

Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 127-132, 1996.

Recebido para publicação em 11/09/1995. Aprovado em 08/02/96.

ISSN 0104-1347

CURVAS DE DURAÇÃO DA VELOCIDADE DE VENTO PARA BOTUCATU-SP

WIND DURATION VELOCITY CURVE TO BOTUCATU - SP, SITE

Sérgio Marques Júnior¹, Ana Rita Rodrigues Vieira² e Maria Vilma Tavares de Moura³

RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi identificar e analisar a variabilidade existente nas curvas de duração de velocidade de vento para a região de Botucatu, Estado de São Paulo e determinar a velocidade nominal do vento para a região. Para esse estudo foram utilizados dados diários de velocidade de vento (km/dia) correspondentes aos anos de 1980, 1984, 1988 e 1992, coletados junto ao posto meteorológico localizado na Estação Meteorológica Presidente Medici, município de Botucatu, Estado de São Paulo SP, cujas coordenadas geográficas correspondem à latitude de 22°51'S, longitude de 48°26'W e altitude 786 m. Os resultados mostraram que esse evento meteorológico pode ser adequadamente representado por um modelo sigmoidal com coeficiente de determinação em torno de 0,98. Utilizando-se de um intervalo de confiança ao nível de 95%, verificou-se que as curvas de duração de vento do período estudado podem ser adequadamente representadas pela curva média dos anos. A partir dessa análise pode-se verificar que a velocidade nominal do vento corresponde à 184,974 km/dia para a região.

Palavras - chave: vento, catavento, potencial eólico.

SUMMARY

¹Prof. Assistente. M. Sc. Depto. Engenharia Rural. CCA/UFSC. C.P.476. Itacorubi. CEP 88040-900. Florianópolis, SC. e-mail: smarques@mbox1.ufsc.br.

²Prof. Adjunto, Dr. Depto. Fitotecnia, CCA/UFSC. C. P. 476. Itacorubi. CEP 88040-900, Florianópolis, SC. e-mail: fit1arv@npd.ufsc.br.

³Engº Agrº, M. Sc., Secretaria da Agricultura e Abastecimento do Rio Grande do Norte. BR 101. Centro Administrativo. Natal, RN. CEP 59075-050.

This paper objective was to determinate the wind velocity curve variability to Botucatu, SP, and the nominal wind velocity to the site. The daily wind velocity data (km/day) used in this study were collected in the years 1980, 1984, 1988 and 1992 from Presidente Medici Metheorological Station, located at 22°51'S, 48°26'W and 786 meters of altitude, in Botucatu, State of São Paulo, site. The results showed that occurrence meteorology can be representated by a sigmoid model, with coefficient determination closed to 0.98. Using 95% confidence limits, it was observed that wind curve velocity can be representative by wind curve media. To the site, the nominal wind velocity was 184.974 km/day.

Key word: wind, windmill, wind power.

INTRODUÇÃO

O emprego dos ventos como fonte alternativa de energia tem se tornado ponto importante de pesquisa seja ela de forma técnica ou econômica. Tewari (1978) apud PANDA e (1988) verificou que o custo de elevação de água realizada por um catavento modelo TOOL-ORP foi aproximadamente 39% mais barato do que a utilização de um sistema de bombeamento com motor a diesel. TEWARI (1981) comenta que um motor eólico projetado para trabalho em velocidade de vento na ordem de 12 km/h pode ser econômico para bombeamento de água para irrigação com alturas manométricas de recalque na ordem de 10 a 15 metros.

Para uma utilização mais criteriosa desse elemento meteorológico como fonte alternativa de energia, principalmente porque o vento pode ser considerado como aquele que apresenta a maior variabilidade espaço-temporal, o valor a ser adotado como representativo para uma região não deve estar baseado simplesmente na determinação de velocidades máximas que esse parâmetro assume ao longo do tempo, mas relacioná-la com o tempo de ocorrência do fenômeno ao longo do ano.

Diversos estudos são encontrados em literatura (PARIKH & BHATTACHARYA, 1984; PANDA et al, 1988; MISHRA & SHARMA, 1992;) envolvendo estimativas de potencial eólico e sua utilização no meio agropecuário. A utilização do vento como energia alternativa para sistemas agrícolas, está baseada no aproveitamento da energia cinética (E_c) gerada no ambiente. Esse elemento meteorológico corresponde à uma massa de ar em movimento, cuja energia resultante pode ser dimensionada como:

$$E_c = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad \mathbf{1}$$

onde m corresponde à massa de ar em movimento e v a velocidade do vento. É passível de se verificar que existe grande dificuldade em se determinar com exatidão a componente m da equação 1. Nessa situação, a componente m pode ser estimada em função da massa específica (\tilde{m}) do fluido em movimento:

$$m = \tilde{m} \cdot A \cdot V \cdot t \quad \mathbf{2}$$

onde A corresponde à área pela qual se desloca a massa de ar e t o tempo no qual a massa de ar atravessa a área A . A massa específica corresponde à relação entre massa do fluido e o volume que ocupa no espaço. Haja vista que o fluido se encontra em movimento, o volume de ar (V) deslocado pode ser estimado pela relação entre área e velocidade de escoamento do fluido.

A potência eólica (P) gerada no movimento da massa de ar corresponde à energia produzida dentro de um intervalo de tempo, podendo ser então assumida como:

$$P = \frac{\tilde{m} \cdot A \cdot v^3}{2} \quad \mathbf{3}$$

Supondo-se constante a área de captação da massa de ar em movimento (área formada pelas hélices de um motor eólico, por exemplo), a potência eólica pode ser expressa como sendo unicamente função da velocidade do vento, ou seja:

$$P = k \cdot v^3 \quad \mathbf{4}$$

onde k corresponde a uma constante, formada pela multiplicação dos parâmetros massa específica do fluido em movimento e área de deslocamento da massa de ar, dividida pela constante. A

partir dessa equação, é possível então estimar-se a potência disponível de vento a partir de sua velocidade. Nota-se que essa equação reproduz a equação dimensional de potência ou seja, $[M] \cdot [L^2] \cdot [T^{-3}]$.

Entretanto, a adoção de um valor de velocidade do vento que caracterize uma certa região é polêmica. Velocidades máximas locais instantâneas ou médias são pouco representativas quando não se conhece a distribuição do evento na região ao longo do tempo, o que pode gerar super dimensionamento de estruturas ou mecanismos que venham a utilizar essa fonte de energia, cujo resultado final é sua sub-utilização.

De acordo com Ortolani (1986) citado por ANGELOCCI et al. (1995) as velocidades instantâneas máximas de vento têm uma variação significativa com a época do ano, latitude e altitude (análise esta feita para o Estado de São Paulo), o que mostra claramente o perigo na adoção desse valor como critério para caracterização de uma determinada região.

O objetivo do presente trabalho é determinar, a partir de ajustes matemáticos, a curva provável de duração da velocidade de vento para Botucatu, Estado de São Paulo, como subsídio para a determinação da velocidade nominal do vento para a região. A determinação da velocidade nominal dos ventos é fundamental para um bom dimensionamento e manejo de qualquer motor eólico a ser utilizado no local.

MATERIAL E MÉTODOS

Nos diversos procedimentos matemáticos passíveis de serem utilizados como estimativa da distribuição do vento, para esse estudo procurou-se utilizar uma metodologia baseada em curvas de velocidade de vento. Curvas de velocidade de vento podem ser entendidas como distribuições que relacionem velocidade do vento com o número de dias em que ocorrem por ano, baseando-se na argumentação proposta por MIALHE (1980).

Essa relação pode ser obtida conhecendo-se a velocidade média horária do vento ao longo do ano, resultando então em 8760 dados, cujos valores são agrupados em níveis crescentes de ocorrência, de zero até a máxima velocidade média horária existente no período. Para cada nível, soma-se o número de dias durante os quais a velocidade média diária foi maior ou igual à velocidade daquele nível pré-estabelecido, resultando então em uma curva acumulada de dados, ou seja, número de dias por ano (variável dependente) em que ocorre um valor de velocidade de vento menor ou igual ao valor da velocidade de vento analisado (variável independente).

Na impossibilidade de se contar com 8760 dados de velocidade de vento, o que corresponderia

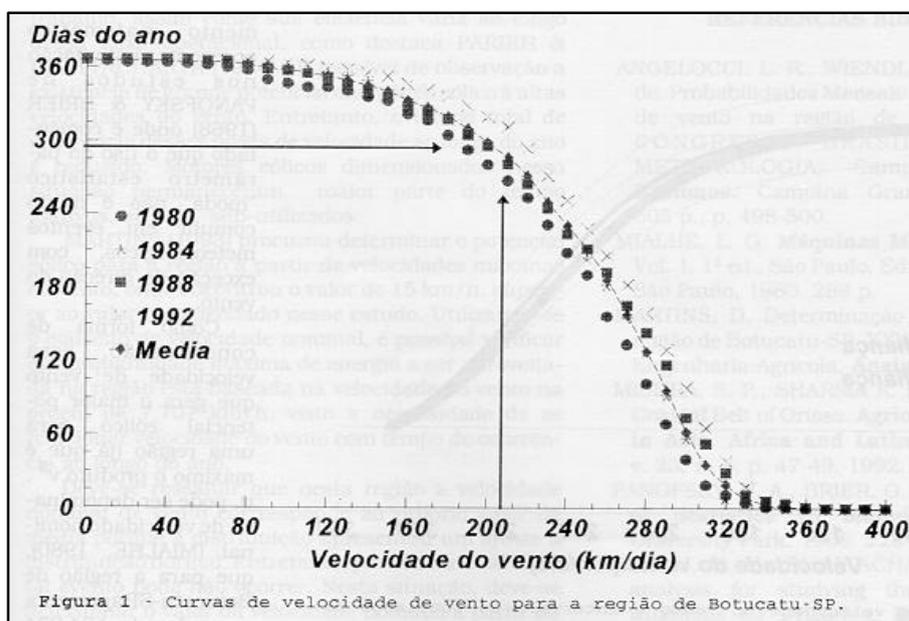
à velocidade horária do vento ao longo de todo o ano, para esse estudo foram utilizados dados diários de velocidade de vento (km/dia) correspondentes ao anos de 1980, 1984, 1988 e 1992, coletados junto ao posto meteorológico localizado na Estação Meteorológica Presidente Medici, Município de Botucatu, Estado de São Paulo- SP, cujas coordenadas geográficas correspondem à latitude de 22°51' S, longitude de 48°26' W e altitude de 786 m.

A partir desses dados, construiu-se um gráfico cartesiano, onde foi possível visualizar o ajuste da curva plotada a um modelo matemático que represente fisicamente o evento meteorológico. Como nesse caso, procurou-se determinar qual o número de dias que ocorre determinado valor de vento para uma região específica, esta variável corresponde à variável dependente do modelo onde procurou-se estimar, para cada ano, a equação que representasse fisicamente o fenômeno discutido. Deve-se salientar que a substituição de dados horários por dados diários pode levar a erros de estimativa, mas que não invalidam sobremaneira sua utilização.

De posse dos dados de duração de velocidade de vento em cada ano aqui utilizado em função das curvas obtidas, procurou-se estimar a curva de duração média para a localidade, que servirá como a base de análise e comparação da variabilidade existente entre os anos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta os valores de velocidade do vento ocorrentes nos anos de 1980, 1984, 1988 e 1992 para a região em estudo, assim como o ajuste da equação média obtida. Foram geradas a partir da acumulação dos valores diários de velocidade de vento em função do número de dias que



ocorre um determinado valor de velocidade.

As curvas apresentadas demonstram quantos dias por ano ocorre um valor maior ou igual a um determinado valor de velocidade do vento. Por exemplo, baseando-se na equação média, existem 300 dias por ano na região onde a velocidade do vento é maior ou igual à 205 km/dia, 120 dias por ano onde a velocidade do vento é maior ou igual à 290 km/dia, e assim por diante.

Realizando-se o ajuste matemático dessa distribuição de pontos, pode-se verificar que em todos os anos o modelo de equação sigmoidal apresentou alto grau de ajuste ao fenômeno discutido, modelo este expresso na seguinte equação:

$$f(x) = a + \frac{b}{\left[1 + e^{\left(\frac{x-c}{d}\right)}\right]}$$

5

onde a, b, c e d são parâmetros de ajuste da equação, "e" a base dos logaritmos neperianos e X a variável independente (que no caso corresponde ao valor da velocidade do vento).

A Tabela 1 apresenta as estimativas dos parâmetros encontrados para equações ajustadas de curva de velocidade de vento, assim como o coeficiente de determinação (r²) e o valor do Teste F para o ajuste.

Tabela 1 - Estimativas dos parâmetros das equações ajustadas através do modelo sigmoidal.

Ano	a	b	c	d	r ²	Teste F
1980	-54,1393	413,7342	259,6779	-39,3937	0,9968	3280,143
1984	-61,4389	424,2666	267,9439	-37,8782	0,9965	2722,367
1988	-64,6962	426,5177	273,5727	-42,6866	0,9967	2740,147
1992	-51,9605	417,0540	277,9161	-36,5741	0,9985	5475,220
Média	-50,1869	411,9218	267,6518	-38,7154	0,9977	3977,735

Tabela 2 - Intervalo de confiança para a equação média (com 95% de confiança).

Parâmetro	Intervalo de confiança
a	-69,0104 a -31,3635
b	390,3265 a 433,5124
c	263,0169 a 272,2867
d	-42,2632 a -35,1677

Através dos valores apresentados na Tabela 1, verifica-se que o grau de ajuste do modelo de

equação sigmoïdal é justificado pelo valor do teste F (análise de variância) altamente significativo em todos os testes.

Buscando-se avaliar o grau de representatividade dos anos, optou-se por utilizar uma análise dos intervalos de confiança (adotada ao nível de 95%) dos parâmetros de ajuste em relação à equação média (obtida através dos parâmetros a,b,c e d apresentados na Tabela 1 no formato da equação 5). Dados necessários para essa análise podem ser verificados na Tabela 2.

O intervalo de confiança significa, de uma maneira geral, a faixa na qual espera-se que em 95 % dos casos, ocorra o valor do parâmetro de ajuste do modelo proposto. Fisicamente pode-se dizer que, ocorrendo os parâmetros dentro do intervalo de confiança da equação média, qualquer ano pode representar o fenômeno discutido, dentro de um certo grau de confiabilidade.

Neste contexto, verifica-se que os parâmetros de ajuste das equações dos diferentes anos apresentam-se próximas dos limites de confiança da equação média, o que demonstra o grau de confiabilidade que os valores estimados em cada ano representam em relação à uma estimativa média. Esse fenômeno pode ser visualizado na Figura 2.

É interessante salientar que na Figura 2 os valores apresentados da variável dependente não têm significado físico, já que não poderia existir, por exemplo, 400 dias por ano. Esses valores têm apenas significado matemático, já que referem-se aos limites de confiança de uma função.

Verifica-se na equação 4, que a potência disponível do vento é proporcional ao cubo de sua velocidade. Assim, elevando-se ao cubo os valores da variável independente do gráfico cartesiano da equação média (valores de velocidade do vento) e multiplicando cada valor obtido à sua respectiva variável dependente (número de dias), é possível determinar uma curva de potencial eólico relativo (porque é função dos valores médios) em termos diários para a região, não levando em consideração a distribuição da velocidade do vento ao longo do dia.

Deve-se ressaltar que os valores de variáveis dependentes resultantes desse procedimento apenas indicam um potencial eólico relativo à velocidade de vento incidente e não à potência disponível para a região, já que é apenas uma comparação da velocidade do vento e o número de dias que ocorre por ano. O gráfico cartesiano resultante pode ser observado na Figura 3.

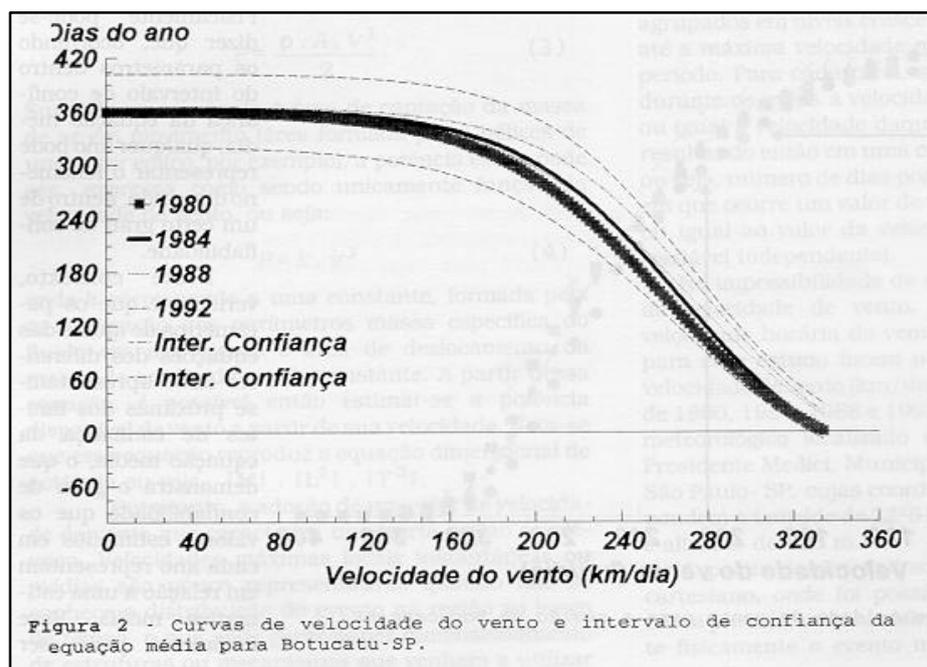
Os valores da variável dependente apresentados na Figura 3 também não têm significado físico, já que não foi relacionado o valor da constante k da equação 4, nesta situação. Essa curva pode ser ajustada a um modelo gaussiano, com o coeficiente de determinação (r^2) estimado em 0,961. O ponto de máximo dessa função está relacionado ao valor da velocidade nominal do vento sob a qual

ocorre o maior potencial energético disponível na região. Matematicamente, esse valor é obtido a partir da derivada de primeira ordem da equação ajustada.

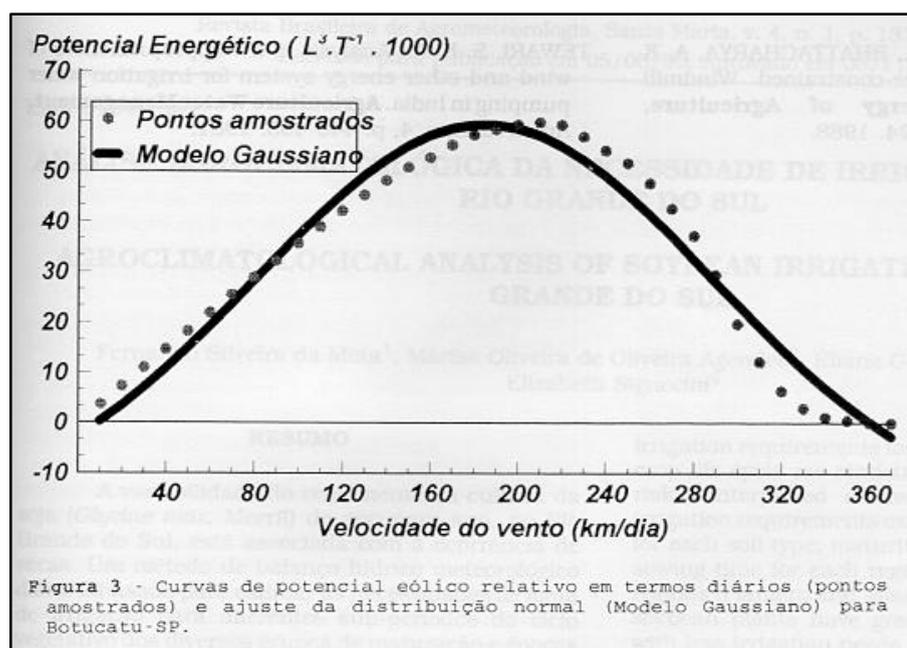
Entretanto, haja visto que os pontos amostrados apresentam distribuição normal (Modelo de Gauss), o ponto de máximo da função corresponde ao valor médio da distribuição assim como também corresponde ao valor da “moda” da distribuição. A “moda” representa então, o valor da velocidade de vento a qual deve estar associado o maior potencial eólico da região. Esse desenvolvimento matemático apresenta sustentação nos estudos de PANOFSKY & BRIER (1968) onde é comentado que o uso do parâmetro estatístico "moda" não é muito comum em eventos meteorológicos, com exceção da direção do vento.

Como forma de conceituação, essa velocidade de vento que gera o maior potencial eólico para uma região (já que é máximo o produto $v^3 \cdot t$), pode ser denominada de velocidade nominal (MIALHE, 1980), que para a região de Botucatu-SP apresenta um valor de 184,974 km/dia (7,707 km/h) pela equação ajustada. Pela amostra utilizada (dados utilizados para obtenção do ajuste matemático) o valor encontrado foi de 210 km/dia (8,750 km/h).

O dimensionamento de motores eólicos para uma determinada região deve ser então baseado no valor de velocidade nominal de vento, haja vista que os motores eólicos apresentam faixas de variação de trabalho, assim como sua eficiência varia ao longo dessa faixa operacional, como destaca PARIKH & BHATTACHARYA (1984). É passível de observação a existência de grande potencial energético eólico à altas velocidades do vento. Entretanto, o tempo total de ocorrência desses níveis de velocidade ao longo do ano é reduzido. Motores eólicos dimensionados nessa situação permaneceram maior parte do tempo inativos, ou seja, sub-utilizados.



MARTINS (1993) procurou determinar o potencial eólico para a região a partir de velocidades máximas do vento, onde encontrou o valor de 15 km/h, superior ao valor recomendado nesse estudo. Utilizando-se o conceito de velocidade nominal, é possível verificar que a quantidade máxima de energia a ser aproveitada na região está baseada na velocidade do vento na ordem de 7,707 km/h, visto a necessidade de se relacionar velocidade do vento com tempo de ocorrência ao longo do ano.



Deve-se ressaltar que nesta região a velocidade nominal de vento corresponde ao próprio valor da média porque a distribuição apresentou um ajuste à distribuição normal. Entretanto, para outra localidade tal evento pode não ocorrer. Nesta situação, deve-se determinar o valor da velocidade nominal a partir da derivada de primeira ordem da equação de potencial eólico relativo, como comentado anteriormente.

CONCLUSÕES

Em função dos resultados encontrados, concluir-se que:

- para a região de Botucatu-SP, as curvas de duração de velocidade de vento podem ser ajustadas a partir de um modelo matemático sigmoidal. Curvas de anos individuais apresentam-se dentro do intervalo de confiança da equação média dos anos, o que pressupõe-se que qualquer dos anos utilizados representam a curva característica para o local, assim como a própria equação média obtida a partir de valores médios dos anos.

- a maior disponibilidade de potencial eólico para a região é obtida quando a velocidade do vento corresponde à 184,974 km/dia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANGELOCCI, L. R., WIENDL, F. W., ARRUDA, H. V. de. Probabilidades Mensais de ocorrência de rajadas de vento na região de Piracicaba-SP. **In: IX CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA**, Campina Grande, 1995. **Resumos**. Campina Grande: SBA/ Pb. 1995, 505 p., p. 498-500.
- MIALHE, L. G. **Máquinas Motoras na Agricultura**. Vol. 1. 1ª ed., São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo, 1980. 289 p.
- MARTINS, D. Determinação do potencial eólico na região de Botucatu-SP. XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. **Anais**. Ilhéus, 1993. 1413 p.
- MISHRA, S. P., SHARMA K. N. Utility of windmill in Coastal Belt of Orissa. **Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America**, Amsterdan, v. 23, n. 4, p. 47-49. 1992.
- PANOFSKY, H. A., BRIER, G. W. **Some Applications of Statistics to Meteorology**. Pennsylvania, University Park, 1968. 223 p.
- PARIKH, M. M., BHATTACHARYA, A. K. Wind data analysis for studying the fesiability of using windmills for irrigation. **Energy in Agriculture**, Amsterdan, v. 3, p. 129-136, 1984.
- PANDA, R. K, SARKAR T. K., BHATTACHARYA, A. K Cost estimate of Chance-constrained Windmill irrigation system. **Energy of Agriculture**, Amsterdan, v. 6, p. 311-324. 1988.
- TEWARI, S. K. An Analysis of the appropriateness of wind and other energy system for irrigation water pumping in India. **Agriculture Water Management**, Amsterdan, v. 4, p. 445-455. 1981.