



## PROGRAMA PARA CÁLCULO DA PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE DE GERADORES EÓLICOS

**Paulo C. M. de Carvalho** – carvalho@dee.ufc.br

Universidade Federal do Ceará - UFC, Departamento de Engenharia Elétrica - DEE

Avenida Umberto Monte, S/N - Campus do Pici

Caixa Postal - 6001

60455-760 – Fortaleza, CE

**Francisco R. Sabino Júnior** – sabinoj@chesf.gov.br

Companhia Hidro Elétrica do São Francisco - Chesf

Delmiro Gouveia, 333 San Martin Bloco D Sala 208

22290-270 – Recife, PE

**Resumo:** *O presente trabalho apresenta uma ferramenta computacional para o cálculo da produção de eletricidade de geradores eólicos de pequeno porte. Como aspecto positivo, o programa permite ao usuário utilizar-se de dados de medição eólica na forma bruta, ou seja, medições, geralmente horárias, realizadas ao longo de um determinado período sem nenhum tratamento estatístico. Essas medidas são a base para o cálculo das estatísticas de vento do local. O fato do programa permitir a entrada de dados na forma bruta insere uma relevância ao trabalho, uma vez que programas existentes geralmente impõem como entrada de dados uma forma processada, isto é, na forma de valores médios obtidos em cima de uma campanha de medição. No entanto, visando também atender a situações nas quais apenas valores médios de velocidade de vento estão disponíveis, o programa utiliza também como segunda opção de entrada dados processados, isto é, dados médios de velocidade de vento. O programa possui como vantagem adicional curvas de potência de geradores eólicos de pequeno porte anexadas ao banco de dados. O programa utiliza como base operacional a plataforma Excel 2000®, marca registrada pela Microsoft, visando uma abordagem de fácil comunicação com o usuário. No programa, os dados de vento utilizados foram medidos pela CHESF na Praia Mansa, Mucuripe, Fortaleza-CE, entre os meses de junho e novembro de 1993 em alturas distintas de 10 e 30 metros.*

**Palavras-chave:** *Energia Eólica, Geradores Eólicos de Pequeno Porte, Dados Brutos*



## **1. INTRODUÇÃO**

A geração de energia elétrica a partir dos ventos é a que apresenta na atual conjuntura a maior taxa de crescimento em nível mundial. Apesar de já se encontrar mundialmente bastante avançado, o setor eólico tem como meta ocupar uma parcela crescente de participação na geração mundial de energia elétrica na matriz energética do planeta. No campo do aproveitamento eólico em nível de Brasil, os primeiros estudos de viabilidade técnica, financeira e econômica foram feitos no estado do Ceará, através da empresa COELCE no início da década de 1990. Atualmente o estado é o maior produtor de energia elétrica originária dos ventos em toda a América do Sul, com uma potência instalada de 17,4 MW segundo a ANEEL enquanto que o país tem instalados 22 MW.

Dentro desta conjuntura, os geradores eólicos de pequeno porte (até 30 kW) têm ocupado cada vez mais posição de destaque, principalmente em tarefas como carregamento de baterias e acionamento de unidades de bombeamento de água.

Tendo como ponto de partida esta motivação, um programa computacional para o cálculo da produção de eletricidade de pequenos geradores eólicos é apresentado no presente trabalho. Como primeiro aspecto positivo, o programa permite ao usuário utilizar-se de dados de medição eólica na forma bruta, ou seja, medidas, geralmente horárias, realizadas ao longo de um determinado período, sem nenhum tratamento estatístico. O fato do programa permitir a entrada de dados na forma bruta insere uma relevância à pesquisa. Programas existentes geralmente impõem como entrada de dados uma forma processada, isto é, na forma de valores médios obtidos em cima de uma campanha de medição. Em outros programas, o usuário deve utilizar uma entrada de dados no formato de distribuição de frequências. No entanto, visando atender a situações nas quais apenas valores médios de velocidade de vento estão disponíveis, o programa utiliza também como segunda opção de entrada dados processados, isto é, dados médios de velocidade de vento. Como vantagem adicional, curvas de potência de geradores eólicos de pequeno porte são anexadas ao banco de dados, prática não comum em outros programas. O programa utiliza como base operacional a plataforma Excel 2000®, marca registrada pela Microsoft, visando uma abordagem de fácil comunicação com o usuário. Numa etapa final, os dados obtidos da medição eólica são confrontados com o banco de curvas de potência de geradores de pequeno porte armazenados no programa, levando ao prognóstico da produção de energia elétrica no local escolhido.

## **2. FERRAMENTA COMPUTACIONAL DE AVALIAÇÃO EÓLICA**

No programa, os dados de vento utilizados foram medidos pela CHESF na Praia Mansa, Mucuripe, Fortaleza, entre os meses de junho e novembro de 1993 em alturas distintas de 10 e 30 metros. Estes dados em sua forma bruta são medidas horárias da velocidade do vento e são utilizados como entrada no programa. Todavia, o programa oferece a flexibilidade de inserir valores médios já calculados. O programa possui um banco de dados de curvas de potência de diversas máquinas existentes a nível mundial. Estas curvas indicam os valores de potência que o gerador fornece em função da velocidade do vento.

### **2.1 Tela Principal**

Quando o usuário abre o programa, cujo nome é ventos.xls, a primeira tela apresentada surge como mostrada na figura 2.1.

## Projeto de Energia Eólica

### Planilhas do programa

Dados Brutos

Um ponto de medição

Dois Pontos de medição

Dados Processados



Figura 2.1 - Tela inicial do programa de cálculo de viabilidade eólica

A tela apresenta uma seção intitulada **Planilhas do programa**. Nesta seção encontramos duas divisões: **Dados Brutos** e **Dados Processados**. Na divisão **Dados Brutos**, existem as opções **Um Ponto de Medição** e **Dois Pontos de Medição**.

A primeira divisão **Dados Brutos**, que possui por sua vez dois *hyperlinks*, permite que o usuário ao escolher uma destas opções possa inserir dados de medição de campo, por isso chamados de **Dados Brutos**, através de arquivo. A primeira opção **Um Ponto de Medição** deve ser utilizada para o caso de haver dados de medição de uma altura, enquanto a segunda opção **Dois Pontos de Medição** deve ser utilizada para usuários que possuam dados de medição de duas alturas.

A segunda divisão chama-se **Dados Processados**. Nesta página os valores a serem recebidos são requisitados estarem já processados. Por processados entenda-se o prévio conhecimento de valores calculados em cima de uma medição de campo.

### 2.2 Dados Brutos: Um Ponto de Medição

A página de cálculo a partir de **Dados Brutos** para **Um Ponto de Medição** apresenta três divisões: **Dados do local**, **Características do sistema** e **Dados de Produção da turbina**. Quando solicitada mostra-se como a seguir é vista na figura 2.2. Na figura estão visíveis apenas as duas primeiras divisões, **Dados do local** e **Características do sistema**. Na planilha, as células com fundo escuro estão configuradas para receber dados do usuário, enquanto as células com fundo claro a emitirem valores calculados pelo programa, isto é, estão protegidas para que o usuário por algum descuido não venha a digitar valores em locais impróprios.

#### *Dados do Local*

Na seção, **Dados do local**, o usuário necessita entrar apenas com dois dados. **A altura de medição** e a **rugosidade**. Ambos os valores devem estar em metros.

Dados do local		Valor	
Altura de medição	m	10	<input type="button" value="Abrir"/> <b>Medição</b>
Rugosidade	m	0,0457	
Velocidade média	m/s	9,16	
Desvio padrão		1,68	
Grau de turbulência		0,18	
Fator de forma		6,32	
Fator de escala	m/s	9,84	
Características do sistema		Valores	
Fabricante/Modelo		Fortis/Boreas	<input type="button" value="Abrir"/> <b>Dados de máquina</b>
Altura do cubo	m	30	
Potência	kW	30	

Figura 2.2 - Parte superior da tela de Dados Brutos para um ponto de medição

Os dados de medição devem estar em arquivos no formato Excel. O botão **Abrir** referente a medição permite carregar os valores de medição do vento em local apropriado no programa. O usuário deve selecionar o botão e então procurar o arquivo específico. Quando carregados no programa, os valores de medição do vento são processados para que possam ser emitidos os valores descritos a seguir:

- Velocidade média – a velocidade média obtida foi encontrada calculando-se o valor da velocidade do vento na altura do cubo para cada valor de velocidade medida durante o período de medição. Assim, as velocidades de referência utilizadas para o cálculo da velocidade no cubo são os valores das velocidades medidas. O valor apresentado é o valor médio das velocidades já convertidas para a altura do cubo do gerador.
- Desvio padrão - o desvio padrão calculado utiliza os valores de velocidade à altura do cubo.
- Grau de turbulência - este valor consiste na relação entre o desvio padrão e a velocidade média. Mede a oscilação da velocidade do vento. Quanto menor este valor, mais constantes no tempo são os valores da velocidade do vento.
- Fator de forma - Quanto maior o fator de forma, menor o grau de turbulência.
- Fator de escala - Com a velocidade média e o fator de forma a equação fornece o fator de escala. Junto com o fator de forma, o fator de escala é utilizado no cálculo da distribuição de Weibull.

### **Características do Sistema**

Quando o botão **Abrir** referente a dados de máquina é selecionado, são apresentadas as curvas de máquina em formato de planilha Excel a serem escolhidas. Quando escolhida a máquina, os campos da seção são preenchidos. Ainda que estes valores sejam escolhidos pelo usuário, eles são tratados como dados fixos, pois são valores emitidos pelo programa, por isso são postos em células de cor clara.

O primeiro campo nesta seção trata do fabricante e do modelo do gerador.

A altura do cubo consiste na altura utilizada para cálculo dos valores na seção **Dados do local**. A última célula apresenta a potência do gerador.

### Dados de Produção da Turbina

Os valores desta seção são preenchidos no mesmo instante que os valores da seção **Características do Sistema** são carregados. Nesta seção, a primeira coluna mostra os valores de velocidade do vento. A coluna seguinte apresenta a curva de potência do gerador, isto é, a potência fornecida pelo gerador na respectiva velocidade indicada na primeira coluna e obtida pelos dados do fabricante. A terceira coluna indica a energia gerada em cada valor de velocidade. Este valor é obtido pela somatória dos produtos da potência do gerador pela respectiva frequência dos ventos a mesma velocidade de vento. A produção de energia é explicada no item *Análise da Produção de Energia*. A figura 2.3 mostra como estes dados são apresentados.

#### Dados de Produção da turbina

Velocidade do vento (m/s)	Curva de potência (kW)	Curva de energia (kWh)
0	0	0,00
1	0	0,00
2	1	0,00
3	3	0,00
4	4	0,02
5	6	0,09
6	9	0,20

Figura 2.3 - Área para cálculo de energia na página de Dados Brutos

No fim desta página está disponível o valor da energia produzida pelo gerador. Este valor representa a somatória das energias disponíveis em cada valor de velocidade de vento. O fator de capacidade também se encontra disponível no fim da página. O programa oferece *hyperlinks* para que o usuário possa visualizar os gráficos e retornar à introdução do programa. A figura 2.4 mostra estes campos e *hyperlinks*.

Energia total (kWh)	23,35
Fator de Capacidade (%)	77,83

[Gráficos](#)

[Retornar à página inicial](#)

Figura 2.4 - Energia gerada e fator de capacidade disponível pelo gerador

### 2.3 Gráficos de Dados Brutos: Um Ponto de Medição

O primeiro gráfico apresentado é o histograma, que representa a frequência relativa de cada classe de velocidade do vento disponível no local de medição. Seus valores estão em percentuais. Com os valores calculados com base nos dados de vento, isto é, o fator de forma e o fator de escala, a distribuição de Weibull é formada. Ambas as informações são visualizadas em um mesmo gráfico. A figura 2.5 mostra a distribuição de Weibull em linha e o histograma de velocidade na forma de barras. Nesta figura a curva de Weibull se aproxima do gráfico de barras e serve para uma melhor representação do histograma.

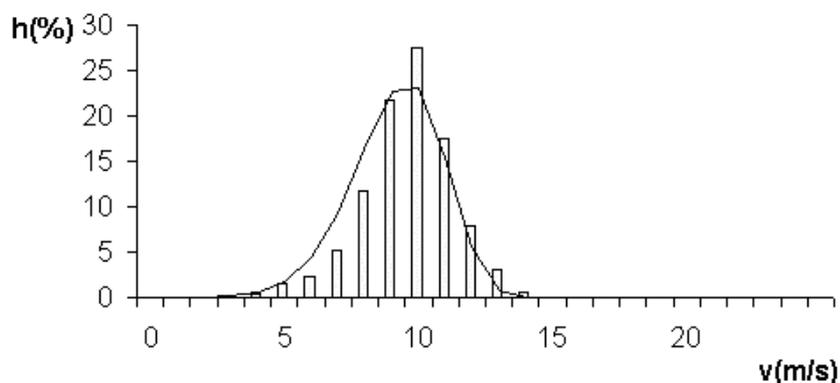
**Gráficos para um ponto de medição****Distribuição de Weibull e histograma**

Figura 2.5 - Histograma de velocidade e distribuição de Weibull de Dados Brutos para um ponto de medição

O segundo gráfico apresentado é a curva de potência do gerador eólico. Os valores de potência estão disponíveis em kW. A figura 2.6 mostra a curva de potência de um gerador eólico da empresa Fortis, com potência nominal de 30 kW.

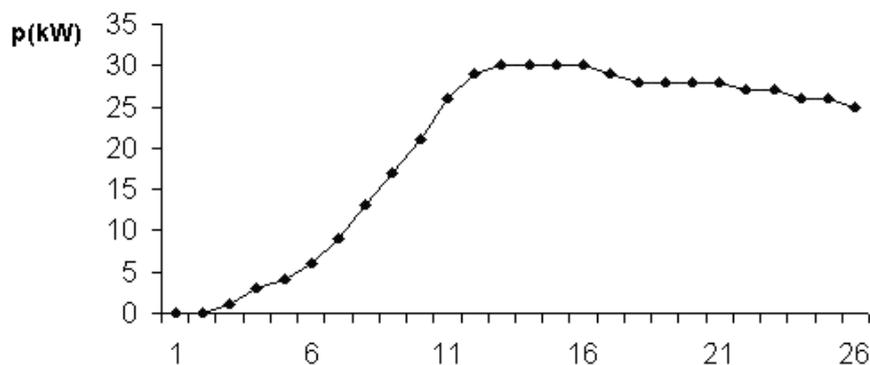
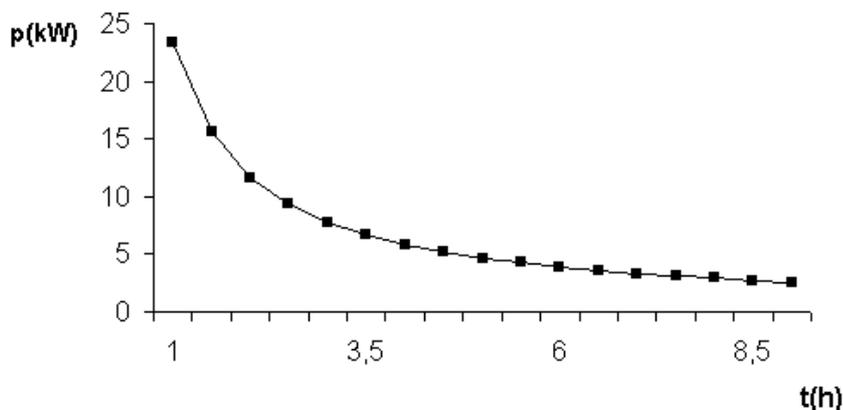
**Curva de potência do gerador**

Figura 2.6 - Curva de potência de gerador eólico

Por fim, a energia gerada pelo gerador é apresentada na forma de um gráfico de potência versus tempo. A figura 2.7 mostra a curva de duração de carga do gerador da figura 2.6. Na figura, cada abscissa de tempo corresponde à potência que o gerador pode alimentar de carga.

Curva de duração de carga



[Retornar](#)

Figura 2.7 – Curva de duração de carga

### 2.4 Dados Brutos: Dois Pontos de Medição

Esta seção corresponde aos mesmos campos já citados no item **Um ponto de Medição**. A diferença principal corresponde ao fato que nesta seção o usuário deve entrar com dados de medição de duas alturas. A figura 2.8 apresenta as duas primeiras divisões desta seção.

#### Projeto de Energia Eólica

##### Dados brutos com dois pontos de medição

Valores fornecido pelo prog  
 Valores fornecido pelo usu

Dados do local		Valor	
Altura de medição inferior	m	10	Abrir
Altura de medição superior	m	30	
Rugosidade	m	0,0457	
Velocidade média	m/s	8,44	<i>Medição In</i>
Desvio padrão		1,55	
Grau de turbulência		0,18	Abrir
Fator de forma		6,29	
Fator de escala	m/s	9,07	
<b>Características do sistema</b>		<b>Valor</b>	
Fabricante/Modelo		Fortis/Alize	Abrir
Altura do cubo	m	18	
Potência	kW	10	<i>Dados de m</i>

Figura 2.8 - Parte superior da tela de Dados Brutos para dois pontos de medição

A diferença está no fato que além do usuário entrar com duas alturas de medição, a rugosidade passa a ser calculada pelo próprio programa. O processo de cálculo é realizado para cada par de medidas de velocidade de vento realizadas em alturas distintas. Após este cálculo, obtém-se o valor médio de todas as rugosidades encontradas para definição da rugosidade média do local. Existem dois botões associados às medições de campo que devem

ser inseridos por arquivo. O botão superior do programa carrega os dados de medição inferior da torre, enquanto o botão inferior do programa carrega os dados de medição superior da torre.

Os demais campos desta opção e divisões existentes juntamente com seus gráficos comportam-se de maneira similar a existente em dados de **Um Ponto de Medição**.

## 2.5 Dados Processados

A segunda opção de análise de dados é a seleção de **Dados Processados**. Nesta opção, os dados a serem carregados por arquivo restringem-se à curva de potência, visto que os valores de dados de vento devem entrar na forma de valores médios já conhecidos. O usuário entra com o valor da velocidade média, da altura de realização da medição do vento, da rugosidade do solo e, por último, do fator de forma. A figura 2.9 mostra a parte superior desta página.

**Projeto de Energia Eólica**  
**Dados processados**

Valores fornecido pelo programa

Valores fornecido pelo usuário

Dados do local		Valor
Velocidade média	m/s	8
Altura de medição do vento	m	10
Rugosidade	m	0,001
Fator de forma		4
Fator de escala	m/s	9,39
Velocidade à altura do cubo	m/s	8,51

Características do sistema		Valor
Fabricante/Modelo		Fortis/Alize
Altura do cubo	m	18
Potência	kW	10,00

*Dados de máq.*

Figura 2.9 - Dados de entrada quando submetidos na forma processados

A análise dos dados a partir do fornecimento de valores processados apresenta as seguintes seções disponíveis: **Dados do local**, **Características do Sistema** e **Dados de Produção da turbina**.

### *Dados do Local*

Em dados do local, cuja janela é mostrada na figura 2.9, o usuário deve entrar com quatro campos. Os dois últimos valores são calculados pelo programa. Os dados medidos pelo usuário são:

- a)-Velocidade média – este valor representa o valor médio de velocidade do vento medida em uma dada posição.
- b)-Altura de medição do vento – este valor indica a altura na qual a velocidade média do vento foi medida.
- c)-Rugosidade – Este valor é necessário a fim de encontrar o valor de velocidade do vento na altura do cubo, caso esta seja diferente da altura de medição.
- d)-Fator de forma - com este valor e do fator de escala, a distribuição de Weibull pode ser construída. Como citado anteriormente, o valor desta célula indica a constância dos ventos.

Os valores calculados pelo programa são:

e)-Fator de escala – Junto com o fator de forma, este parâmetro serve para o cálculo da distribuição de Weibull. O valor é calculado para a velocidade na altura do cubo.

f)-Velocidade à altura do cubo - esta velocidade é obtida com a altura do gerador escolhido na seção **Características do Sistema**. A equação utiliza o coeficiente de rugosidade e a altura de referência inseridos pelo usuário.

### *Características do Sistema*

Os valores desta seção dizem respeito aos dados da máquina eólica. Compreendem o nome do fabricante, o modelo do gerador e a altura do cubo junto com a potência do mesmo como mostrado na figura 2.9. Os valores são armazenados quando os dados da curva de potência são carregados através da seleção do botão **Abrir**.

### *Dados de Produção da Turbina*

Nesta página, os dados da curva de potência são utilizados para o cálculo da energia disponível em cada velocidade. No fim da página pode-se encontrar o valor da energia total disponível. A forma de cálculo utilizada é a mesma que a praticada para dados brutos. A figura 2.10 apresenta a área de **Dados de Produção da Turbina**.

Dados de Produção da turbina			Valor
Velocidade do vento (m/s)	Curva de potência (kW)	Curva de energia (kWh)	
0	0	0,00	
1	0	0,00	
2	0	0,00	
3	0	0,00	
4	0,5	1,58	
5	1	5,90	

Figura 2.10 - Dados de curva de potência do gerador em Dados Processados

## **2.6 Gráficos de Dados Processados**

Os gráficos referentes aos dados processados são o histograma de velocidade e a curva de Weibull. Assim como em dados brutos, eles representam respectivamente a frequência relativa de velocidade e a distribuição de probabilidade de Weibull. A figura 2.11 mostra o gráfico relativo a estes cálculos.

Os demais gráficos são a curva de duração de carga e a curva de potência do gerador, similares às já apresentadas.

## Gráficos de dados processados

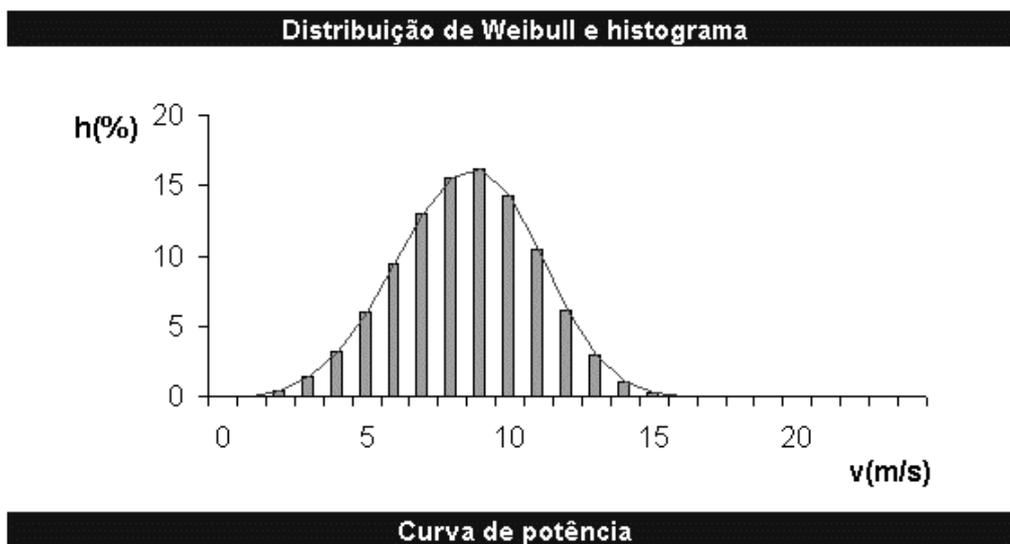


Figura 2.11 - Histograma de velocidade e distribuição de Weibull de dados processados

### 2.7 Análise da Produção de Energia

O cálculo de produção de energia baseia-se no produto da frequência relativa dos ventos pela curva de potência do gerador conforme a equação 1.

$$E = \sum h_i P_i T_i \quad (1)$$

onde T representa o período total considerado,  $P_i$  a potência dada pela curva de potência e  $h_i$  a frequência relativa de cada classe de velocidade do vento  $v_i$ , sendo esta frequência fornecida pela equação 2.

$$h_i = t_i/T \quad (2)$$

onde  $t_i$  é o período no qual foi registrada a classe de velocidade do vento  $v_i$ . A compreensão do fenômeno pode ser melhor entendida pela visualização da figura 2.12 apresentada por Gasch.

A utilização dos valores de medidas eólicas realizadas pela CHESF na Praia Mansa, Mucuripe, Fortaleza, entre os meses de junho e novembro de 1993, quando avaliadas pelo programa desenvolvido para dois pontos de medição, na altura do cubo do gerador produzido pela empresa Fortis do modelo Boreas, apresentaram os valores indicados a seguir:

- a) Rugosidade – 0,0457 m
- b) Velocidade média – 9,16 m/s
- c) Desvio Padrão – 1,68
- d) Grau de turbulência – 0,18
- e) Fator de forma – 6,29
- f) Fator de escala – 9,85 m/s

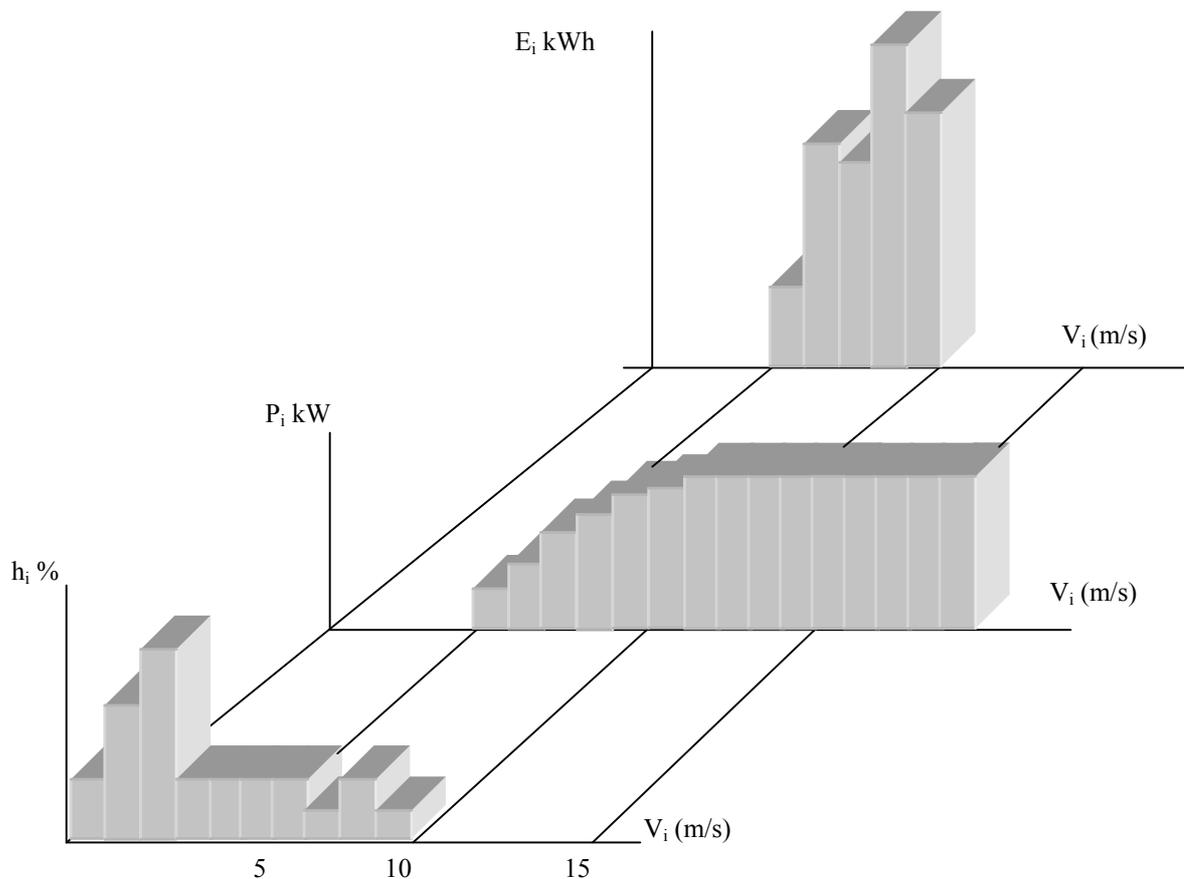


Figura 2.12 - Desenvolvimento do cálculo de produção de energia para um período de tempo  $T$  a partir do histograma de vento  $h_i$  e uma curva de potência  $P_i$  [Gasch]

A figura 2.12 mostra que nos pontos com interseção da distribuição de frequência dos ventos com a curva de potência da máquina ocorre produção de energia. Desta forma, para a produção de energia, o histograma ideal é aquele em que as velocidades do vento se localizam em torno do valor médio, e intercepta a maior parte possível da curva de potência do gerador.

### 3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a solidificação da tecnologia de geração de energia elétrica a partir dos ventos, a tendência é que o mercado venha a crescer cada vez mais a nível mundial. Atualmente as máquinas eólicas são capazes de apresentar potências na casa dos megawatts em um único gerador.

Dentre as tendências mundiais para uso da energia eólica destaca-se o uso de geradores eólicos de pequeno porte, os quais podem representar uma contribuição para a universalização do acesso à energia elétrica em países como o Brasil e em especial para a região Nordeste. Para a região Nordeste, o uso da geração descentralizada torna-se imperativo, visto os recursos hídricos explorados ao longo do rio São Francisco estarem esgotados. A geração eólica descentralizada pode apresentar na região uma significativa contribuição não só para fins de ordem energética, como também para reduzir problemas sociais relacionados com a falta de infraestrutura para bombeamento de água.



O desenvolvimento do programa para avaliação do prognóstico de geração de energia elétrica a partir de curvas de potência de pequenos geradores eólicos visa auxiliar na divulgação dos geradores eólicos de pequeno porte. O uso deste prognóstico constitui importante instrumento quando da fase de planejamento, determinando a viabilidade econômica do projeto.

A ferramenta computacional desenvolvida pretende também preencher a lacuna deixada por programas existentes como o RETScreen, que trabalha apenas com uma visão de geração de energia elétrica de grande porte; conseqüentemente não cobrindo a produção a nível de pequenos geradores eólicos. Outra questão limitante no RETScreen é a inserção de dados no programa ser feita apenas com o uso de valores médios de velocidade de vento. O programa apresentado nesta dissertação pretende cobrir este espaço, possibilitando que os valores possam ser introduzidos a partir da forma bruta, sem nenhum tipo de tratamento.

O programa desenvolvido tem também a pretensão de atuação no campo didático. Desta forma, pode contribuir para a formação de engenheiros, notadamente eletricitistas, e servir de apoio para os cursos de graduação que ofereçam disciplinas abordando a geração eólica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GASCH, R. **Windkraftanlagen: Grundlagen und Entwurf**. B.G. Teubner, 1996.

### **A COMPUTER PROGRAM TO CALCULATE THE ELECTRICITY GENERATION BY WIND POWER PLANTS**

**Abstract:** *This work introduces a computer program to calculate the electricity generation by small wind power plants. As a positive aspect, the program allows the user to use wind data without a statistical treatment. These data represent the basis to calculate the local wind statistics. The possibility to work with data without a statistical treatment gives more value to the program, due to the fact that in others programs available worldwide the user must use average values. However, as a second option of the program, the possibility to insert processed data is allowed for the case no other kind of data is available. As an additional advantage, the program has power curves of small wind power plants attached to its data base. The program uses Excel 2000®, trade mark by Microsoft, as computer platform due to its friendly interface. The data used in this work were obtained by measurements carried out by CHESF in Praia Mansa, Mucuripe, Fortaleza-CE, from June to November 1993, in heights of 10 and 30 meters.*

**Key-words:** *Wind Energy, small wind power plants, Data without a statistical treatment*