



OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

Patrícia de Castro Silva

Vanessa Gonçalves Guedes

Maria Regina Pereira de Araújo

Programa de Engenharia Mecânica – COPPE/UFRJ

Cx. P. 68503 – 21945-970 – Rio de Janeiro – RJ

Miguel Hiroo Hirata

Departamento de Mecânica – IEM/EFEI

Cx. P. 50 – 37500-000– Itajubá – MG

***Resumo.** O conhecimento do regime dos ventos é fundamental para que se faça um projeto racional de aproveitamento da energia eólica. Para a correta determinação do regime dos ventos é necessário analisar dados coletados durante um longo período de tempo, em geral alguns anos. Trabalhar com um grande número de dados de vento torna-se impraticável; como alternativa utiliza-se modelos probabilísticos para modelar as curvas de frequência de velocidade. A expressão conhecida como distribuição de Weibull é uma distribuição biparamétrica e tem sido muito utilizada na análise do aproveitamento da energia eólica. Entretanto, a experiência tem mostrado que, para algumas localidades, a distribuição de Weibull não tem se ajustado bem aos histogramas. Desta forma, surge a necessidade de um método alternativo para o cálculo dos parâmetros de Weibull c e k , que permita uma maior aproximação com a distribuição real; com esta finalidade, utilizam-se Algoritmos Genéticos, que são métodos computacionais de busca baseados nos mecanismos de evolução natural e na genética. Com o procedimento adotado, obtém-se os parâmetros da distribuição de Weibull que fornecem um ajuste adequado para as curvas de distribuição de velocidade de vento.*

***Palavras-chave:** Energia eólica, Regime dos ventos, Distribuição de Weibull, Algoritmos genéticos*

1. INTRODUÇÃO

O aproveitamento da energia eólica apresenta alguns aspectos que a torna extremamente atraente como uma fonte alternativa de energia. A possibilidade de aplicação em amplas faixas de potência (desde sistemas isolados de poucos kW até parques eólicos com mais de uma centena de MW) e o fato de já existir uma tecnologia suficientemente desenvolvida, que viabiliza a sua utilização imediata (o que nem sempre acontece com outras fontes alternativas, cuja tecnologia exige, ainda, desenvolvimentos adicionais para ser competitiva) faz com que os ventos sejam uma fonte de energia bastante importante. Somam-se a estas vantagens, o fato

de ser possível o uso desta energia em regiões rurais, isoladas, onde os meios convencionais de fornecimento energético são de alto custo, baixa confiabilidade e muitas vezes inexistentes. A energia eólica é, além de tudo, uma das formas de energia que menos danos causa ao meio ambiente.

Verifica-se um número cada vez maior de países que tem implantado programas para o aproveitamento da energia dos ventos. Para os próximos três anos, ou seja, 2002, é esperada (Dewi, 1998) a instalação de *12500 MW* em turbinas eólicas em todo o mundo. O Brasil apresenta um potencial eólico nada desprezível, principalmente nas regiões mais carentes de outras fontes energéticas, como em algumas localidades situadas no litoral das Regiões Norte e Nordeste do Brasil que apresentam velocidades de vento médias anuais superiores a *7m/s* (medidas a 10 metros de altura); por esta razão verifica-se uma mobilização importante para tornar viável a utilização desta fonte de energia. Os recentes encontros técnicos sobre energia eólica e as primeiras fazendas eólicas que começam a ser implantadas, principalmente na região nordeste do Brasil, mostram o grande interesse do país na inclusão desta nova fonte de energia em sua matriz energética.

Finalmente, ao se constatar que a potência disponível nos ventos varia com o cubo da velocidade, não é difícil concluir sobre a necessidade de uma precisa especificação do regime dos ventos. Este trabalho tem como objetivo principal a proposição de uma nova metodologia para o cálculo dos parâmetros que definem a distribuição de Weibull; esta é utilizada para a especificação do potencial eólico. A metodologia proposta produz resultados muito precisos, bem superiores aos obtidos com metodologias anteriormente utilizadas.

2. DESCRIÇÃO ESTATÍSTICA DO REGIME DOS VENTOS

Para se realizar análises da viabilidade técnico-econômica da implantação de sistemas eólicos, é necessário conhecer as características do vento local. Para um correto dimensionamento do sistema eólico (rotor, sistema de estocagem, etc.) e para a escolha do local mais apropriado para a instalação dos mesmos, é importante o preciso conhecimento da velocidade média do vento, além de outras grandezas que definem a distribuição desta velocidade no tempo e no espaço.

A determinação do potencial eólico só é confiável se feita a partir de dados coletados por períodos relativamente longos, pelo menos um ano. Existe uma grande variação do regime dos ventos em consequência da mudança das estações do ano e uma variação menos significativa de ano para ano.

A determinação do potencial eólico em uma região pode ser feita com auxílio de modelos numéricos que permitem a extrapolação de resultados numa área relativamente grande. O mais utilizado atualmente é o WasP, adotado para a elaboração do Atlas Eólico Europeu (Troen & Petersen, 1989). Esse modelo usa dados, preferencialmente de vários anos com registros a cada 10 minutos, descritos estatisticamente em diversos setores de acordo com a direção do vento. Verifica-se, imediatamente, ser impraticável trabalhar com todos os registros disponíveis e por isso, é necessário a utilização de modelos probabilísticos que reproduzem estatisticamente os dados analisados de uma maneira compacta. Estes modelos probabilísticos utilizam a distribuição de probabilidade de Weibull (ou, às vezes, Rayleigh).

2.1 Distribuição de Rayleigh e de Weibull

A prática atualmente utilizada, para a coleta de dados de vento, inclui (entre outras) a medida da velocidade do vento de maneira contínua e a acumulação do valor médio correspondente a intervalos de 10 minutos. De posse destes valores pode-se calcular grandezas estatísticas como a velocidade média e o desvio padrão. Pode-se traçar, também, o

diagrama de freqüências (absoluta ou relativa) ou histograma e outros dele derivados como por exemplo o diagrama de freqüência acumulada e de duração, assim como pode-se calcular a energia e a potência associadas.

Como já mencionado, estes dados de vento podem ser aproximadamente representados, de uma maneira muito compacta, por funções analíticas. Assim sendo, tem-se o diagrama de freqüência acumulada representado pela função $F(V)$ (que fornece a probabilidade da velocidade assumir valores menores que V), o diagrama de duração por $[1 - F(V)]$ (com interpretação óbvia) e o histograma por $f(V)$, onde

$$\frac{dF(V)}{dV} = f(V) = \text{densidade da distribuição.} \quad (1)$$

O produto $[f(V) \times dV]$ fornece a probabilidade do vento soprar com velocidade V . De posse da expressão da densidade, a velocidade média e o desvio padrão são obtidos como o primeiro momento e o segundo momento centrado respectivamente:

$$\bar{V} = \int_0^{\infty} V f(V) dV \quad \text{e} \quad \sigma^2 = \int_0^{\infty} (V - \bar{V})^2 \cdot f(V) dV. \quad (2)$$

De maneira análoga, a energia e a potência podem ser calculadas como o segundo e terceiro momentos, respectivamente.

Para fins de utilização prática, a função densidade de probabilidade deve satisfazer a dois requisitos: o seu gráfico deve representar de maneira razoável o histograma e ser de fácil associação ao regime dos ventos que se deseja simular. Segundo Lysen(1982), foram testados vários modelos probabilísticos que poderiam ser usados para, aproximadamente, modelar as curvas de freqüência de velocidade do vento. Foi possível associar uma distribuição de probabilidade à curva de freqüência de velocidades cujas propriedades podem ser deduzidas matematicamente. As distribuições de Weibull e de Rayleigh são, geralmente, as mais aceitas.

A função densidade de probabilidade de Rayleigh representa bem os regimes de vento de velocidades moderadas. A conveniência de utilizar a distribuição de Rayleigh é devida a sua simplicidade, uma vez que ela fica definida apenas pela velocidade média. Entretanto, esta simplicidade é a responsável por suas limitações em não representar, com a precisão necessária, muitas situações práticas de interesse, especialmente quando as velocidades do vento são altas.

Como alternativa surge a distribuição de Weibull que é biparamétrica exigindo, para sua definição (parâmetros c e k), o conhecimento da velocidade média e do desvio padrão. A função densidade de probabilidade de Weibull é dada por:

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{V}{c} \right)^k \right] \quad \begin{cases} k > 0 \\ c > 1 \end{cases} \quad (3)$$

onde c = fator de escala e k = fator de forma.

2.2 Determinação dos Parâmetros de Weibull

A distribuição de Weibull é um caso especial da Distribuição Gama e tem sido muito utilizada em aplicações visando o aproveitamento da energia eólica (Troen & Petersen, 1989 e Rohatgi & Nelson, 1994).

A função densidade de probabilidade de Weibull é dada pela equação (3) onde c e k são os parâmetros da distribuição; o parâmetro k , adimensional, indica a uniformidade da distribuição dos valores da velocidade e o parâmetro c possui dimensão de velocidade e a qualifica.

Vários métodos podem ser usados para estimar os parâmetros de Weibull, c e k , dependendo dos dados de vento disponíveis e do rigor requerido na análise, Justus(1978), Lysen(1982), Rohatgi(1987), Troen & Petersen(1989), Araújo(1997).

Alguns desses métodos são: Análise por Mínimos Quadrados para a Distribuição Observada; Método de Velocidades de Vento Média e Quartis; Método da Correlação de k com Velocidade Média.

Além dos métodos descritos acima, são também utilizados, para a estimativa dos parâmetros de Weibull, alguns métodos gráficos citados em Hennessey(1977) e Rohatgi(1987).

Em Araújo(1989) foi feito um estudo para modelar os dados de velocidade de vento da região do Vale do Rio São Francisco. Nesse estudo, concluiu-se que a distribuição que melhor se adaptou aos dados reais de velocidade de vento foi a distribuição de Weibull quando comparada com a distribuição de Rayleigh. Os parâmetros da distribuição de Weibull foram calculados utilizando alguns dos métodos citados acima e o Método da Velocidade Média e Desvio Padrão mostrou ser o mais preciso. Segundo este método tem-se:

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{V}}\right)^{-1.086} \quad \text{e} \quad c = \bar{V} / \Gamma(1 + (1/k)) \quad . \quad (4)$$

3. ENERGIA GERADA POR UM SISTEMA EÓLICO

A produção anual de energia de um sistema eólico é o fator tanto técnico quanto econômico mais importante em um projeto de fazenda eólica. Incertezas na determinação da velocidade do vento anual e da curva de potência, contribuem para a incerteza total na predição da energia anual gerada e leva a um risco técnico e financeiro elevado.

3.1 Cálculo da Energia Gerada

Para o cálculo da energia gerada por um sistema eólico, é necessário conhecer os elementos que definem o regime local dos ventos: o histograma de velocidades (obtido a partir de medições locais ou estimado a partir de curvas de distribuições de frequência) e a curva de potência da turbina eólica. As grandezas definidas abaixo são utilizadas no cálculo da energia gerada.

A potência disponível transportada pelo vento é dada por

$$P_d = \frac{1}{2} \rho V^3 A \quad (5)$$

onde ρ é a massa específica do ar (em geral, utiliza-se o valor médio $1,225 \text{ kg/m}^3$); V é a velocidade do vento; A é a área varrida pelas pás do rotor.

A potência gerada pelo sistema eólico é dada por

$$P_g = \eta_t P_d \quad (6)$$

onde η_t é o rendimento total do sistema.

A conversão e aproveitamento da energia não são feitos uniformemente ao longo de toda a faixa de velocidade do vento. Ventos de baixa velocidade não transportam energia suficiente para acionar os sistema eólicos; a velocidade a partir da qual o sistema inicia sua operação é

denominada de **velocidade de entrada** (V_e). Com o aumento da velocidade do vento, a potência (energia gerada) aumenta gradativamente até atingir a potência nominal do sistema, isto ocorre na **velocidade nominal**. A partir da velocidade nominal, em muitos sistemas eólicos, a potência permanece constante até a **velocidade de corte** (V_c), na qual o sistema eólico deve sair de operação para evitar danos estruturais.

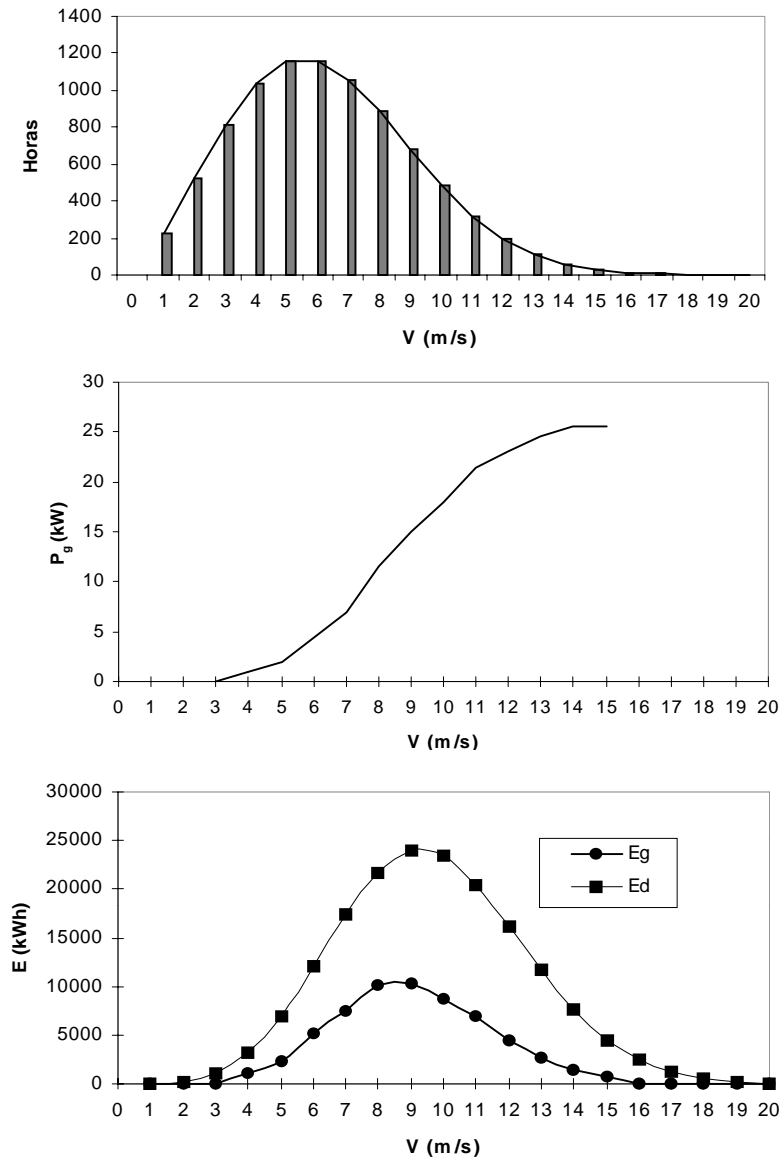


Figura 1 – Cálculo da Energia Gerada.

Os gráficos apresentados na Fig. 1 ilustram o cálculo da energia gerada por um sistema eólico:

- Distribuição da velocidade - os dados de velocidade de vento são representados pelo histograma de velocidades estimado a partir de curvas de distribuição de frequência; neste caso, o regime dos ventos foi descrito utilizando-se a distribuição de Weibull, para um sítio padrão ($V_m=6,26m/s$; $c=7,07m/s$ e $k=2,29$).
- Curva de potência - a segunda curva $P_g \times V$ é a curva de potência de uma turbina eólica e é um dado do fabricante.
- Distribuição da energia - no terceiro gráfico podem ser observadas duas curvas: $E_d \times V$ que descreve como a energia cinética disponível no vento distribui-se com a velocidade

do vento, e $E_g \times V$ que descreve como a energia gerada distribui-se com a velocidade do vento.

$$E_d = \left(\frac{1}{2} \rho V^3 A\right)(H) \quad \text{e} \quad E_g = P_g.H \quad (7)$$

onde H é o número total de horas. Como deseja-se estimar a produção de energia anual, $H=8760$ horas.

A partir do cálculo da energia gerada pode-se observar que, para fins de geração eólica, é importante o ajuste da distribuição de velocidades do vento principalmente no trecho compreendido entre a velocidade de entrada do sistema eólico (V_e) e a velocidade de corte (V_c).

3.2. Cálculo dos Parâmetros Otimizados de Weibull

O objetivo de utilizar-se Algoritmos Genéticos (AGs) é encontrar a melhor combinação dos fatores que proporcione o melhor desempenho possível para um sistema em estudo. No caso específico deste trabalho, AGs são utilizados para otimizar os parâmetros de Weibull, em busca de um melhor ajuste para as curvas de distribuição de frequência da velocidade do vento. Outra ferramenta poderia ser utilizada ao invés dos AGs, mas a disponibilidade imediata dos AGs e a experiência acumulada com a utilização destes algoritmos na busca de ótimos globais (Guedes,1997) foram decisivas na escolha desta ferramenta.

Em termos técnicos, o conjunto de todas as combinações possíveis para os fatores constitui o espaço de busca. Pelo fato de existir uma dualidade entre os conceitos de busca e otimização, todo problema de busca pode ser considerado um problema de otimização e vice-versa.

Algoritmos Genéticos são métodos computacionais de busca baseados nos mecanismos de evolução natural e na genética. Em AGs, uma população de possíveis soluções para o problema em questão evolui de acordo com operadores probabilísticos concebidos a partir de metáforas biológicas, de modo que há uma tendência de que, na média, os indivíduos representem soluções cada vez melhores à medida que o processo evolutivo continua (Tanomaru,1995).

O primeiro passo para aplicação de AGs a um problema qualquer é representar cada possível solução x no espaço de busca como uma sequência de símbolos s gerados a partir de um dado alfabeto finito A . Neste trabalho, utilizou-se a representação mais simples, constituída pelo alfabeto binário $A = \{0,1\}$; entretanto, no caso geral, tanto o método de representação quanto o alfabeto genético dependerão de cada problema.

Usando algumas metáforas adotadas pelos praticantes de AGs, pode-se dizer que cada sequência s corresponde a um cromossomo e cada elemento de s é equivalente a um gene. Assume-se ainda que cada indivíduo seja constituído por um único cromossomo.

Após definir-se a representação cromossômica para o problema em questão, gerou-se aleatoriamente um conjunto de possíveis soluções, chamadas de *soluções candidatas*. A este conjunto de soluções, codificadas de acordo com a representação selecionada (neste trabalho, representação binária) corresponderá uma população de indivíduos. É importante que a população inicial cubra a maior área possível do espaço de busca. AGs são algoritmos iterativos e a cada iteração a população é modificada, segundo os processos de seleção, recombinação e mutação. Cada iteração de um AG é denominada geração, embora nem todos os indivíduos de uma população sejam necessariamente “filhos” de indivíduos da população na iteração anterior.

Função de Adequabilidade. AGs necessitam da informação do valor de uma função de adequabilidade (ou função objetivo) para cada membro da população, que deve ser um valor não-negativo. A função objetivo FO , associa a cada indivíduo uma medida de sua adaptabilidade ao ambiente. Neste trabalho, adotou-se que, quanto menor o valor da função objetivo, maiores são as chances do indivíduo sobreviver no ambiente e reproduzir-se, passando parte do seu material genético às gerações posteriores.

A função objetivo utilizada neste trabalho é dada por:

$$FO = \alpha \cdot \frac{\sum_{V_e}^{V_c} \Delta f^2}{V_e} + \beta \cdot \frac{\sum_{V_e}^{V_{lim}} \Delta f^2}{V_{lim} - V_e} + \chi \cdot \frac{\sum_{V_{lim}}^{V_u} \Delta f^2}{V_u - V_{lim}} \quad (8)$$

onde $\Delta f = (f_{n(calc)} - f_{n(real)})$ e α , β e χ podem ser interpretados como pesos escolhidos de modo a obter o resultado mais adequado; V_{lim} é aqui definido como o produto da velocidade mais freqüente (V^+) pelo fator γ , que assumiu o valor de 1,5 ($V_{lim} = V^+ \times 1.5$) e V_u é a velocidade correspondente a última classe de velocidade do histograma.

A escolha da função objetivo baseou-se nos seguintes pontos:

1. A escolha correta dos parâmetros de Weibull deve privilegiar o ajuste nas velocidades mais importantes para a geração de energia; esta faixa pode ser definida pela velocidade de entrada e por um valor da velocidade igual a velocidade de corte. Se por um lado a consulta a catálogos de fabricantes permite aproximadamente assumir a velocidade de entrada como $V_e = 3 \text{ m/s}$, a mesma unanimidade não pode ser obtida com a velocidade de corte.
2. O limite superior da faixa pode ser, por outro lado, definida com a utilização do desvio padrão (que define a forma do histograma). Assim sendo, este limite poderia ser especificado em função da velocidade média e do desvio padrão. Por simplicidade, no entanto, optou-se por definir o limite superior desta faixa como sendo igual a uma vez e meia a velocidade mais freqüente (veja acima).
3. Com a finalidade de privilegiar o ajuste na faixa de maior interesse (entre V_e e V_{lim}), o peso a ela associada deve assumir o menor valor; no caso assumiu-se que $\beta=1$.
4. O ajuste na faixa de baixas velocidades não é importante. Assumiu-se que $\alpha=5$; este valor elevado reduz as possibilidades de sobrevivência do indivíduo.
5. O ajuste na faixa de altas velocidades, embora mais importante do que aquele das baixas velocidades, pode ser feito assumindo $\chi=4$. Em geral, os valores extremos da velocidade desta faixa são maiores do que a velocidade de corte e são também pouco freqüentes.

Seleção, Recombinação e Mutação. O mecanismo de seleção em AGs emula os processos de reprodução assexuada e seleção natural.

O mecanismo de recombinação é um processo sexuado (envolve mais de um indivíduo), que emula o fenômeno de *crossover*, isto é, a troca de fragmentos entre pares de cromossomos. Em sua forma mais simples, trata-se de um processo aleatório que ocorre com probabilidade fixa.

O processo de mutação em AGs é equivalente à busca aleatória. Basicamente, consiste em selecionar uma posição num cromossomo e mudar aleatoriamente o valor do gene correspondente por um outro valor possível. O processo é geralmente controlado por um parâmetro fixo que indica a probabilidade de um gene sofrer mutação.

3.3 Resultados Obtidos

Partindo-se de uma população de $N=20$ indivíduos gerados aleatoriamente, adotando-se probabilidades de seleção, recombinação e mutação fixadas em $0,2$, $0,1$ e $0,1$ respectivamente e considerando-se como critério de parada o número máximo de 10 gerações, obteve-se os seguintes resultados:

Tabela 1. Comparação dos resultados obtidos utilizando o método tradicional e o método AG.

Estação	Valor Real	Valores Estimados (Método Tradicional)				Valores Estimados (Método AG)			
	E_g (kWh)	c_1 (m/s)	k_1	E_{g1} (kWh)	Erro ₁ (%)	c_2 (m/s)	k_2	E_{g2} (kWh)	Erro ₂ (%)
Ajuruteua, verão, 97	1595,39	8,18	3,97	1384,33	13,23	8,69	4,82	1629,10	2,11
Ajuruteua, outono, 97	1319,73	7,54	3,67	1132,06	14,22	7,97	3,81	1299,14	1,56
Ajuruteua, inverno, 97	2189,45	9,37	6,82	2002,82	8,52	9,90	6,87	2198,66	0,42
Ajuruteua, primavera, 97	1996,14	8,85	6,87	1789,26	10,36	9,25	6,73	1948,96	2,36
Ajuruteua, anual, 97	7044,60	8,48	4,38	6172,27	12,38	9,17	5,27	7461,03	5,91
Guimarães, verão, 97	540,36	5,46	3,24	397,50	26,44	6,08	4,19	564,44	4,46
Guimarães, outono, 97	395,34	4,84	2,59	285,31	27,83	5,37	3,04	385,48	2,49
Guimarães, inverno, 97	780,34	6,19	4,24	603,31	22,69	6,72	4,44	805,00	3,16
Guimarães, primavera, 97	653,31	5,86	3,82	497,31	23,88	6,39	4,06	679,30	3,98
Guimarães, anual, 97	2426,32	5,62	3,23	1820,32	24,98	6,11	3,73	2383,61	1,76
Joanes, outono, 94	686,95	5,84	2,77	551,29	19,75	6,27	2,88	682,94	0,58
Joanes, inverno, 94	1350,12	7,61	3,31	1151,40	14,72	7,92	3,48	1269,21	5,99
Joanes, primavera, 94	1804,41	8,82	3,89	1612,15	10,66	9,12	4,20	1741,52	3,49
Joanes, anual, 94	5497,69	7,67	3,04	4729,94	13,97	8,42	3,49	5862,54	6,64
Soure, verão, 97	935,41	6,48	3,00	750,50	19,77	6,98	3,41	918,06	1,85
Soure, outono, 97	696,07	5,75	2,57	542,15	22,11	6,31	2,79	705,30	1,33
Soure, inverno, 97	1608,40	8,05	5,39	1384,54	13,92	8,30	6,28	1526,23	5,11
Soure, primavera, 97	1631,90	8,11	4,99	1398,55	14,30	8,56	5,91	1627,09	0,29
Soure, anual, 97	5084,66	7,27	3,36	4160,13	18,18	7,91	3,86	5183,57	1,95
Água Fria, verão, 97	1096,63	6,99	3,25	922,49	15,88	7,41	3,48	1077,31	1,76
Água Fria, outono, 97	746,16	5,98	2,85	590,55	20,85	6,45	3,18	731,27	2,00
Água Fria*, primavera, 97	1112,54	6,97	3,59	911,13	18,10	7,47	3,86	1105,87	0,60

*Pelo fato de terem sido encontrados erros nos dados referentes aos meses que compõem a estação “inverno”, optou-se por não incluí-los neste trabalho. Por este motivo, as análises sazonal (referente ao inverno) e anual não foram realizadas.

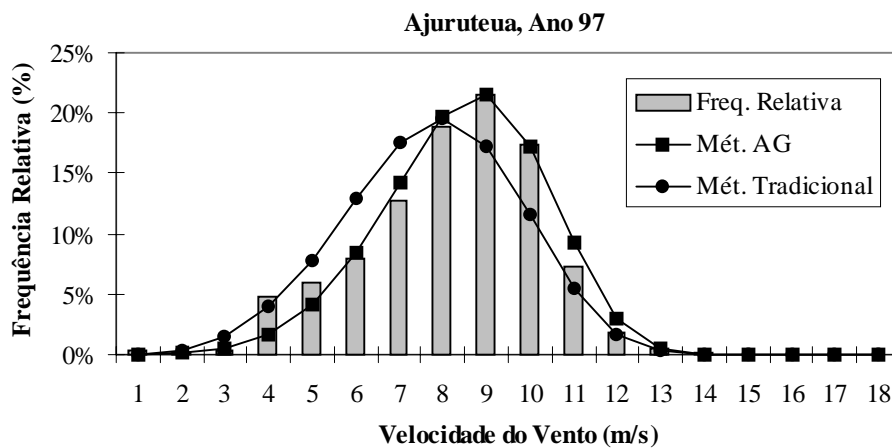


Figura 2 – Regime local dos ventos : $\bar{V} = 7,73 \text{ m/s}$; $\sigma = 1,98 \text{ m/s}$; $V^+ = 9,00 \text{ m/s}$;
 $c_1 = 8,48 \text{ m/s}$; $k_1 = 4,38$; $c_2 = 9,17 \text{ m/s}$; $k_2 = 5,27$.

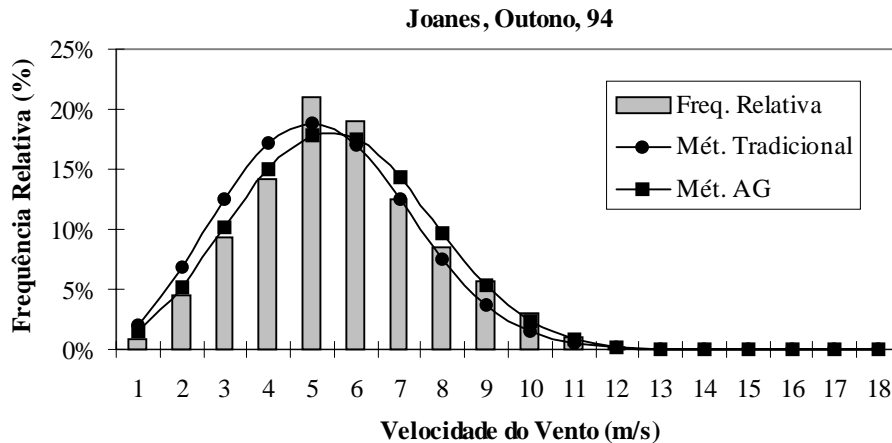


Figura 3 – Regime local dos ventos : $\bar{V} = 5,20 \text{ m/s}$; $\sigma = 2,03 \text{ m/s}$; $V^+ = 5,00 \text{ m/s}$;
 $c_1 = 5,84 \text{ m/s}$; $k_1 = 2,77$; $c_2 = 6,27 \text{ m/s}$; $k_2 = 2,88$.

Neste trabalho, estudou-se as seguintes localidades: Água Fria no Estado de Roraima, Guimarães no Estado do Maranhão, Soure, Joanes e Ajuruteua no Estado do Pará. Os dados utilizados foram coletados à *30 metros* de altura e, de *10 em 10 minutos*, registram-se, entre outras grandezas, a velocidade e direção média. Para o cálculo da energia gerada utilizou-se a curva de potência do aerogerador BWC 1500, com potência nominal de *1,5 kW* e *3,5 metros* de diâmetro, de fabricação da *Bergey WindPower Company*.

Os resultados obtidos com o uso de Algoritmos Genéticos mostram que os novos valores dos parâmetros *c* e *k* fornecem uma estimativa de energia gerada mais próxima da energia real, que seria gerada por esta máquina, se esta fosse instalada nas localidades em estudo. Observou-se ainda que com estes valores de *c* e *k*, obtém-se um melhor ajuste para a curva de distribuição de frequência de Weibull, como ilustram as Figs. 2 e 3.

A análise dos resultados apresentados na Tabela 1, mostram que, enquanto o erro cometido utilizando o método tradicional varia entre *10* e *25%*, este erro se reduz para, no máximo, *6%* utilizando o método AG.

A Figura 2 retrata uma situação típica onde a velocidade média é alta; verifica-se claramente a superioridade dos resultados obtidos com a utilização da técnica proposta. Na Figura 3 pode-se observar que não há grandes diferenças na forma das curvas, entretanto, consultando a linha 11 da Tabela 1, pode-se verificar que o erro no cálculo da energia gerada é de *0,58%* enquanto que é de *19,75%* se utilizarmos o método tradicional.

Agradecimentos

Ao Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processo no. 143041/97-5, a Fundação de Amparo à Ciência do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), processo E-26/151.013/98 e a Fundação de Amparo à Ciência do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), processo no. TEC-1565/97.

REFERÊNCIAS

- Araújo, M/R.O P., 1989, Estudo Comparativo de Sistemas Eólicos Utilizando Modelos Probabilísticos de Velocidade de Vento, tese de mestrado, Programa de Engenharia Mecânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Dewi, Deutsches Windenergie-Institut, 1998, Energia Eólica, Dewi - Deutsches Windenergie-Institut, Wilhelmshaven, Alemanha.
- Hennessey, J. P., 1977, Some Aspects of Wind Power Statistics, Journal of Applied Meteorology, vol. 16, n. 2, pp.119-128.
- Justus, C.G., Hargraves, W.R., Mikhail, J. & Grader, D., 1978, Methods for Estimating Wind Speed Frequency Distributions, Journal of Applied Meteorology, vol. 17, pp350-353.
- Lysen, E. H., 1982, Introdução a Energia Eólica, Consultancy Services Wind Energy Developing Countries, Amersfoort.
- Rohatgi, J. S., Medeiros, A.L.R., Soares, A.M.C. & Noé, A.O F., 1987, Describing Wind Speed Variations by Weibull Distribution for Energy Estimation, Anais do IV Congresso Brasileiro de Energia, vol.1, pp 237-247, Rio de Janeiro.
- Rohatgi, J. S. & Nelson, V., 1994, Wind Characteristics - An Analysis for the Generation of Wind Power, ed Alternative Energy Institute, West Texas, A&M University, Canyon, TX, USA.
- Troen, I. & Petersen, E. L., 1989, European Wind Atlas, Riso National Laboratory, Denmark.
- Tanomaru, J, 1995, Motivação, Fundamentos e Aplicações de Algoritmos Genéticos, II Congresso Brasileiro de Redes Neurais, October 29 – November 1, Curitiba
- Guedes, V. G, 1997, Aplicações de Lógica Nebulosa em Mecânica dos Fluidos, tese de mestrado, Programa de Engenharia Mecânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

WEIBULL DISTRIBUTION : PARAMETERS OPTIMIZATION

Abstract. *For the specification of the wind regime, use of the Weibull distribution is generally made. The definition of this distribution requires the value of two parameters: c , the scale and k , the form factor. There are several ways of finding these values, generally using the wind speed mean value and the standard deviation. In this paper an alternative technique, which use Genetic Algorithm, is presented; this new technique produces far better results than the traditionally used ones.*

Keywords : *Wind energy, Wind regime, Weibull distribution, Genetic algorithm.*