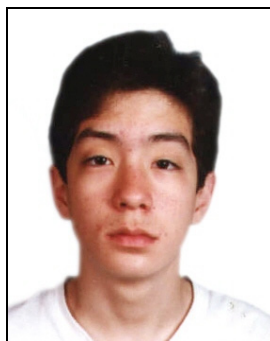


13/6/2005

UNICAMP – IFGW
Relatório final do projeto de F 809

Energia Eólica



Nome do aluno: Bruno Ferreira de Camargo Yabu-uti **RA:** 008201
Nome do orientador: Pedro Raggio

Sumário

1- Objetivos.....	03
2- Introdução.....	03
2.1- Origens históricas.....	04
3- O nascimento do vento.....	05
3.1- A potência do vento.....	06
4- Descrição do aparato experimental.....	07
4.1- Hélices.....	07
4.2- Geradores, os conversores de energia.....	08
4.3- Montagem experimental.....	09
5- Dados experimentais.....	10
6- Análise dos resultados.....	15
7- Conclusão.....	17
8- Referências bibliográficas.....	18

1. Objetivos:

-Construir um aparato que ilustre didaticamente a conversão de energia eólica em elétrica;

-Analisar a eficiência de uma hélice (variando o ângulo das pás);

2. Introdução:

O homem vive num oceano de energia. Ao redor dele a natureza trabalha constantemente, liberando energia em tão inesgotáveis quantidades que dela o homem pode aproveitar apenas uma fração. As quedas de água poderiam proporcionar força hidrelétrica suficiente para suprir 80% da energia total consumida pelo homem, embora ele use apenas 1 ou 2% dela.

Uma das grandes preocupações do Mundo hoje é a questão relativa à energia, o aproveitamento desta ainda não atingiu um nível satisfatório, visto que a imensa maioria da energia utilizada no planeta é de origem não renovável, seja de fonte mineral, atômica, térmica ou das águas. A energia pode ser utilizada de forma mais civilizada e menos dispendiosa, por meios de fontes renováveis como a energia eólica, solar, das marés, geotérmica e de outras mais.

A energia eólica, além de ser uma fonte de energia renovável, possui uma certa diferença em relação às demais, pode ser utilizada para o fornecimento de energia para pequenas populações, pois ela não requer grandes investimentos.

Mas claro também há desvantagens que devem ser levadas em conta, como o barulho provocado, que não é muito elevado se o módulo for freqüentemente vistoriado, a área ocupada que deve ser específica (sem muitas elevações e civilizações por perto), e principalmente que hoje como esta tecnologia não ainda está totalmente desenvolvida o seu custo ainda é um pouco elevado, de modo que é muito difícil uma população ter o seu próprio fornecimento de energia elétrica gerada por meios eólicos e também que seu aproveitamento ainda não é satisfatoriamente elevado, entretanto esses entraves podem ser superados com o desenvolvimento desta tecnologia.

2.1. Origens históricas:

Acredita-se que foram os egípcios os primeiros a fazer uso prático do vento. Em torno do ano 2800 AC, eles começaram a usar velas para ajudar a força dos remos dos escravos. Eventualmente, as velas ajudavam o trabalho da força animal em tarefas como moagem de grãos e bombeamento de água.

Os moinhos de vento foram inventados na Pérsia no século V. Eles eram usados para bombear água para irrigação ou na moagem de grãos. Os mecanismos básicos de um moinho de vento não mudaram desde então: o vento atinge uma hélice que ao movimentar-se gira um eixo que impulsiona uma bomba, uma moenda ou, em tempos mais modernos, um gerador de eletricidade.

A geração de eletricidade pelo vento começou em torno do início do século, com alguns dos primeiros desenvolvimentos creditados aos dinamarqueses.

Pelo ano de 1930, em torno de uma dúzia de firmas americanas estavam fazendo e vendendo esses "carregadores de vento", na maior parte aos fazendeiros do ventoso Great Plains. Tipicamente, essas máquinas poderiam fornecer até 1000 watts (1kW) de corrente contínua quando o vento estava soprando.

Então chegou a Administração Rural de Eletrificação (ARE), um programa subsidiado pelo governo americano com a finalidade de estender linhas de força às fazendas e propriedades rurais em lugares remotos.

Muitos países europeus construíram enormes geradores de vento. Durante os anos 1950 e 1960, os franceses construíram desenhos avançados de unidades de 100 kW a 300 kW. Os alemães construíram geradores de vento para prover força extra para sua linha de utilidades, mas por causa da rígida competição dos geradores de fluido fóssil, essas máquinas experimentais foram eventualmente descartadas.

Uma das mais memoráveis máquinas de vento, foi a máquina de Smith-Putman, construída perto de Rutland, Vermont- USA, durante os anos 1940. Esta enorme máquina com lâminas de 50 m, foi desenhada para fornecer 1250 kW, para a malha de forças de Vermont. Por um período curto de tempo ela entregou 1500 kW, mas a escassez de material devido a época da guerra e a carência de

dinheiro trouxe um fim a este projeto depois que os ventos quebraram uma das duas lâminas de 8 toneladas.

3. O nascimento do vento:

A atmosfera da Terra age como uma gigantesca máquina térmica. Os raios do Sol, mais fortes no equador do que nas regiões polares, causa o aquecimento do ar tropical que se eleva, cedendo lugar ao ar polar mais frio que se move para tomar-lhe o lugar. Enquanto o sol aquece o ar, água e terra de um lado da Terra, o outro lado é resfriado por radiação térmica para o espaço. Diariamente a rotação da Terra espalha esse ciclo de aquecimento e resfriamento sobre sua superfície. Mas, nem toda superfície da Terra responde ao aquecimento da mesma forma. Por exemplo, um oceano se aquecerá mais lentamente que as terras adjacentes porque água tem uma capacidade maior de "estocar" calor.

Dessa diferente taxa de aquecimento e resfriamento são criadas enormes massas de ar com temperatura, mistura e características de massas de ar oceânicas ou terrestres, ou quentes e frias. A colisão destas duas massas de ar, quente e fria, gera os ventos da Terra.

No Brasil o vento, como em todos os lugares do mundo, não é constante e varia de acordo com a região. O mapa abaixo mostra a intensidade do vento em diversas regiões:

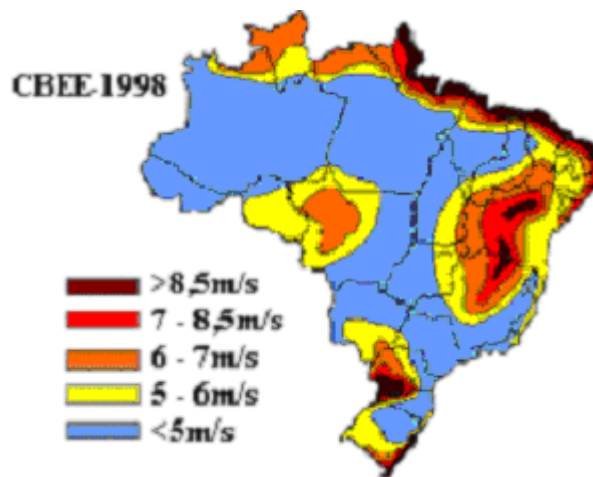


Fig.01- Intensidade do vento no Brasil.

3.1. A potência do vento:

Existe uma regra que dá a potência gerada pelos cata-ventos e turbinas de vento. É importante ressaltar que esta regra é teórica e na prática, não conseguimos converter toda essa potência (teórica) em potência útil.

Potência é igual ao trabalho (Energia) dividido pelo tempo:

$$P = \frac{W}{\Delta t} \quad \text{eq.01}$$

Mas o trabalho realizado pelo vento (que neste caso é igual a sua energia cinética) é:

$$W = K = \frac{mV^2}{2} \quad \text{eq.02}$$

Então, substituindo a eq.01 na eq.02:

$$P = \frac{\frac{mV^2}{2}}{\Delta t} = \frac{mV^2}{2\Delta t} \quad \text{eq.03}$$

O termo $m/\Delta t$ pode ser chamado de taxa de fluxo de massa e, por definição:

$$\frac{m}{\Delta t} = \dot{m} = \rho VA \quad \text{eq.04}$$

Por fim:

$$P_e = e.P_v = e.\frac{\rho V^3 A}{2} \quad \text{eq.05}$$

onde $\rho = 1,29\text{kg/m}^3$ é a densidade do ar (vale lembrar que os fatores que influenciam nessa “constante” são a temperatura, a pressão, a umidade e a altitude), V é a velocidade do vento, A é a área varrida pelas hélices do motor e ‘e’ é a eficiência mecânica e elétrica do sistema que vale aproximadamente 59% , quando o sistema funciona de maneira otimizada.

Talvez seja esta a fórmula mais importante para se conhecer o aproveitamento da energia eólica.

Note que se um vento passa de 10km/hora para 11 km/h (aumento de 10%) a potência se eleva em 33%, o que mostra como é importante a escolha de um

lugar com vento mais veloz para o melhor aproveitamento da energia eólica. Outro exemplo é sobre a área varrida pelo rotor. Com uma hélice de 3 m de diâmetro e um vento de 32 km/h tem-se uma potência de 1000 W; se o diâmetro da hélice for aumentado para 6 m com vento em 32 km/h a potência irá para 4000 W.

4. Descrição do aparato experimental:

Na tentativa de ilustrar a praticidade e a elegância da energia eólica foi projetado um aparato simples com o objetivo didático.

O dispositivo didático consistirá de um ventilador (um “gerador” de vento) acoplado a um túnel de vento, hélices com multi-pás (diversos ângulos), um gerador elétrico simples e instrumentos que comprovaram a produção de eletricidade (multímetros).

O túnel de vento é um aparato que serve para potencializar o vento e, além disso, determinar sua velocidade (isto é, sua energia cinética). Ele foi projetado pelo aluno Éric de Castro como projeto de F 809 (ver ref.3).

4.1. Geradores, os conversores de energia:

Como fazer a conversão da energia mecânica fornecida às hélices pelo vento e ao eixo do rotor em eletricidade? Esta conversão é feita pelos geradores elétricos, que nada mais são do que motores elétricos que ao girarem em torno de seus eixos induzem (pela lei de Faraday) uma corrente elétrica em seus pólos.

Os geradores podem ser basicamente dos tipos "AC" ou "DC", se converterem a energia para a forma de corrente alternada ou contínua (direta), respectivamente. Nesse projeto, o gerador utilizado é do tipo “DC”.

Nos tipos de geradores de corrente contínua (DC), a energia é convertida, como o nome já indica para a forma direta ou contínua de corrente elétrica e carrega uma bateria que acumula esta energia para uso posterior. Esta forma de conversão é um pouco incômoda, pois requer um banco relativamente grande de baterias para que se possa ter uma quantidade de energia razoável num determinado lugar, e além disto, os utensílios domésticos e a maioria dos aparelhos eletrônicos são projetados para funcionar ligados a corrente alternada

devido as facilidades de transporte que esta maneira proporciona. Assim, nos sistemas em que se usam geradores de corrente contínua, é necessário que se tenha ligado juntamente ao sistema um inversor para que se possa utilizar diretamente aparelhos elétricos.

Já os geradores de corrente alternada (AC), geram a eletricidade, como o nome diz, na forma de corrente alternada e pode ser usado diretamente nos nossos aparelhos elétricos e eletrônicos do dia a dia.

Existe porém dois inconvenientes deste tipo de produção de eletricidade: o primeiro é que não se é possível estocar energia na forma de corrente alternada, tendo que retificá-la por meio de diodos, por exemplo, para a forma contínua e armazená-la em bancos de baterias; o segundo inconveniente é que os geradores de corrente alternada geram correntes em freqüências que variam com a velocidade de giro do rotor, e como os ventos variam muito, as freqüências geradas pelo gerador também variam muito; para controlar este problema, visto que nosso sistema de energia tem que estar em torno de 60 Hz (Hertz), é preciso ligar ao sistema um dispositivo que mantenha a freqüência em torno dos desejados 60 Hz; este dispositivo é chamado de inversor síncrono.

Nesse projeto foi utilizado um motor elétrico simples (PASCO) de corrente contínua.

4.2. Hélices:

A função da hélice é transferir a potência do vento para o gerador produzindo corrente. Se não for feita uma seleção adequada da hélice, provavelmente a performance, isto é, a eficiência será prejudicada. Conhecer o seu princípio de funcionamento é de fundamental importância para a instalação do conjunto do motor.

A hélice é especificada pelos seguintes parâmetros:

- Diâmetro;
- Direção de rotação que pode ser direita ou esquerda em função do sentido de rotação do motor;
- Diâmetro do furo do cubo e conicidade;

- Passo (corresponde à distância horizontal que a hélice percorreria, ao dar uma volta, se estivesse embebida num meio sólido), equivalente a definir o ângulo da hélice;

- Número de pás;

As hélices para esse projeto foram confeccionadas em diversos ângulos; 10°, 15°, 20°, 30°, 37,5° e 45°. Elas possuem 12 pás planas e tem um diâmetro de 0,2m (ou seja, possuem uma área de aproximadamente 0,0314m²). Vale lembrar que existe um tipo de hélice com pás semelhantes a uma asa de avião a qual é mais aerodinâmica e eficiente, porém não é o foco desse projeto.

4.3. Montagem experimental:

O motor PASCO e as hélices foram fixados em uma haste e posicionados a frente do túnel de vento (ver fig.02 e fig.03).

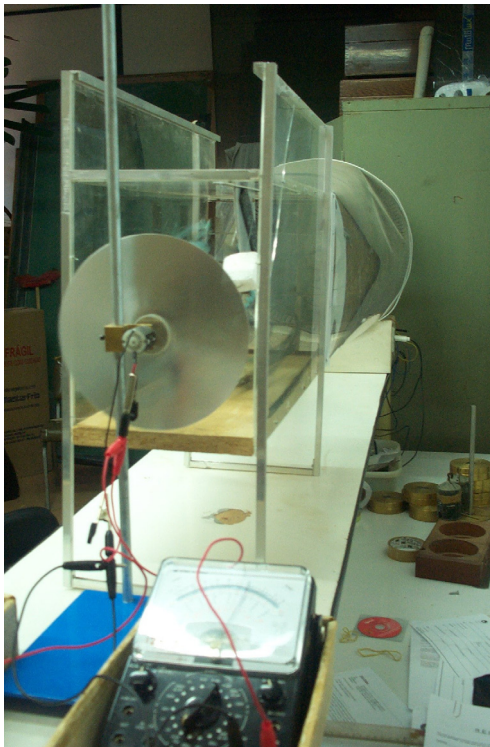


Fig.02- Foto do aparato experimental: o túnel de vento, o multímetro, a haste, o motor e a hélice com o vento ligado.

Para cada tipo de hélice foram medidas a corrente e a tensão gerada (obtendo assim a potência elétrica, $P=U.i$) variando a velocidade do vento. A velocidade do vento produzido pelo túnel foi variada de 5km/h a 30km/h (simulando a velocidade do vento existente no Brasil).



Fig.03- Foto do aparato de outra perspectiva

Note na figura acima o anemômetro formado pelo papel com a escala e o pedaço de isopor preso a um arame, esta foi a forma encontrada de se determinar a velocidade do vento gerada pelo túnel (ver ref. 3).

Desta forma é possível obter a potência total fornecida pelo vento, a potência elétrica gerada e determinar a eficiência correspondente para as diversas hélices.

5. Dados experimentais:

Seguindo o procedimento descrito anteriormente, foram obtidos os seguintes resultados para cada hélice. Abaixo de cada tabela estão os gráficos da potência elétrica em função da velocidade do vento com um ajuste linear dos pontos experimentais (para uma melhor visualização didática). Esses gráficos foram construídos no software Origin 6.0.

Os erros associados à medida da corrente e tensão elétrica são puramente instrumentais e não foram levados em conta nesse projeto.

→ Hélice multi-pá com ângulo de 10°;

v(km/h)	i(mA)	U(V)	Pe(mW)	Pv(W)
30	350	0,2	70	547,09
25	330	0,19	62,7	316,60
17,5	290	0,17	49,3	108,59
15	280	0,16	44,8	68,38
10	240	0,135	32,4	20,26
5	150	0,08	12	2,53

Tab. 01- Dados coletados referentes à hélice multi-pá com ângulo de 10°.

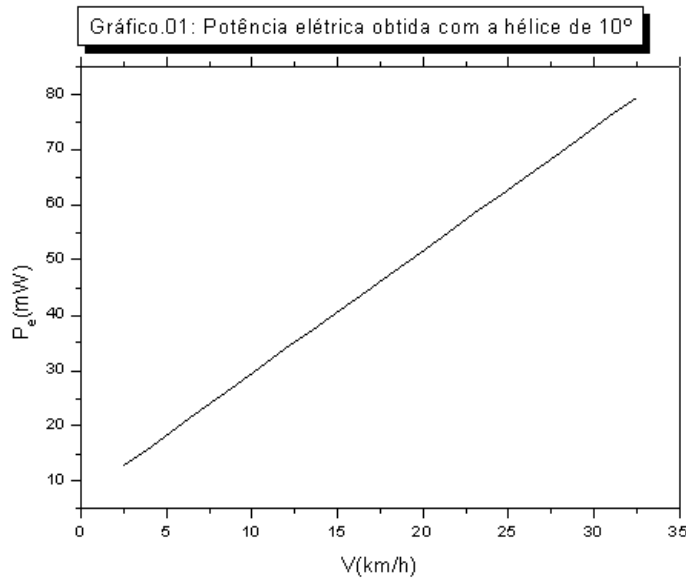


Fig.04- Gráfico da potência elétrica pela velocidade para o ângulo de 10°.

→ Hélice multi-pá com ângulo de 15°;

v(km/h)	i(mA)	U(V)	Pe(mW)	Pv(W)
30	380	0,215	81,7	547,09
25	360	0,205	73,8	316,60
20	340	0,19	64,6	162,10
15	280	0,165	46,2	68,38
10	270	0,155	41,85	20,26
5	150	0,085	12,75	2,53

Tab. 02- Dados coletados referentes à hélice multi-pá com ângulo de 15°.



Fig.05- Gráfico da potência elétrica pela velocidade para o ângulo de 15°.

→ Hélice multi-pá com ângulo de 20°;

v(km/h)	i(mA)	U(V)	Pe(mW)	Pv(W)
30	360	0,21	75,6	547,09
22,5	290	0,19	55,1	230,80
20	270	0,15	40,5	162,10
15	240	0,14	33,6	68,38
7,5	160	0,1	16	8,54

Tab. 03- Dados coletados referentes à hélice multi-pá com ângulo de 20°.

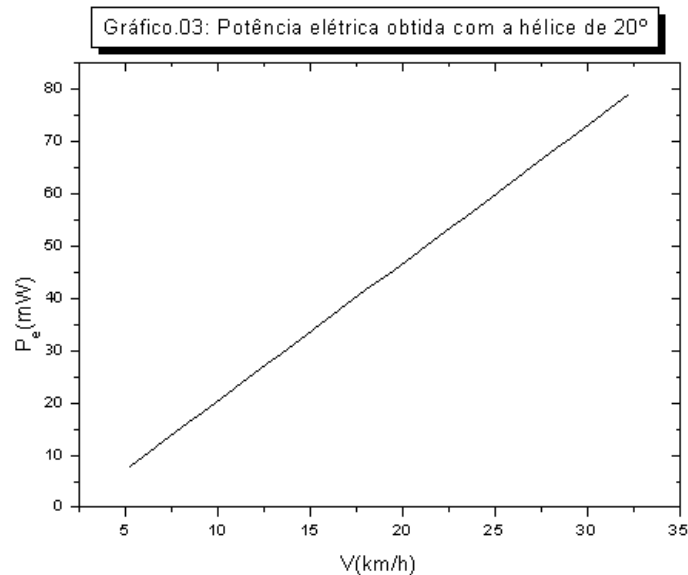


Fig.06- Gráfico da potência elétrica pela velocidade para o ângulo de 20°.

→ Hélice multi-pá com ângulo de 30°;

v(km/h)	i(mA)	U(V)	Pe(mW)	Pv(W)
30	340	0,17	57,8	547,09
25	280	0,135	37,8	316,60
20	210	0,12	25,2	162,10
15	195	0,105	20,47	68,38
10	170	0,09	15,3	20,26
5	135	0,07	9,45	2,53

Tab. 04- Dados coletados referentes à hélice multi-pá com ângulo de 30°.

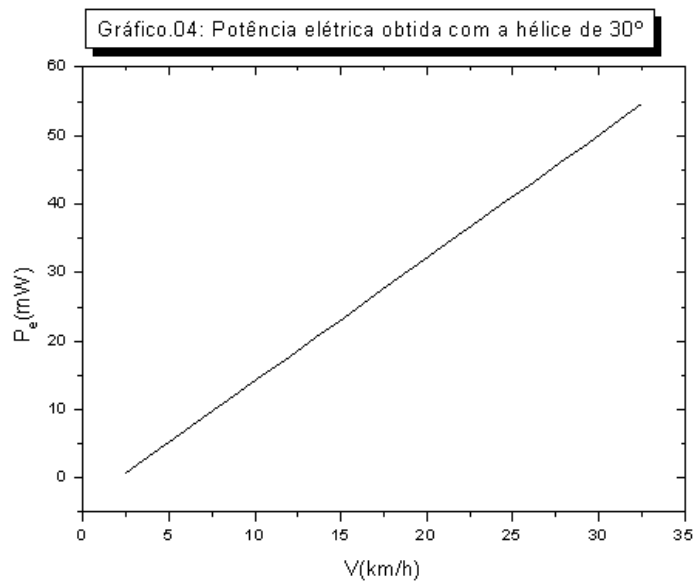


Fig.07- Gráfico da potência elétrica pela velocidade para o ângulo de 30°.

→ Hélice multi-pá com ângulo de 37,5°;

v(km/h)	i(mA)	U(V)	Pe(mW)	Pv(W)
30	310	0,14	43,4	547,09
25	270	0,115	31,05	316,60
20	220	0,095	20,9	162,10
17,5	210	0,09	18,9	108,59
10	175	0,075	13,12	20,26
5	95	0,055	5,22	2,53

Tab. 05- Dados coletados referentes à hélice multi-pá com ângulo de 37,5°.

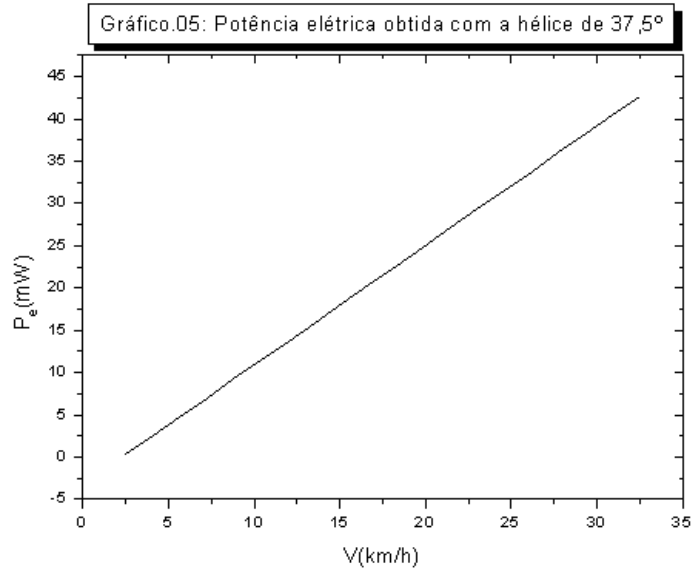


Fig.08- Gráfico da potência elétrica pela velocidade para o ângulo de 37,5°.

→ Hélice multi-pá com ângulo de 45°;

v(km/h)	i(mA)	U(V)	Pe(mW)	Pv(W)
30	260	0,12	31,2	547,09
22,5	170	0,085	14,45	230,80
20	160	0,08	12,8	162,10
15	140	0,07	9,8	68,38
7,5	120	0,06	7,2	8,54

Tab. 06- Dados coletados referentes à hélice multi-pá com ângulo de 45°.

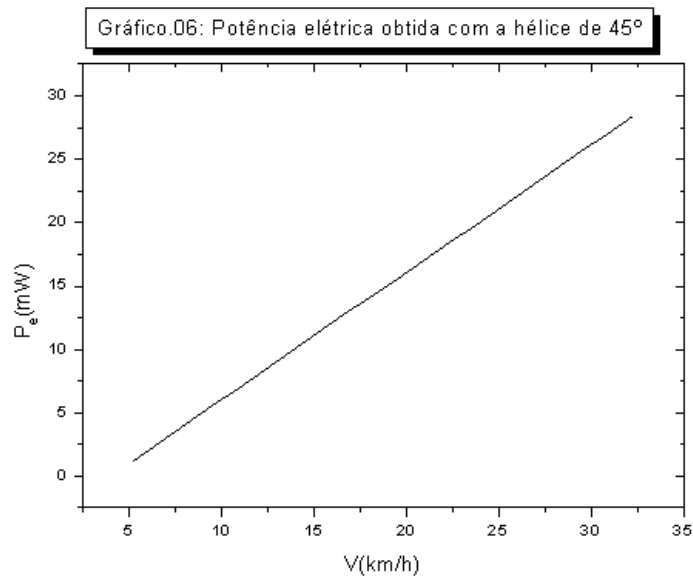


Fig.09- Gráfico da potência elétrica pela velocidade para o ângulo de 45°.

6. Análise dos resultados:

Comparando todos os resultados coletados pode-se afirmar que a hélice com o ângulo de 15° é mais eficiente do que as demais testadas.

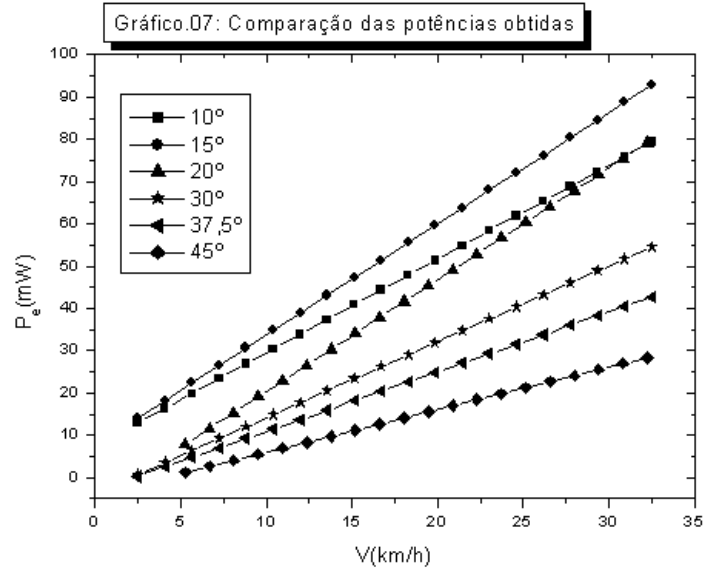


Fig.10- Comparativo das diversas hélices.

Ainda é possível observar pelos gráficos mostrados que, para todas as hélices, o aumento da velocidade do vento gera um aumento na potência elétrica produzida.

No entanto vale notar que a eficiência ($e = P_e/P_v$) diminui com o aumento da velocidade, isto é, quanto maior a velocidade do vento menos o motor consegue aproveitá-lo. Isto certamente se deve ao fato desta hélice não ser adequada para altas velocidades do vento, talvez um outro perfil e contorno periférico da pá dê melhores resultados em altas velocidades.

Veja, por exemplo, para a hélice de 15°:

P_e (mW)	V(km/h)	P_v (W)	e (10^{-3})
81,7	30	547,09	0,14
73,8	25	316,60	0,23
64,6	20	162,10	0,39
46,2	15	68,38	0,67
41,85	10	20,26	2,06
12,75	5	2,53	5,03

Tab. 7- Eficiência da hélice com 15°.

A eficiência é de aproximadamente de 59% , quando o sistema funciona de maneira otimizada. Nesse caso a eficiência é bem menor devido a vários fatores os quais não foram abordadas nesse projeto em vista que a intenção é puramente didática.

Agora, estabelecendo uma relação entre a potência elétrica e o ângulo das hélices pode-se determinar o ângulo ótimo para 30, 25 e 15km/h, novamente, utilizando o software Origin 6.0.

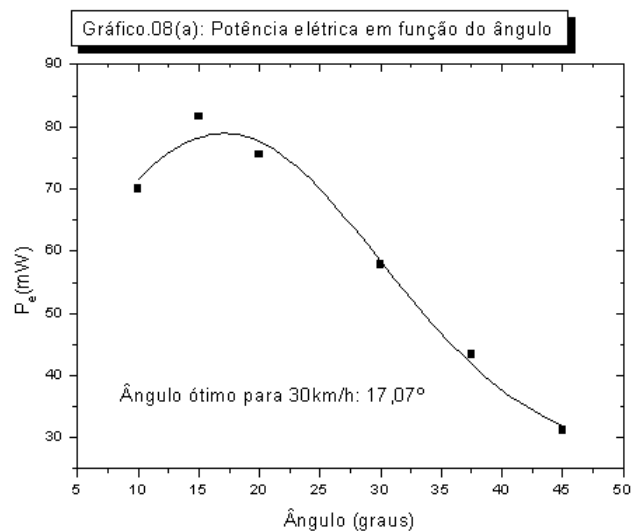


Fig.11- Gráfico da potência elétrica pelo ângulo para 30km/h.

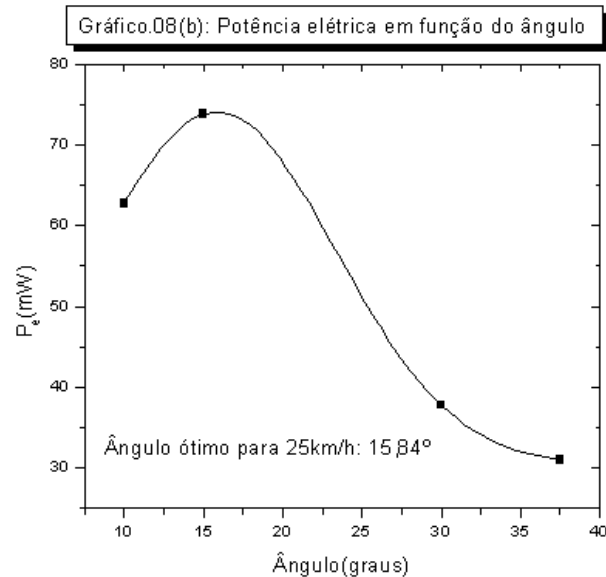


Fig.12- Gráfico da potência elétrica pelo ângulo para 25km/h.

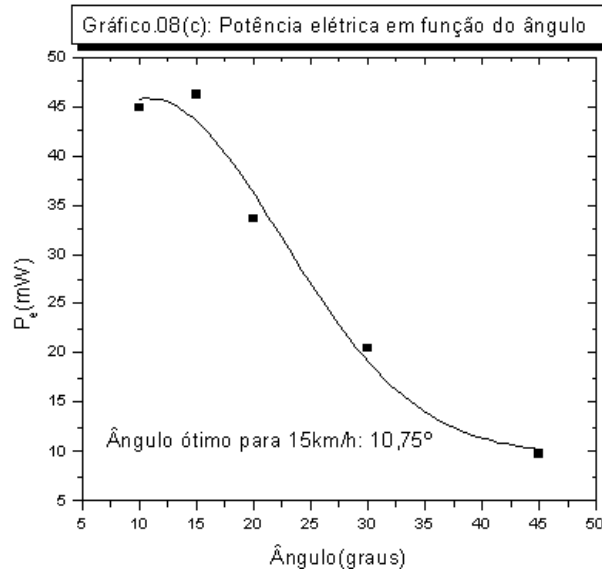


Fig.13- Gráfico da potência elétrica pelo ângulo para 15km/h.

Obs: Para os gráficos acima foi feito um ajuste gaussiano dos pontos.

Um estudo mais aprofundado e detalhado possibilitaria determinar o ângulo ótimo em função da velocidade. Desta forma, dependendo da região (onde o vento possui uma velocidade média característica) pode-se escolher a hélice apropriada otimizando a produção de energia eólica.

Como já foi dito anteriormente, o objetivo central desse projeto é didático, desta forma não foi dada atenção ao erro nas medidas.

7. Conclusão:

O vento é uma fonte inesgotável e não poluente de energia alternativa chamada de energia eólica. Nesse projeto de F809 o objetivo foi mostrar de forma didática a produção de eletricidade através do vento e analisar a eficiência de uma hélice semelhante à de um moinho de vento com diferentes ângulos das pás.

A hélice mais eficiente foi a de 15°, obviamente porque esse ângulo está próximo do limite entre a máxima componente tangencial do vento (que realiza o torque na hélice por ação e reação) e o mínimo em dissipação de energia. Fazendo uma análise mais detalhada será possível determinar o ângulo ótimo

para certas velocidades do vento. Esse estudo é de extrema importância quando se deseja aproveitar a energia que o vento oferece da forma mais eficaz possível.

No futuro, dando seqüência a esse projeto de instrumentação, pode-se implementá-lo com outras tecnologias visando aumentar a eficiência como, por exemplo, utilizando hélices de apenas 3 pás com uma aerodinâmica mais eficiente (com perfil da seção perpendicular ao eixo da pá semelhante a asa de um avião) ou uma caixa de engrenagens aumentando a rotação do motor.

No Brasil, a previsão do CCPE/MME indicou um crescimento médio de 6% a.a do consumo de energia elétrica para o próximo decênio. Para atender a esse aumento, o governo espera que as fontes renováveis complementem a matriz energética brasileira. Entretanto, embora o Brasil tenha regiões onde o vento é favorável para tal finalidade, o país explora uma porção mínima (22MW) do seu grande potencial de geração de energia eólica.

O uso amplo da energia eólica deverá ser incentivado pela necessidade de se preservar o meio ambiente, ou seja, garantir a sobrevivência da humanidade. Isso depende unicamente do desenvolvimento tecnológico e conscientização da humanidade.

8. Referências bibliográficas:

[1]- <http://www.eolica.com.br>; CBEE (Centro Brasileiro de Energia Eólica)

[2]- <http://energiaeolica.predialnet.com.br/>;

[3]-“Construção de um túnel de vento e estudo da aerodinâmica”, Eric de Castro e Andrade; projeto de F809;

[4]-“Metodologias de análise de risco para avaliação financeira de projetos de geração eólica”, Ana Claudia Nioac de Salles; UFRJ ; março de 2004;

[5]- Outros links interessantes: -http://www.cresesb.cepel.br/links_i_eol.htm

-<http://www.wind-works.org/bio.html>

-<http://www.eletróbrás.gov.br>