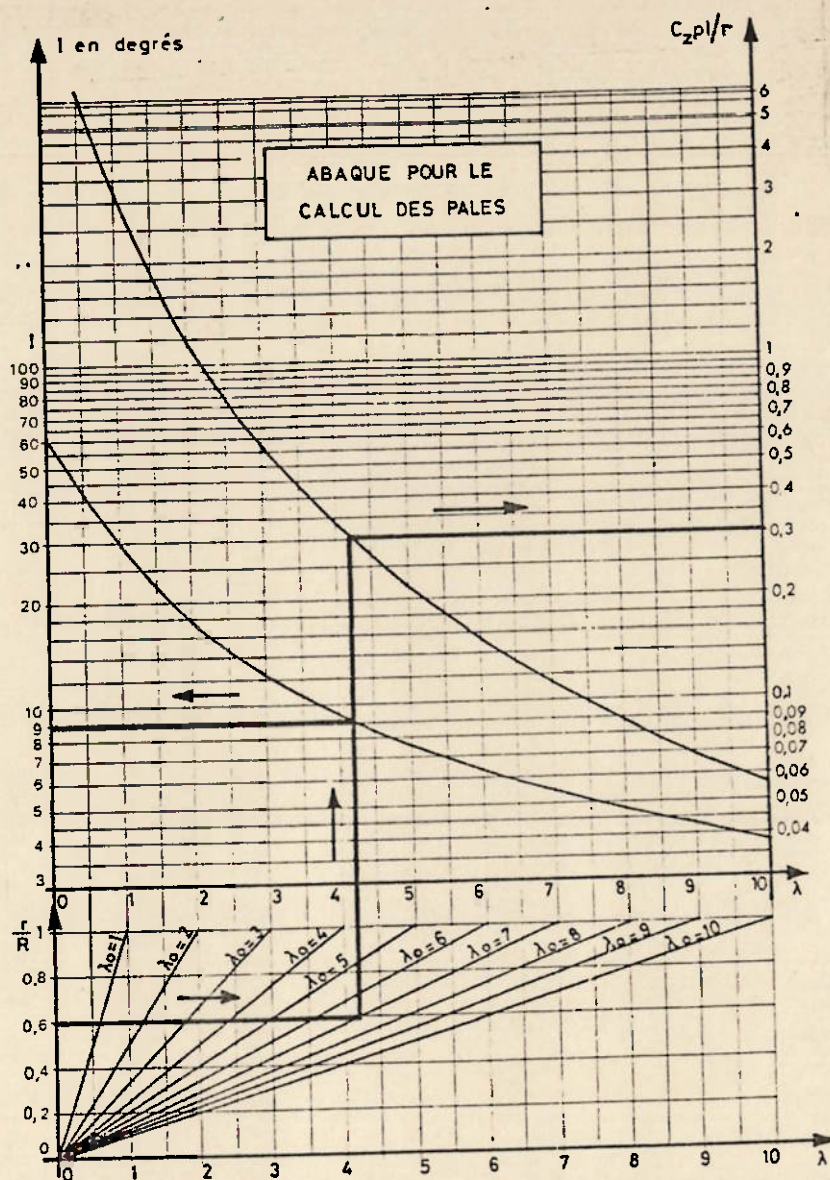


Fig. 2.4.5 - Ábaco para o cálculo das pás

Recomeçando essa operação para outros valores de  $r$ , obtém-se o ângulo de inclinação  $I$  e a quantidade  $\frac{C_{zPl}}{r}$  sobre todo o comprimento da pá. A seguir devemos determinar a profundidade dos diversos perfis e seus



ângulos de calage. a quantidade  $\frac{C_z p l}{r}$  sendo conhecida, a largura  $l$  da pá à distância  $r$ , depende do coeficiente de sustentação  $C_z$  que é função do ângulo de incidência  $i$ .

O mesmo ocorre ao ângulo de calage  $\alpha$  ligado ao ângulo de incidência pela relação  $\alpha = i - i_c$ . Para resolver esse problema, a escolha do ângulo de incidência deve ser efetuada.

#### 2.4.6 - Coeficiente de potência susceptível de ser atingido por pás imperfeitas tendo resistência de arraste. Ângulo de incidência ótimo.

O valor de  $C_p$  obtido anteriormente consideravam as pás como sendo perfeitas (arraste nulo). Nesse item vamos recalcular o valor de  $C_p$  considerando a resistência de arraste da pás.

Considerando elementos de pá compreendidos entre os raios  $r$  e  $r+dr$ , e tendo  $C_p$  definido como:

$$C_p = \frac{\omega dM}{\rho \pi r dr V_1^3} = \frac{V dF}{\rho \pi r dr V_1^3} \frac{\omega dM}{V dF} = \frac{V dF}{\rho \pi r dr V_1^3} \frac{U dF_u}{V dF_v} \quad (2.70)$$

Substituindo  $dF_u$ ,  $dF_v$  e  $V$  pelos valores respectivos e levando em consideração as relações:

$$\cot g I = \lambda \frac{(h+1)}{(k+1)} \quad \text{e} \quad \operatorname{tg} \varepsilon = \frac{C_x}{C_z}$$

obtemos:

$$C_p = \frac{(1+k)(1-k^2)}{(1+h)} * \frac{1 - \operatorname{tg} \varepsilon \cot g I}{1 + \operatorname{tg} \varepsilon \operatorname{tg} I} \quad (2.71)$$

Quando  $\operatorname{tg} \varepsilon = 0$ , o primeiro fator do segundo membro representa o coeficiente de potência à distância  $r$ , de uma eólica perfeita sem arraste nas pás. Este coeficiente é máximo nas condições da tabela apresentada na seção 4.5.

No caso de  $\operatorname{tg} \varepsilon \neq 0$  (arraste não nulo) a figura a seguir indica em função de  $\lambda$ , para diferentes valores de  $C_z/C_x$ , os coeficientes de potência máximos possíveis de serem atingidos.

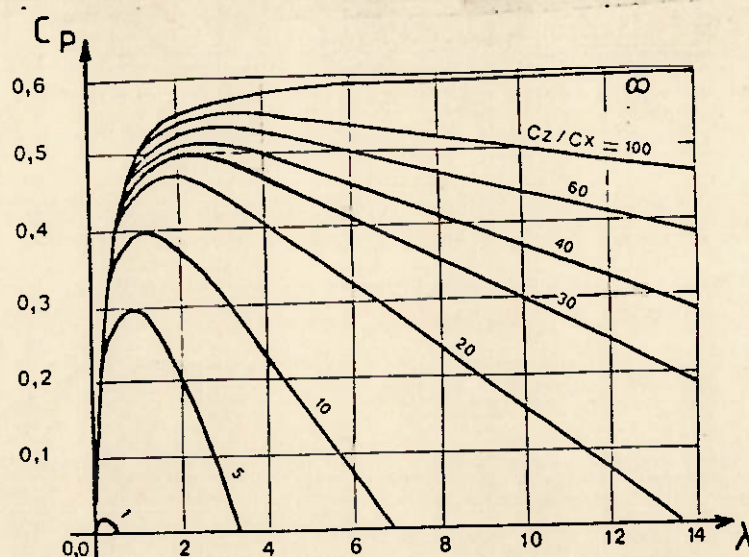


Fig. 2.4.6 - Relação entre  $\lambda$  e  $C_p$

O gráfico mostra que para obter performances elevadas, com grande velocidade específica, é necessário que as pás sejam as mais finas possíveis, o que pressupõe perfis perfeitamente lisos.

Para uma velocidade específica  $\lambda$  dada, o coeficiente de potência é inversamente proporcional a  $t_{ge}$  (maior  $C_p$ , menor  $t_{ge}$ ). Ele será máximo para a incidência que torna  $t_{ge}$  mínimo, isto é, para a incidência que corresponde ao ponto de contato da tangente traçada do ponto 0 à polar do perfil (ponto de menor largura). Reencontramos o resultado obtido pela a teoria simplificada.

#### 2.4.7 - Influência do número de pás.

A teoria anterior pressupõe o número de pás infinitas. Na realidade o número de pás é limitada. Esse fato resulta em perdas de energia devido a uma maior concentração de turbilhões. Essa dissipação de energia foi estudada por Rohrbach, Worobel, Goldstein, Prandtl, resultando numa nova expressão de rendimento, que é desenvolvida abaixo.

Segundo Prandtl, a redução de rendimento resultante, para uma máquina de  $p$  pás é dada por:



$$\eta_p = \left( 1 - \frac{1,39}{p} \operatorname{sen} I \right)^2 \quad (2.72)$$

onde  $I$  é o ângulo de inclinação da extremidade das pás.

Supondo que a eólica trabalhe próxima das condições ótimas, temos que:

$$\operatorname{sen} I = \frac{1}{\sqrt{1 + \cot^2 I}} = \frac{2}{3\sqrt{\lambda_0^2 + \frac{4}{9}}} \quad (2.73)$$

Admitindo que seja possível estender a relação de Prandtl a essas condições, temos que:

$$\eta_p = \left( 1 - \frac{0,93}{p\sqrt{\lambda_0^2 + 0,445}} \right)^2 \quad (2.74)$$

Falando rigorosamente, a relação de Prandtl foi estabelecida para rotores pouco carregados. Na prática, a utilização das relações que obtivemos sobre rotores carregados normalmente, levam a valores de coeficientes de momentos e potência coerentes com os resultados experimentais.

#### 2.4.8 - Determinação da largura das pás e do ângulo de calage

Com as expressões desenvolvidas anteriormente vamos definir um procedimento para determinar a largura das pás e do ângulo de calage ao longo do perfil.

Não existe um método estabelecido e único para escolha dos ângulos de incidência e por consequência, para definir as pás.

Essas podem evidentemente serem calculadas escolhendo para ângulo de incidência todas as seções e a incidência ótima correspondente a menor largura. O valor da quantidade  $C_{zpl}$  sendo conhecido para todos os perfis, a determinação da largura  $l$  não oferece nenhuma dificuldade. O conhecimento do ângulo de inclinação  $I$  e do ângulo de incidência  $i$ , implica imediatamente no ângulo de calage  $\alpha$  ( $\alpha = I - i$ ).

Este método nunca foi completamente aplicado. De fato se uma incidência igual ou próxima da incidência ótima se justifica para os perfis situados na extremidade do fato que a superfície varrida por unidade de comprimento de pá é então máxima, e uma tal incidência leva na vizinhança do eixo a larguras proibitivas. Os valores  $C_z$  para incidência ótima é de fato, relativamente pequeno para os perfis habituais e o valor da quantidade  $C_{zpl}$  é muito grande na vizinhança do eixo para valores pequenos de  $\lambda$ .

Também escolhemos quando nos aproximamos do eixo de rotação, ângulos de incidência cada vez menores mas sempre ficando no ramo

ascendente da polar que corresponde à valores de  $tge$  menores que 0,10 de modo não reduzir excessivamente o rendimento aerodinâmico.

Na prática não se ultrapassa para os perfis habitualmente utilizados (Gottingen 623, NACA 4415, NACA 4418, 23012, 23015) uma incidência de  $10^\circ$  a  $12^\circ$  à distância  $0,2R$  ( $R$ , raio da eólica).

I..Sheff no seu notável trabalho "Wind Powered Machines" traduziu do russo para o inglês, aos cuidados da NASA, indicam que a incidência normal a adotar para os perfis situados à distância  $0,2R$  do eixo deve ser tal que a largura desses perfis fiquem compreendidos entre 1,3 e 1,7 vezes a largura da extremidade.

Podemos escolher por exemplo para a lei de variação de incidência em função de  $r$ , uma lei linear entre a extremidade da pá onde a incidência será escolhido igual ao valor ótimo e à distância  $0,2R$  onde se fixará um máximo a não ser ultrapassado.

Uma outra possibilidade consiste em adotar uma hélice de passo constante para todos os perfis:

$$H = 2\pi r \operatorname{tg} \alpha = 2\pi R \operatorname{tg} \alpha_0 \quad (2.75)$$

O ângulo de calage  $\alpha_0$  na extremidade da pá é escolhido igual ou próximo  $I_0$  – i ótimo, onde  $I_0$  é o ângulo de inclinação da extremidade nas condições ótimas de funcionamento.

O conhecimento de  $\alpha$  resultante ( $\operatorname{tg} \alpha = \frac{R}{r} \operatorname{tg} \alpha_0$ ), permite então determinar (supondo  $I$  conhecido) o ângulo de incidência para todo valor de  $r$  e portanto a largura  $l$  a ser adotada para os diferentes perfis. Convém porém



assegur-se que o ângulo de incidência, que cresce da periferia para o eixo, não atinja à distância  $0,2R$  valores excessivos possíveis de comprometer o rendimento.

Se a lei de variação do ângulo de incidência for bem escolhida a redução do rendimento não é muito importante pois as superfícies varridas por unidade de comprimento de pá vão diminuindo cada vez mais quanto mais nos aproximamos do eixo (pode-se facilmente superar esse inconveniente aumentando ligeiramente o diâmetro). A diminuição do par de momento da largura do perfil e do ângulo de calage na proximidade do eixo é, em contraposição, mais chata. Essa solução é porém adotada, pois ela torna as hélices mais leves.

Um outro problema que o projetista não pode perder de vista é a facilidade de construção. As pás obtidas em geral, aplicando os métodos acima, são torcidas. Os inconvenientes que poderiam aparecer na construção são menores se utilizar o plástico como material (pode-se escolher um dos bordos como sendo reto). Ao contrário, se utilizarmos metal, é desejável que os bordos de ataque e de fuga sejam ambos retilíneos.

## 2.5 - Influência da inclinação das pás no desempenho da máquina eólica

Nesse item será desenvolvido a uma expressão para a variação necessária a ser dada na pá para mante-la no ponto de rendimento ótimo, quando a velocidade do vento for diferente da velocidade média de projeto.

Analisando os modelos anteriormente desenvolvidos, pode ser observado que ele é destinado a uma situação de vento constante incidindo sobre a pá. No cálculo precedente procurou-se deixar as pás com inclinações tais que a máquina eólica apresentasse maior rendimento no momento em que o vento tiver uma velocidade igual a velocidade média da região, que é uma condição de projeto. Fora desta condição, a eficiência da máquina eólica decresce, como pode ser observado no gráfico  $C_p \times \lambda_0$  ilustrativo de um aerogerador de duas pás mostrado a seguir:

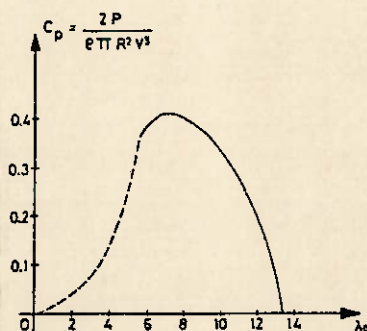


Fig. 2.5.1 - Relação entre  $\lambda_0$  e  $C_p$

Para compreender porque isso acontece devemos voltar ao esquema utilizado para projetar as pás:

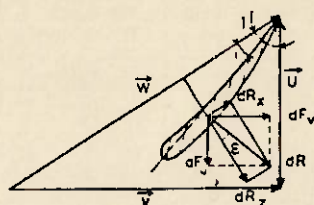


Fig. 2.5.2 - Seção da pá

A velocidade de rotação  $\bar{U}$  pode ser considerada sempre constante em um ponto de raio fixo na pá, uma vez que a maioria dos geradores existentes funciona com uma velocidade de rotação constante.

Partindo desta hipótese, verificamos que qualquer alteração na velocidade do vento em relação à velocidade média ou de projeto, provoca uma mudança na direção da velocidade resultante, portanto uma mudança de inclinação da mesma em relação ao perfil da pá. Isso faz com que o rendimento da máquina eólica caia à medida em que a velocidade do vento se afaste da velocidade de projeto.

Este problema poderia ser minimizado se as pás da máquina eólica pudessem ser inclinadas de tal forma que novamente a resultante das velocidades forme com o perfil o mesmo ângulo considerado ótimo no projeto. O ideal para compensar este efeito seria que toda a pá sofresse uma conformação de largura e inclinação se adaptando às novas condições de vento. Como isso ainda não é possível, a solução mais prática seria mesmo inclinar toda a pá de um ângulo  $\gamma$  em relação à posição inicial de projeto.



Considerando o esquema anterior como sendo relativo às condições de projeto em um certo ponto do perfil, temos que

$$\bar{W} = \bar{U} + \bar{V}_m \quad (2.76)$$

onde  $\bar{V}_m$  é a velocidade média de projeto

Escolhido o gerador com  $\omega$  constante, teremos que para o mesmo ponto da pá, o vetor  $\bar{U}$  permanece constante. Escalarmente, temos

$$W^2 = U^2 + V_m^2 \quad (2.77)$$

Para o ângulo  $I$ , temos que

$$\operatorname{tg} I = \frac{V_m}{U} \quad (2.78)$$

Qualquer alteração das condições do vento causa uma mudança do triângulo de velocidades, como pode ser visto na figura a seguir:

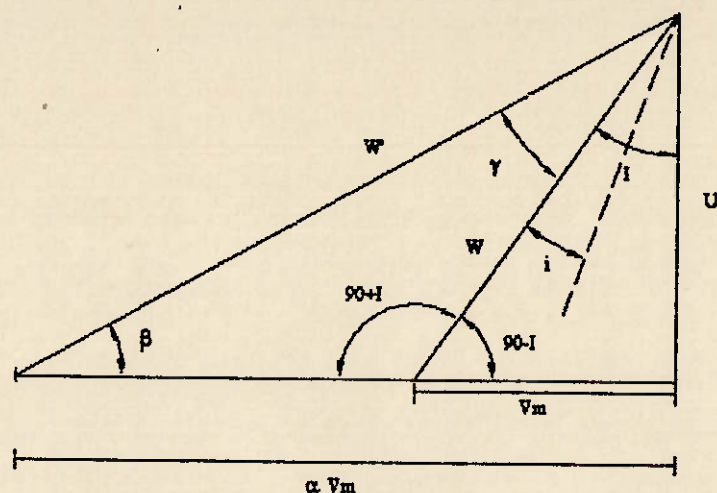


Fig. 2.5.3 - Distribuição de velocidades sobre o perfil para variação da velocidade do vento.

Supondo que a nova velocidade seja de  $\alpha V_m$ , temos que

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{U}{\alpha V_m} \quad (2.79)$$

Igualando os valores de U das duas equações

$$\alpha V_m (\operatorname{tg} \beta) = \frac{V_m}{\operatorname{tg} I} \Rightarrow \operatorname{tg} \beta = \frac{1}{\alpha \operatorname{tg} I} \quad (2.80)$$

Logo,

$$\beta = \operatorname{arctg} \left( \frac{1}{\alpha \operatorname{tg} I} \right) \quad (2.81)$$

Sendo  $\gamma$  o ângulo de variação dado ao perfil temos que

$$\gamma = 90 - (I + \beta) \quad (2.82)$$

Observa-se, porém, que este controle só poderá ser feito em um ponto específico da pá. Anteriormente já foi discutido sobre qual local iria-se aplicar a inclinação ótima, sendo que na prática costuma-se adotar a distância de  $0.2 R$  para manter esta inclinação, podendo-se usar então este ponto para determinar as correções de inclinação de toda a pá.

Deverá ser observada para realização do controle de inclinação das pás um ângulo mínimo e um ângulo máximo, que podem ser correspondentes às velocidades de corte superior e inferior da máquina.



## 2.6 - Roteiro para cálculo e aplicações

A determinação das características mecânicas (curvas de variação de coeficientes de momento e potência) antes da construção é fundamental. O conhecimento dessas características antes da realização permite realizar modificações no projeto inicial no sentido de obter uma eficiência melhor e da maneira mais econômica possível.

Para desenvolver esse roteiro é necessário relembrar as principais equações obtidas nas páginas anteriores. O primeiro resultado importante refere-se ao impulso axial elementar  $dF$  e o momento elementar  $dM$  das forças aerodinâmicas que atuam sobre os elementos da pá situados entre as distância  $r$  e  $r+dr$  que podem ser expressos pelas seguintes relações:

$$dF = \rho \pi r dr V_1 (1 - k^2) \quad (\text{ref. 2.45})$$

$$dM = \rho \pi r^3 dr V_1 (1+k) \Omega = \rho \pi r^3 dr V_1 \omega (1+k)(h-1) \quad (\text{ref. 2.46})$$

A seguir, igualando as expressões anteriores e levando em consideração as relações ligando  $I$  e  $W$  a  $V$ ,  $k$ ,  $h$ , temos:

$$\cot g I = \frac{U'}{V} = \frac{\omega r (h+1)}{V_1 (k+1)} = \lambda \frac{(h+1)}{(k+1)} = \lambda_0 \frac{r (h+1)}{R (k+1)} \quad (\text{ref. 2.37})$$

$$W = \frac{V}{\text{sen} I} \Rightarrow W = \frac{V_1 (1+k)}{2 \text{sen} I} = \frac{\omega r (1+h)}{2 \cos I} \quad (\text{ref. 2.38})$$

$$G = \frac{1-k}{1+k} = \frac{C_{zp} \cos(I-s)}{8\pi r \cos s \sin^2 I} \quad (\text{ref. 2.51})$$

$$E = \frac{h-1}{h+1} = \frac{C_{zp} \sin(I-s)}{4\pi r \sin 2I \cos s} \quad (\text{ref. 2.52})$$

Para obtermos o empuxo axial e o momento sobre a pá basta integrarmos as expressões de  $dF$  e  $dM$  anteriores ao longo da pá, que nos leva a:

$$F = \int_0^R \rho \pi r V_1 (1-k^2) dr \quad (2.83)$$

$$M = \int_0^R \rho \pi r^3 V_1 \alpha (1+k)(h-1) dr \quad (2.84)$$

Esses valores correspondem a coeficientes de empuxo axial e de momento respectivamente iguais a:

$$C_F = \frac{2F}{\rho S V_1^2} = 2 \int_0^1 (1-k^2) \frac{r}{R} d\left(\frac{r}{R}\right) \quad (2.85)$$

$$C_M = \frac{2M}{\rho S V_1^2 R} = 2 \int_0^1 \lambda (1-k)(h-1) \left(\frac{r}{R}\right)^2 d\left(\frac{r}{R}\right) \quad (2.86)$$

Essa última expressão, levando em conta as relações,

$$\lambda = \frac{(1+k)}{(1+h)} \cot g I \quad (\text{ref. 2.46})$$

$$E = \frac{h-1}{h+1} \quad (\text{ref. 2.52})$$

pode ser rescrita na forma de:

$$C_M = 2 \int_0^1 (1-k)^2 E (\cot g I) \left(\frac{r}{R}\right)^2 d\left(\frac{r}{R}\right) \quad (2.87)$$

$$\text{para } f_r = (1-k^2) \frac{r}{R} \quad (2.88)$$

$$\text{e } m_r = (1+k)^2 E (\cot g I) \left(\frac{r}{R}\right)^2 \quad (2.89)$$

temos

$$C_F = 2 \int_0^1 f_r d\left(\frac{r}{R}\right) \quad (2.90)$$

$$C_M = 2 \int_0^1 m_r d\left(\frac{r}{R}\right) \quad (2.91)$$

Em condições ótimas de funcionamento os valores de  $k$  e  $h$  são conhecidos para cada perfil da pá. A determinação do empuxo axial, do momento, da potência e dos coeficientes correspondentes não apresentam dificuldades.

Se a hélice gira a uma velocidade específica  $\lambda_0$ , diferente para qual foi calculada, os ângulos de incidência mudam de valor e os valores de  $k$  e  $h$  também. Como consequência disso, o empuxo axial e o momento motor e seus respectivos coeficientes também.



Na prática para determinação de  $C_F$  e  $C_m$  considerando vários valores da relação  $r/R$  (0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, por exemplo).

Às distâncias correspondentes nos faremos variar arbitrariamente a incidência de grau em grau e calcularemos para cada valor de  $r/R$  e para cada valor de incidências os seguintes parâmetros conforme a tabela abaixo:

$\frac{r}{R}$	$\frac{r_1}{R_1}$					$\frac{r_2}{R_2}$
$\alpha$	$\alpha_1$					$\alpha_2$
$I$	$I_1$					$I_2$
$i$	$i_1$	$i_2$	$i_3$	$i_4$	$i_5$	
$C_z$						
$\text{tg} \epsilon$						
$I = \alpha + i$						
$G = \frac{1-k}{1+k} = \frac{C_z p l}{8\pi r} \frac{\cos(I-\epsilon)}{\cos \epsilon \sin^2 I}$						
$k = \frac{1-G}{1+G}$						
$E = \frac{h-1}{h+1} = \frac{C_z p l}{4\pi r} \frac{\sin(I-\epsilon)}{\sin 2I \cos \epsilon}$						
$h = + \frac{1+E}{1-E}$						
$\lambda_0 = \frac{R}{r} \frac{1+k}{1+h} \cotg I$						
$f_r = (1-k^2) \frac{r}{R}$						
$m_r = (1+k)^2 E \cotg I \frac{r^2}{R^2}$						

Fig. 2.6.1 - Tabela modelo para análise de Eficiência

- o ângulo de inclinação  $I$ , acrescentando a incidência considerada ao ângulo de calge do elemento calculado segundo os métodos indicado acima.

- os valores de  $C_z$  e do ângulo  $\epsilon$

- o número  $G$ , pela relação:

$$G = \frac{1-k}{1+k} = \frac{C_z p l \cos(I-\varepsilon)}{8\pi r \cos\varepsilon \sin^2 I} \quad (\text{ref. 2.51})$$

- o número  $E$  pela relação:

$$E = \frac{h-1}{h+1} = \frac{C_z p l \sin(I-\varepsilon)}{4\pi r \sin 2I \cos\varepsilon} \quad (\text{ref. 2.52})$$

os valores de  $k$  e  $h$  pelas relações:

$$k = \frac{1-G}{1+G} \quad (2.92)$$

$$h = \frac{1+E}{1-E} \quad (2.93)$$

- a velocidade específica no extremo da pá  $\lambda_0$  corresponde à relação:

$$\lambda_0 = \frac{R}{r} \frac{1+k}{1+h} (\cot g I) \quad (2.94)$$

- os números

$$f_r = (1-k^2) \frac{r}{R} \quad (\text{ref. 2.88})$$

$$m_r = (1+k)^2 E(\cot g I) \left( \frac{r}{R} \right)^2 \quad (\text{ref. 2.89})$$

Depois de calculados, traça-se as curvas de variação de  $f_r$  e  $m_r$  em função de  $\lambda_0$ , cada curva correspondente a um valor de  $r/R$  determinado.

Ver figura abaixo.

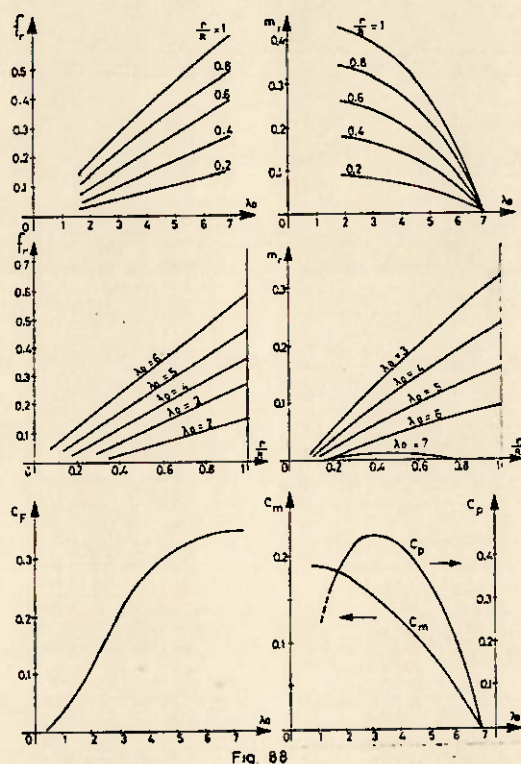


Fig. 2.6.2 - Gráficos para análise de Eficiência

A seguir levantamos novos gráficos em função de  $r/R$ , os valores de  $f_r$  e  $m_r$  obtidos dos gráficos anteriores correspondentes a valores de  $\lambda_0$ . Basta a seguir determinar as áreas das superfícies compreendidas entre o



eixo das abcissas, para as diferentes curvas correspondentes aos vários valores de  $\lambda_0$ , para obter depois de multiplicado por 2, os coeficientes de empuxo axial e de momento em função da velocidade específica  $\lambda_0$ .

Mostramos anteriormente que a curva de variação do coeficiente de potência em função da velocidade específica se deduzia simplesmente partir da curva  $C_M(\lambda_0)$ , multiplicando as ordenadas dos pontos dessa curva pelo valor de suas abcissas correspondentes.

$$C_P = C_M(\lambda_0) \times (\lambda_0) \quad (2.95)$$

Portanto a determinação da curva  $C_P(\lambda_0)$  não apresenta dificuldades.

### 2.6.1 - Exemplo de Cálculo

Para exemplificar toda a teoria e a metodologia de cálculo desenvolvido vamos desenvolver o exemplo de uma eólica rápida ( $\lambda_0 > 5$ ).

O objetivo desse exemplo é levantar os gráficos de  $C_p(\lambda_0)$  e  $C_M(\lambda_0)$  para comparar duas situações distintas: uma delas é observar o comportamento da eólica que gera energia à rotação constante e não possui controlador da inclinação das pás; a segunda a mesma eólica utilizando um controlador de inclinação de pás.

Nesse problema desejamos projetar uma eólica para suprir a necessidade energética de 16 Kw, utilizando um gerador de rendimento igual a 80%. Assim temos que a potência a ser convertida no eixo da eólica vale:

$$P_{\text{efetiva}} = \frac{P_{\text{mecânica}}}{\eta} = \frac{16}{0.8} = 20 \text{ Kw}$$

Sabendo que a velocidade média da região é de 10 m/s podemos determinar o diâmetro da eólica pela relação característica das eólicas rápidas:

$$P = 0.20 D^2 V^3 \Rightarrow D = \sqrt{\frac{P}{0.20 V^3}} = \sqrt{\frac{20}{0.20 \times 10^3}} = 10 \text{ m}$$

Impondo o rendimento máximo para  $\lambda_0 = 7$ , teremos a rotação de:

$$N = \frac{\lambda_0 V}{\pi D} = \frac{7 \times 10}{\pi \times 10} = 213 \text{ rps} = 134 \text{ rpm}$$

Para o cálculo das pás vamos ensaiar o perfil NACA 23015. A figura desse perfil e de alguns outros se encontram fixados em anexo no final do trabalho (Apêndice 2). Para não termos que ficar retirando os valores de  $C_z$  e  $C_x$  do gráfico vamos pegar a região linear do gráfico (entre 0 e 15°) e montar a equação correspondente. As equações obtidas são:

$$C_z(i) = 0.1 + 0.11i \quad \text{para } i < 10^\circ$$

$$C_z(i) = 15 - 0.0188(i - 14)^2 \quad \text{para } 10^\circ < i < 15^\circ$$

$$C_x = 0.007 + 0.0055(C_z(i) - 0.2)^2 \quad \text{para } i < 10^\circ$$

$$C_x = 0.0125 + 0.16(C_z(i) - 1.1)^2 \quad \text{para } 10^\circ < i < 15^\circ$$

A lei de variação do ângulo de incidência em função da distância até ao eixo é:

$$i = 1275 - 7.5 \frac{r}{R}$$

Assim o ângulo de incidência nas condições ótimas de funcionamento varia de 5 a 12°.



Nas condições ótimas para  $\lambda_0 = 7$ , temos:

$\frac{r}{R}$	$\lambda$	$I^\circ$	$i^\circ$	$\alpha^\circ$	$c_z$	$\frac{C_{p1}}{r}$	$l$ (m)
0.1	0.7	36.67	12.00	24.67	1.425	4.975	0.582
0.2	1.4	23.69	11.25	12.44	1.358	2.120	0.520
0.3	2.1	16.98	10.50	6.48	1.270	1.095	0.431
0.4	2.8	13.10	9.75	3.35	1.172	0.654	0.372
0.5	3.5	10.63	9.00	1.63	1.090	0.431	0.330
0.6	4.2	8.93	8.25	0.68	1.007	0.305	0.302
0.7	4.9	7.69	7.50	0.19	0.925	0.226	0.285
0.8	5.6	6.75	6.75	0.00	0.842	0.174	0.276
0.9	6.3	6.00	6.00	0.00	0.760	0.138	0.273
1.0	7.0	5.25	5.25	0.00	0.677	0.112	0.276

Fig. 2.6.3 - Resultados do Projeto

Para gerar os números necessários para a construção dos gráficos de  $C_p(\lambda_0)$  e  $C_M(\lambda_0)$ , implementamos no computador o algoritmo de cálculo mostrado na seção anterior. O programa foi escrito em Pascal e uma listagem dele encontra-se em anexo (Apêndice 1).

Inicialmente, o programa considerou as características de projeto mostradas na tabela anterior, onde obtivemos o ângulo de  $11,25^\circ$  como sendo o ângulo de incidência ótimo no ponto  $0.2R$  do eixo. A partir daí, variando o valor do ângulo de incidência  $i$  (entre  $0^\circ$  e  $15^\circ$ , com passo de  $1^\circ$ ) nesse ponto obteve-se o valor de  $\lambda_0$  correspondente. Assim para cada  $\lambda_0$  (comum para todo perfil) obtivemos um valor de correção angular definido anteriormente como  $\gamma = \gamma(\lambda_0)$ , que representa a atuação do controlador de inclinação. Com esses valores pudemos calcular o valor de  $m_r = m_r(\lambda_0)$ , para a distância  $0.2R$ .

Para as outras distâncias repetiu-se o procedimento anterior, porém o ângulo de incidência foi corrigido do valor de  $\gamma(\lambda_0)$  achado anteriormente, e assim foi calculado todos os valores de  $m_r = m_r(\lambda_0)$  para as outras distâncias. A partir desses valores de  $m_r(\lambda_0)$ , para cada  $r/R$  foi possível calcular o valor de  $C_p(\lambda_0)$  para as duas situações.

Os gráficos seguintes mostram os valores obtidos. Os gráficos na parte inferior da página representa a eólica que utiliza o controlador de inclinação da pás, enquanto o de cima é a eólica sem o controlador.

Esses dois gráficos são os valores de  $m_r(\lambda_0)$  obtidos pelo programa desenvolvido.

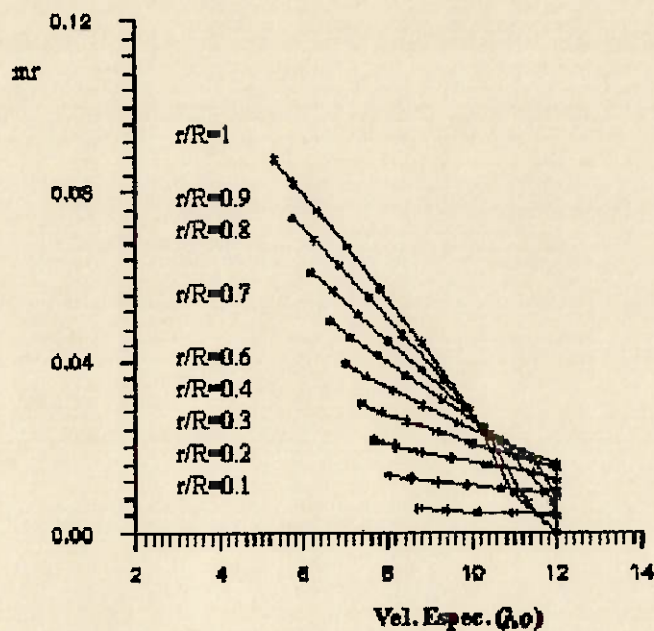


Fig. 2.6.4 - Valores obtidos sem o controlador

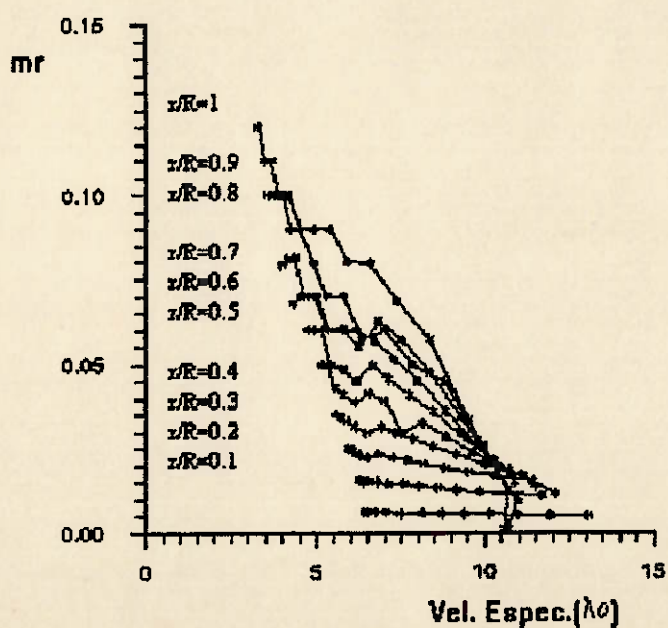


Fig. 2.6.5 - Valores obtidos com o controlador



Esses gráficos são os mesmo gráficos anteriores, porém utilizamos uma curva francesa para torna-los mais limpos.

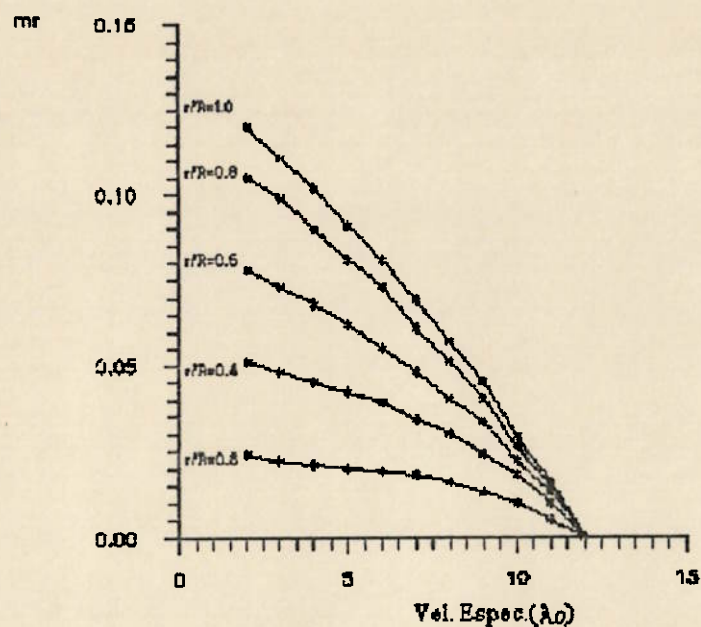


Fig. 2.6.6 - Valores Obtidos Sem o Controlador

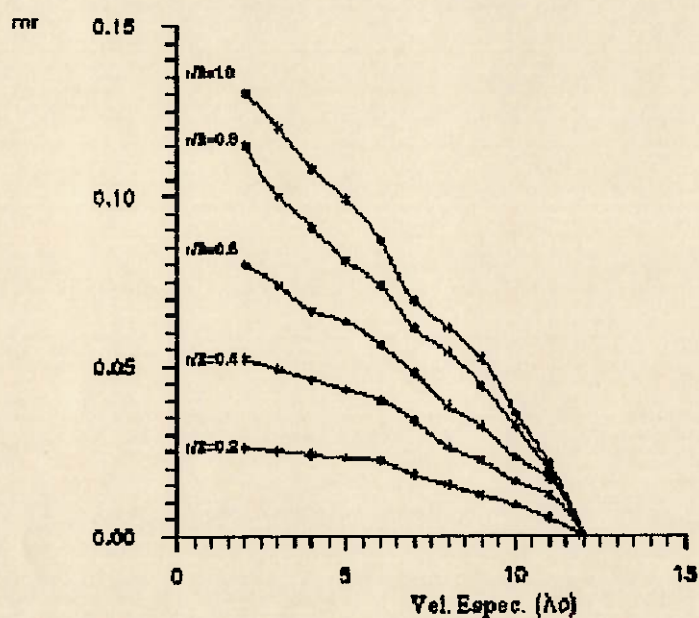


Fig. 2.6.7 - Valores Obtidos com o Controlador

Nesse grafico, os eixos foram invertidos e obtivemos  $m_r = m_r \left( \frac{r}{R} \right)$ .

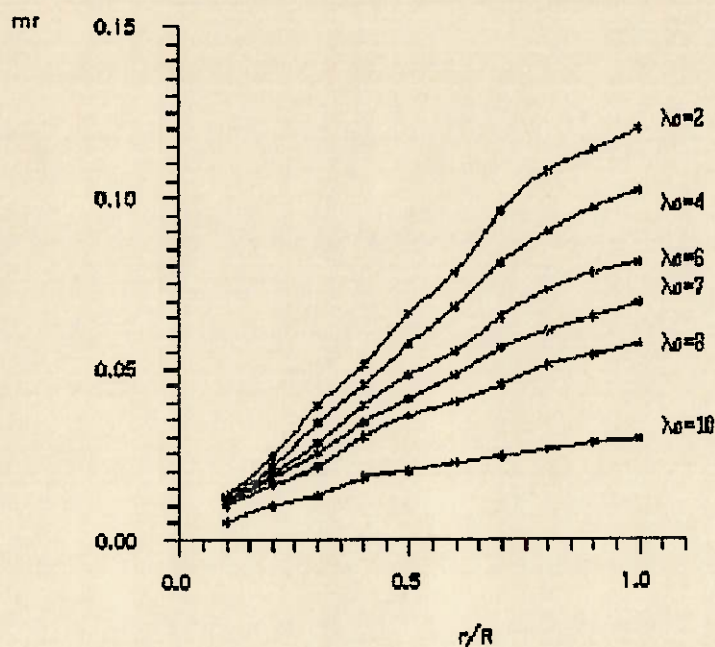


Fig. 2.6.8 - Valores obtidos sem o Controlador

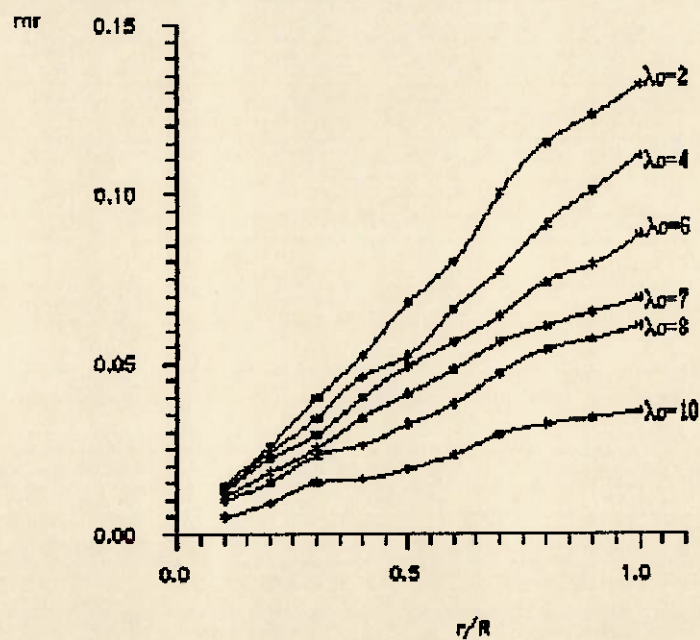


Fig. 2.6.9 - Valores Obtidos com o Controlador

Por fim, integrando as áreas sob os gráficos anteriores, obtivemos as curvas procuradas para as duas situações propostas.

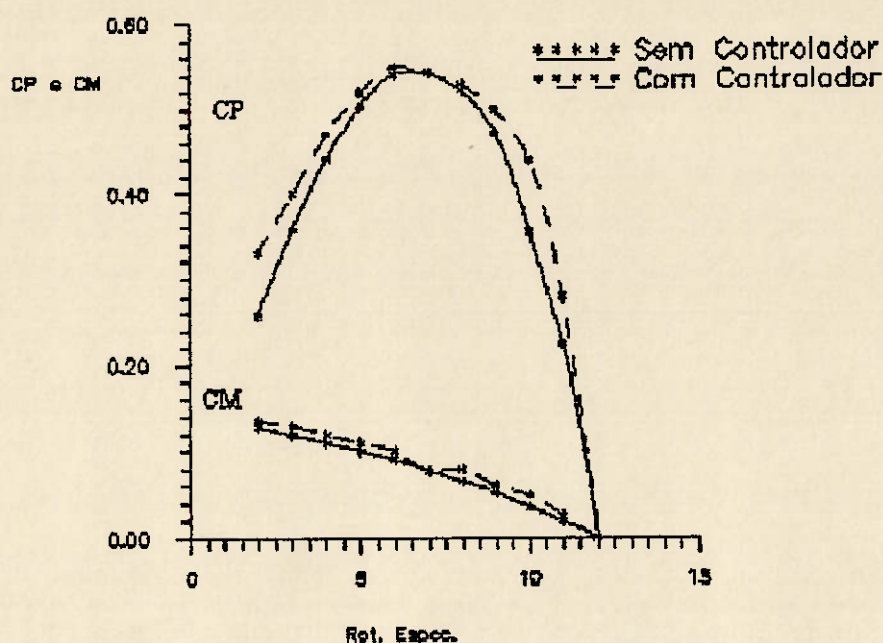


Fig. 2.6.10 - Gráfico de  $C_p$  e  $C_m$

As curvas de  $C_p(\lambda_0)$  e  $C_m(\lambda_0)$ , obtidas estão dentro do esperado, ou seja, a utilização do controlador faz a curva de  $C_p(\lambda_0)$  "abrir" a partir do ponto de projeto que é comum para as duas curvas de  $C_p(\lambda_0)$ , comprovando que a utilização do controlador é vantajosa.

A faixa aproximada de operação do exemplo desenvolvido pode ser determinada através do gráfico de  $C_p(\lambda_0)$ , pelo seguinte procedimento:

dados do problema:  $\lambda_0 = 7$ ;  $V = 10 \text{ m/s}$ ;  $D = 10 \text{ m}$



Sabemos que  $\lambda_0 = \frac{\omega R}{V_1}$ , onde  $\omega R = \lambda_0 V_1 = 70 \text{ m/s}$

Para a velocidade de corte inferior, temos pelo gráfico de  $C_p(\lambda_0)$ ,  $\lambda_0$  convergindo para 12. Assim para  $\lambda_0 = 12 \Rightarrow V \approx 6 \text{ m/s}$ , já que a velocidade de rotação  $\omega R$  é constante.

Para a velocidade de corte superior é comum supor que ela valha duas vezes a velocidade do vento de projeto, no caso, de  $20 \text{ m/s}$ . Para esse valor de velocidade temos  $\lambda_0 = 3,5$ .

### 3 - Conclusão e Comentários

Através do trabalho realizado foi possível estudar os vários tipos de turbinas eólicas e determinar os parâmetros fundamentais para dividi-las em categorias, segundo sua aplicação e velocidade do vento. Além disso, ficamos bastante impressionados com a tecnologia desenvolvida na construção de turbinas eólicas, principalmente nas duas últimas décadas. Esse avanço é visível principalmente nas áreas de desenvolvimento de materiais (mais leves e resistentes), novos geradores e controladores eletrônicos.

Quanto a parte teórica do trabalho podemos dizer que as duas teorias desenvolvidas são de bastante utilidade. A simplificada porque permite avaliar rapidamente o potencial energético disponível e ter idéia das dimensões da eólica. A segunda teoria, que discute a presença e influência de turbilhões é mais trabalhosa, porém é mais adequada para o desenvolvimento do projeto em si, pois representa melhor a realidade.

A manipulação das equações desenvolvidas na teoria turbilhonar permite levantar o gráfico  $C_p = C_p(\lambda_0)$  para vários perfis e assim facilitar a escolha pelo perfil mais adequado para a situação estudada (os parâmetros importantes nessa decisão são os valores de  $C_p$ , faixa de operação de velocidades e largura do perfil ao longo da pá).

No gráfico de  $C_p$  obtido por nós, pudemos observar que o ponto de máximo  $C_p$  coincide com o valor de  $\lambda_0$  de projeto. Fora desse valor,

nota-se que a energia eólica convertida no eixo (do total disponível) tende a diminuir.

A comparação das duas situações descritas no exemplo desenvolvido mostra que as duas curvas de  $C_p$  e  $C_m$  coincidem no ponto de projeto. Para outros valores de  $\lambda_0$ , o controlador trouxe um ganho de potência em torno de 5% (valor obtido calculando a área sobre as curvas do gráfico de  $C_p$ ) se comparado com a situação da eólica sem o controlador. Outra alternativa para aumentar a potência convertida no eixo seria a utilização de um módulo eletrônico acoplado ao gerador que modelaria a frequência obtida no gerador para a frequência da rede (nesse caso, haveria geração de energia elétrica em qualquer velocidade de rotação da eólica). Assim, apenas alterando a carga no gerador seria possível teoricamente manter a eólica trabalhando próximo do valor de  $\lambda_0$  de projeto (consequentemente na região de maior valor para  $C_p$ ). Essa última alternativa é considerada tecnologia de ponta e está sendo testada nas eólicas mais atuais.

O projeto desenvolvido por nós nesse trabalho de formatura poderia ter várias continuações interessantes, entre elas o cálculo das pás envolvendo resistência dos materiais; desenvolvimento dos sistemas controladores, que envolveria toda a parte de eletrônica e microprocessadores; desenvolvimento de instalações mais amplas como fazendas de vento, integração de sistemas eólicos com outras formas alternativas de energia, ou então a utilização de energia eólica aplicada à tarefas específicas como bombeamento de água, transmissão mecânica para outras máquinas (como compressores, trituradores, etc).



## Apêndice 1: Listagem do Programa de Cálculo

```
program tf;
```

```
{* Este programa tem como finalidade calcular a resposta  $m_r \times \lambda_{b0}$  *}
{* de uma maquina eolica de eixo horizontal. A curva gerada pelos pontos *}
{* calculados possibilitara o calculo dos valores de  $C_m$  e em consequencia *}
{* de  $C_p$ .                               *} }
```

```
uses crt;
```

```
const
```

```
re=5;           { * Raio da Eolica * }
numpa=3;        { * Num. de pas * }
npontos=16;
```

```
type
```

```
vetor=array[1..npontos] of real;
```

```
var
```

```
cont1,cont2      : integer;
vetalfa,vetl,vetgama,vetl01,
vetmr1, vetl02,vetmr2,vetl03,
vetmr3,vetl04,vetmr4      : vetor;
disp             : text;
modif            : boolean;
```

Procedure Calcula(n:integer,var lamb0,mr :vetor, contr: boolean );

```
{* Este procedimento tem como entrada a relacao r/R, dois vetores vazios, *}
{* e a informacao: com ou sem controlador. Se houver controlador, sera *}
{* adicionado a incidencia a correcao contida em vetgama, funcao da *}
{* velocidade especifica. A saida corresponde a dois vetores com npontos *}
{* pontos, um correspondendo a vel. espec. (lamb0) e o outro ao valor *}
{* calculado mr(mr)                                *}

```

var

```
corr,r,k,h,I,gama,inc,cx,cz,eps,e,g : real;
aux1,aux2 :integer;
```

begin

```
for aux1:= 1 to npontos do mr[aux1]:=0;
for aux1:= 1 to npontos do lamb0[aux1]:=0;
corr:=-1;
```

```
for aux2:= 1 to npontos do {* incidencias arbitrarías *}
begin
```

```
inc:=aux2+corr;
r:=0.1*n*re;
I:=vetalfa[n]+inc;
I:=(I*pi/180);
```

```
if i=0 then i:=0.01;
```

```
if inc<10
```

```
then begin
```

```
cz:=0.1+0.11*inc;
cx:=0.007+0.0055*sqr(cz-0.2);
end
```

```
else begin
```

```
cz:=1.5-0.01888*sqr(inc-14);
cx:=0.0125+0.16*sqr(cz-1.1);
end;
```

```
eps:=arctan(cx/cz);
```

```
g:=(cz*numpa*vetl[n]*cos(i-eps))/(8*pi*r*cos(eps)*sqr(sin(I)));
```

```
e:=(cz*numpa*vetl[n]*sin(i-eps))/(4*pi*r*sin(2*I)*cos(eps));
```

```

k:=(1-g)/(1+g);
h:=(1+e)/(1-e);
lamb0[aux2]:=(Re*(1+k)*cos(I))/(r*(1+h)*sin(i));

if contr
then begin
  if lamb0[aux2]<12
  then inc:=inc-vetgama[round(lamb0[aux2])]
  else inc:=inc+8;
  end;

  if inc<10
  then begin
    cz:=0.1+0.11*inc;
    if cz<0.0001 then cz:=0.0001;
    cx:=0.007+0.0055*sqr(cz-0.2);
    end
  else begin
    cz:=1.5-0.01888*sqr(inc-14);
    cx:=0.0125+0.16*sqr(cz-1.1);
    end;
  eps:=arctan(cx/cz);
  g:=(cz*numpa*vetl[n]*cos(i-eps))/(8*pi*r*cos(eps)*sqr(sin(I)));
  e:=(cz*numpa*vetl[n]*sin(i-eps))/(4*pi*r*sin(2*I)*cos(eps));
  k:=(1-g)/(1+g);
  h:=(1+e)/(1-e);

  mr[aux2]:=(sqr(1+k)*e*cos(i)*sqr(r))/(sin(i)*sqr(Re));

end;

end;

begin
  modif:= true; { * com controlador ou sem ? *}

  vetalfa[1]:=24.67;

```



```

vetalfa[2]:=12.44;
vetalfa[3]:=6.48;
vetalfa[4]:=3.35;
vetalfa[5]:=1.63;    { * valores de angulo de calage de projeto    *}
vetalfa[6]:=0.68;    { * o indice [n] indica a posicao na pa n*0.1*r *}
vetalfa[7]:=0.19;
vetalfa[8]:=0;
vetalfa[9]:=0;
vetalfa[10]:=0;

vetl[1]:=0.582;
vetl[2]:=0.52;
vetl[3]:=0.431;
vetl[4]:=0.372;
vetl[5]:=0.330;
vetl[6]:=0.302;
vetl[7]:=0.285;    { * valores de largura de pa de projeto    *}
vetl[8]:=0.276;    { * o indice [n] indica a posicao na pa n*0.1*r *}
vetl[9]:=0.272;
vetl[10]:=0.268;

vetgama[5]:=9;
vetgama[6]:=3;
vetgama[7]:=0;
vetgama[8]:=-5;    { * valores de correcao calculados em funcao do *}
vetgama[9]:=-5.5;  { * indice [n] = velocidade especifica    *}
vetgama[10]:=-6;
vetgama[11]:=-6.5;
vetgama[12]:=-8;

calcula(1,vetl01,vetmr1,not modif);
calcula(2,vetl02,vetmr2,not modif); { * chama procedimento de calculo para *}
calcula(3,vetl03,vetmr3,not modif); { * r/R= 01.,0.2,0.3,0.4 sem controlador *}
calcula(4,vetl04,vetmr4,not modif);

assign(dispatch,'c:\teste.dat');
rewrite(dispatch);
for cont2:=1 to npontos do

begin
z
{ * Escreve os vetores em arquivo texto *}

```

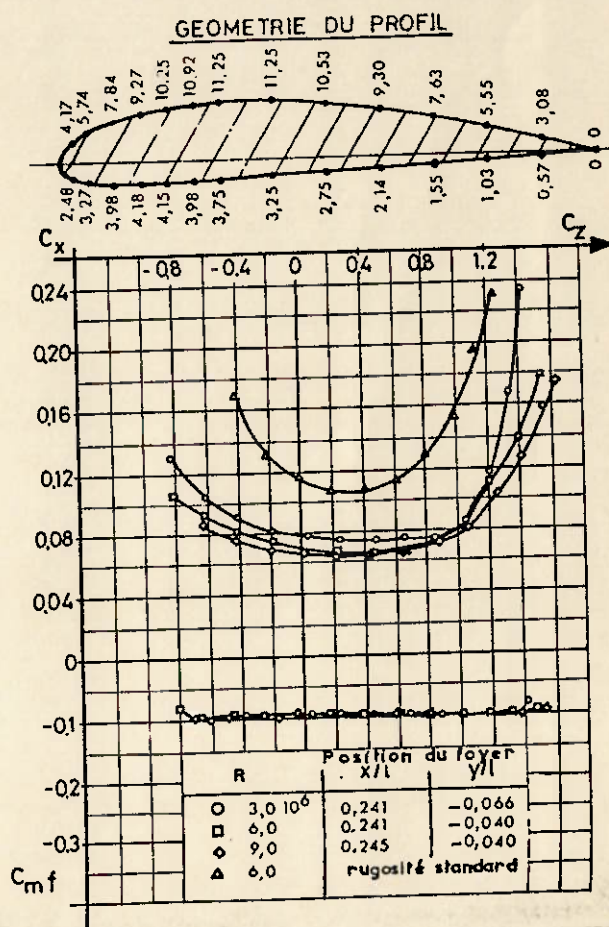
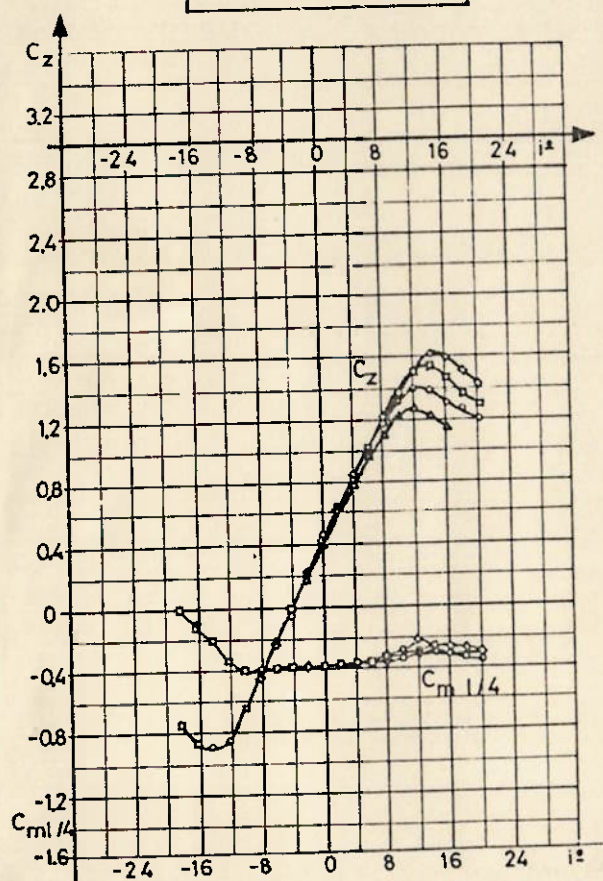
```
write(disg,vetl01[cont2],'    ',vetmr1[cont2]);  
write(disg,vetl02[cont2],'    ',vetmr2[cont2]);  
write(disg,vetl03[cont2],'    ',vetmr3[cont2]);  
write(disg,vetl04[cont2],'    ',vetmr4[cont2]);  
writeln(disg);  
end;
```

```
close(disg);  
repeat until keypressed;
```

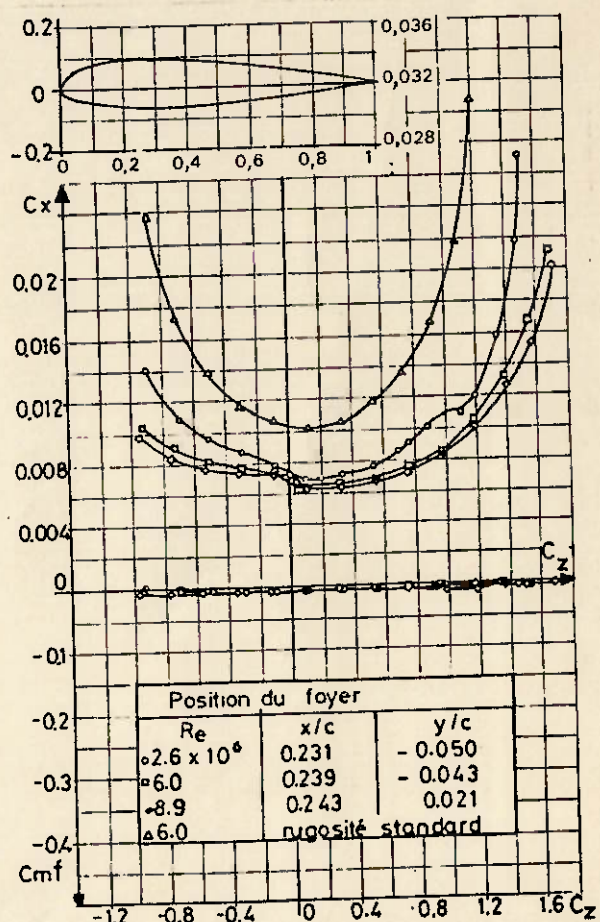
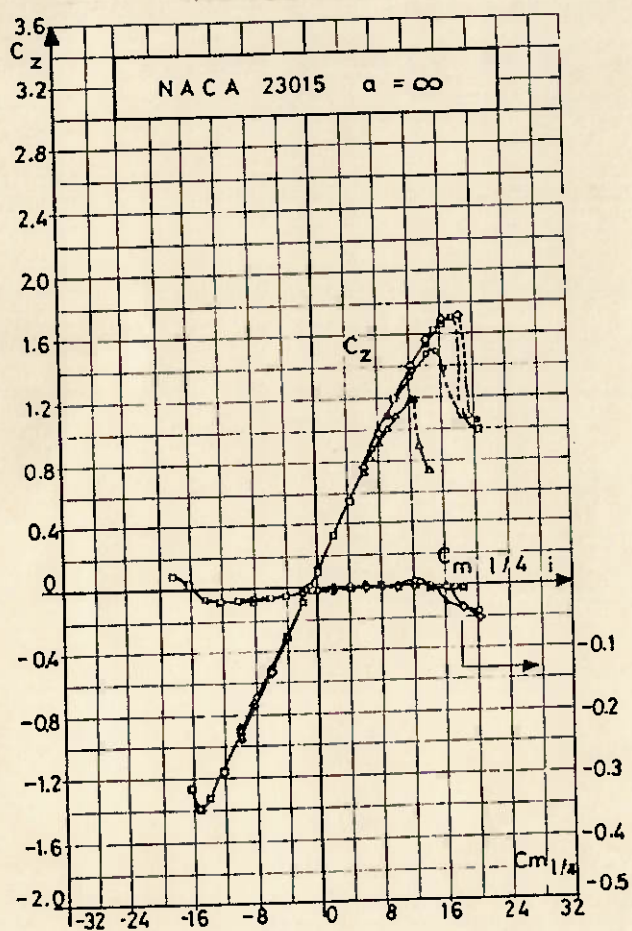
```
end.
```

□

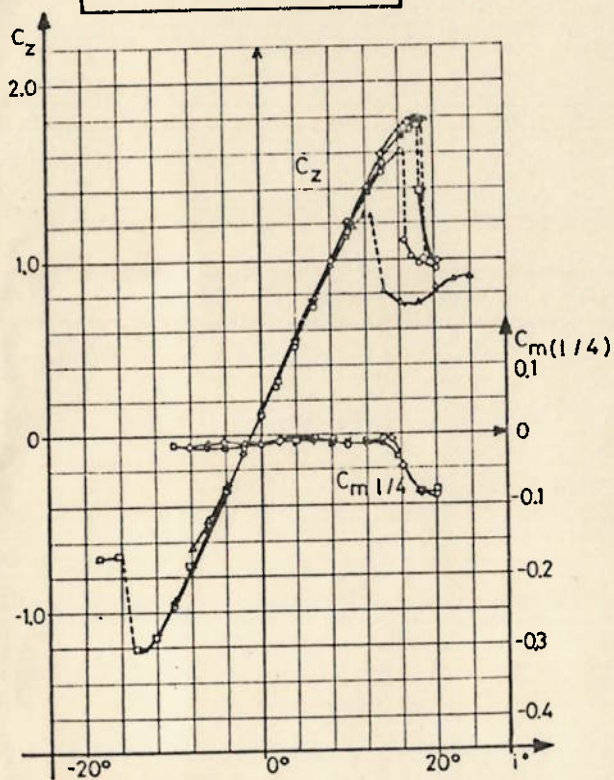
## Apêndice 2: Perfis mais Utilizados em Máquinas Eólicas

NACA 4415  $\alpha = \infty$ 

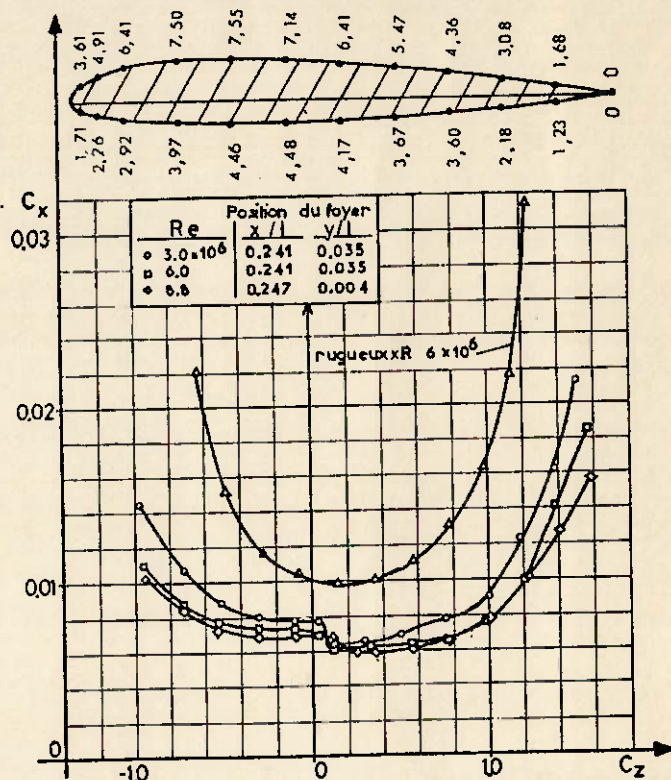




NACA 23012  $\alpha = \infty$



GEOMETRIE DU PROFIL



Bibliografia

1. Machine Design. (abril de 1981). "Turning to the Wind".
2. EPRI Journal. (maio de 1984). "Wind Power: A Question of Scale".
3. International Power Generation. (março de 1991). "The Bonus 450 kW Wind Turbine".
4. International Power Generation. (março de 1992). "Wind Energy - The Right Approach".
5. International Power Generation. (março de 1993). "Windpower Review".
6. Power. (abril de 1993). "Latest Machine Design shores up Windpower Technology".
7. International Power Generation. (setembro de 1993). "Wind Power".
8. Le Gourieres, Desiré, *Énergie Éolienne*, Paris, 1982.
9. Justus, C.G., *Vent et Performances des Éoliennes*, Paris, 1980.
10. Roger, Roland, *Produire son Énergie avec le Vent*, Paris, 1981.