

ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS "C" E "K" DO MODELO DE WEIBULL E DA DIREÇÃO DOS VENTOS PARA CAMPO GRANDE E DOURADOS / MS, BRASIL.

ESTIMATE OF THE PARAMETERS "C" AND "K" OF THE WEIBULL MODEL AND OF THE WIND DIRECTION TO CAMPO GRANDE AND DOURADOS/ MS, BRAZIL.

Amaury de Souza¹ e Silvio César Granja²

RESUMO

Utilizou-se o modelo de WEIBULL 2-PARÂMETROS para ter-se uma descrição quantitativa do potencial eólico das microrregiões de Campo Grande e Dourados/MS. Com as séries temporais observadas para cada região, através do método dos mínimos quadrados no ajuste da distribuição de velocidade, calcularam-se os parâmetros de escala (c) e de forma (k) do modelo. Calculou-se também, a velocidade eólica por semana, mês e ano com os respectivos parâmetros, juntamente com o erro residual (E) do modelo às séries temporais. Os parâmetros "c" e "k" permitiram calcular a densidade de potência média (P) por semana, mês e ano, obtendo-se: $c = 3,6$ m/s, $k = 2,0$, $E = 8,7\%$, $P = 40,2$ W/m² em Campo Grande; $c = 2,6$ m/s, $k = 1,1$, $E = 3,8\%$ e $P = 49,8$ w/m² em Dourados. O método dos mínimos quadrados apresentou-se altamente viável para o ajuste da distribuição de frequência de velocidade dos ventos, sendo o melhor método de ajuste para os parâmetros "c" e "k" de WEIBULL e apresentando os menores erros dentre os métodos apresentados na literatura. Os erros estão relacionados às amostragens das séries históricas com relação ao modelo de WEIBULL 2-PARÂMETROS. Para as estações, houve uma periodicidade cujo aspecto se assemelha a uma senóide na qual os mínimos encontram-se no começo do outono e máximos no final do inverno e começo da primavera; as direções predominantes foram bem definidas para ambas as estações sendo que em Campo Grande a direção manteve-se a leste com 24,5% de ocorrência, seguido de norte com 19,8% e de NE com 12,2%, e em Dourados manteve-se a NE com

¹Professor do Departamento de Física/CCET - Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - Cidade Universitária s/nº - Caixa Postal 649 - CEP 79070-900 - Campo Grande/MS. E-mail amaury@newton.dfi.ufms.br.

²Bolsista de Iniciação Científica do CNPq. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

23,5%, seguido de SE com 9,4%, observando-se, portanto, uma constância e rigidez sazonal nas direções predominantes.

Palavras-chave: vento, Weibull, potencial eólico

SUMMARY

In order to obtain a quantitative description of the aeolic potential of the "Micro-Regions" of Campo Grande and Dourados, in the State of Mato Grosso do Sul, the WEIBULL 2-PARAMETERS model was used. With the temporal series observed for each region, the least square method was used in the adjustment of speed distribution to determine the scale (c) and form (k) parameters of the model. The aeolic speed was calculated per week, month and year with their respective parameters together with the residue (E) error from the model to the temporal series. According to parameters "c" and "k" it is possible to figure the power average density per week, month and year, getting $c = 3.6$ m/s, $k = 2.0$, $E = 8.7\%$, $P = 40.2$ W/m² in Campo Grande; $c = 2.6$ m/s, $k = 1.1$, $E = 3.8\%$ e $P = 49.8$ W/m² in Dourados. The least square method appeared adequate for the adjustment of the distribution of wind speed frequency, being the best method of adjustment for the "c" and "k" WEIBULL parameters and presenting the least errors in literature. The errors are related to the samples of the historical series concerning the WEIBULL 2-PARAMETERS model. For the seasons there was a periodicity with senoidal aspects with minimum levels at the beginning of autumn and maximum levels at the end of winter and beginning on Spring; the predominant directions are well defined for both seasons. As to the direction, Campo Grande presented predominantly E with a 24.5% occurrence followed by N with a 19.8% occurrence and NE with 12.2%. Dourados presented predominantly E with a 23.5%, followed by SE with 9,4%. A seasonal rigidity and constancy of the predominant directions was verified.

Key words: wind data, WEIBULL, aeolic potential

INTRODUÇÃO

O conhecimento da variação e do comportamento cíclico anual das correntes eólicas, juntamente com suas magnitudes, é um meio de se estimar o possível aproveitamento de energia eólica, pois o vento como fonte de energia é largamente utilizado em vários países como Grécia, Índia, Estados Unidos. Atualmente existem em funcionamento sistemas de conversão que podem variar de menos de um quilowatt a alguns megawatts de potência, segundo a Organização Mundial de Meteorologia, para fornecer energia para diversas finalidades entre elas, a indústria, atividades agrícolas e uso doméstico. O

dimensionamento e a escolha de tais sistemas requer, entretanto, o conhecimento do potencial eólico da região onde será instalado o equipamento. E, ainda, seu aproveitamento na conversão de energia eólica em energia elétrica ou mecânica é altamente recomendado em localidades de difícil acesso e cuja instalação de redes ou linhas elétricas, além de acarretar a perda de potência através do efeito Joule, pode tratar-se de uma prática razoavelmente dispendiosa.

Tem-se usado para descrever o comportamento da distribuição de frequência de velocidade eólica inúmeros modelos estatísticos. Entretanto, maior atenção tem sido dada para a distribuição de WEIBULL, cujo modelo apresenta um bom ajuste para os dados de velocidade dos ventos, como indicado em HENNESSEY (1977). JUSTUS et al. (1978) que aplicaram o modelo para dados de mais de 100 (cem) estações nos Estados Unidos e concluíram que a distribuição de WEIBULL proporcionou o melhor ajuste. Diversos outros estudos como SUCHAROV et al. (1990) no Rio de Janeiro e GUPTA (1986) na Índia indicam ser a distribuição de WEIBULL o melhor modelo estatístico para descrever a distribuição de frequência de velocidade do vento.

No modelo de WEIBULL, os parâmetros para a distribuição de velocidade eólica anual se incumbem da determinação do potencial energético global para uma estação. Os parâmetros mensais são usados na estimativa da magnitude de um sistema de conversão de energia eólica para aplicações, tal qual um bombeador de água para irrigação, onde a energia necessária varia grandemente de mês a mês.

Fazendo uso destas informações e do fato de que não há estudos realizados em Mato Grosso do Sul neste aspecto, desenvolveu-se este trabalho com o intuito de avaliar o potencial eólico da região e estudar o comportamento da distribuição das velocidades e direções do vento para as localidades de Campo Grande e Dourados.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados de direção e velocidade dos ventos foram fornecidos pelo Departamento Nacional de Meteorologia (DNEMET).

Para Campo Grande utilizou-se 1 (um) valor diário médio no período de coleta de 1986 a 1991, cuja média consistiu de observações diárias da velocidade e direção do vento medidos a 10 (dez) metros de altura, sendo que a estação de Campo Grande encontra-se a uma altitude de 542,0 m acima do nível do mar com latitude de 20°26'42'' S e longitude de 54°37' W.

Os dados da estação de Dourados, a qual encontrava-se a uma altitude de 452,0 m com latitude de 22° 14' S e longitude de 54° 49' W, consistiram de 3 (três) observações diárias da velocidade e direção do vento a 10 (dez) metros de altura, durante os anos de 1981 a 1991.

A distribuição de WEIBULL 2-PARÂMETROS para a velocidade do vento foi expressa pela densidade de probabilidade:

$$p(V)dV = (k/c)(V/c)^{k-1} \cdot \exp(-(V/c)^k) \cdot dV \quad (1)$$

sendo a função de probabilidade acumulada dada por:

$$P_i(V \leq V_i) = \int_0^{V_i} p(V)dV = 1 - \exp\left[-(V_i/c)^k\right] \quad (2)$$

onde "c" é o fator de escala em unidades de velocidade do vento, "k" o fator de forma, adimensional, p_i o valor da densidade de probabilidade para um dado valor da velocidade do vento correspondente, V_i e V a variável velocidade do vento generalizada. O fator de forma (k) está inversamente relacionado à variância σ^2 das velocidades eólicas em torno da média.

Os parâmetros "c" e "k", conforme discutido em JUSTUS et al. (1978), podem ser determinados a partir da transformação da equação 2 na forma linear:

$$\ln(-\ln(1-p_i)) = -k \ln(c) + k \ln(V_i)$$

que pode ser representada pela reta:

$$Y_i = a + b \cdot X_i$$

onde $Y_i = \ln[-\ln(1-p_i)]$, $X_i = \ln(V_i)$, $a = -k \cdot \ln(c)$ e $b = k$.

Assim, a determinação dos parâmetros "c" e "k" fica condicionada ao cálculo dos coeficientes a e b da reta. Esses podem ser obtidos pelo método dos mínimos quadrados aplicados ao conjunto de dados $X_i = \ln(V_i)$ e $Y_i = \ln[-\ln(1-p_i)]$ obtidos dos valores de V_i e p_i que, por sua vez, são determinados a partir das séries observadas da velocidade do vento distribuídas em n intervalos de classes com suas respectivas frequências.

O grau de ajuste das séries observadas ao modelo de WEIBULL foi verificado pelo erro residual (JUSTUS et al. 1976), calculado por:

$$E^2 = \sum_i^n \left[P_{i(obs)}(V \leq V_i) - P_{i(cal)}(V \leq V_i) \right]^2 \quad (3)$$

onde $P_{i(obs)}$ é a probabilidade acumulada observada e $P_{i(cal)}$ é a probabilidade acumulada calculada através do modelo de WEIBULL.

A densidade de potência instantânea de fluxo de ar através de uma unidade de área normal ao fluxo é igual a:

$$P(V) = \frac{1}{2} \mathbf{r} \cdot V^3 \quad (4)$$

onde V é a velocidade instantânea e \mathbf{r} é a densidade do ar.

A densidade de potência média de fluxo de ar através de uma unidade de área normal ao fluxo é igual a:

$$P_{med} = \frac{1}{2} \mathbf{r} \cdot c^3 \cdot \Gamma(1 + 3/k) \quad (5)$$

onde $\Gamma(1 + 3/k)$ é a função gama e supõe-se que a densidade permaneça constante ($\mathbf{r} = 1,23 \text{ Kg/m}^3$) (SUCHAROV et al. 1990).

Como exemplificado em JUSTUS et al. (1978), outro método para o ajuste dos parâmetros "c" e "k" é a definição de probabilidade de ocorrência da velocidade máxima.

Segundo WIDGER (1977), a probabilidade de ocorrência da velocidade máxima para um dado período é conseguida pela razão de: 1) o tempo em minutos requerido para a velocidade máxima ser medida pela estação, dada pelo banco de dados publicado, para: 2) o número de minutos no período considerado, ou:

$$p(V_{max}) = (1/n) \cdot V_{max} \cdot d \quad (6)$$

onde $p(V_{max})$ é a probabilidade de ocorrência da velocidade mais rápida V_{max} no banco de dados ou no equipamento onde V_{max} é dada, n é o número de observações diárias igualmente intercaladas e d o número de dias do período. Mas se:

$$p(V_{max}) = (1/n) V_{max} \cdot d = \exp [- (V_{max} / c)^k]$$

esta última equação pode ser rearranjada e tomando o resultado da velocidade média para a distribuição de WEIBULL 2-PARÂMETROS temos:

$$\bar{V} = c \cdot \Gamma(1 + 1/k)$$

resultando:

$$V_{max} / \bar{V} = [\ln (n \cdot V_{max} \cdot d)]^{1/k} / \Gamma(1 + 1/k) \quad (7)$$

que, para dados \bar{V} e V_{\max} , pode ser solucionada interativamente para o apropriado valor de k . Com k determinado, o parâmetro c pode ser encontrado a partir de:

$$c = \bar{V} / \Gamma(1 + 1/k) \quad (8)$$

Segundo recentes estudos proposto por JUSTUS et al. (1978), tem-se determinado que diversas relações existem entre os valores de k (ou variância da distribuição) e a velocidade eólica média. Matematicamente esses resultados podem ser expressos para os valores da variabilidade média, alta (90%) e baixa (10%) dos sítios, sendo dado por:

$$k = \begin{cases} 1,05\bar{V}^{1/2} & (alta) \\ 0,94\bar{V}^{1/2} & (media) \\ 0,83\bar{V}^{1/2} & (baixa) \end{cases}$$

sendo o parâmetro c calculado a partir da equação 8.

A partir desses métodos de ajuste houve a comparação entre seus graus de aderência às séries observadas, verificado pelo erro residual dado pela equação 3.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Podemos observar na Figura 1 que a velocidade e na Figura 2 que a potência instantânea dos ventos possuem um comportamento cíclico anual para as localidades de Campo Grande e Dourados. Em Campo Grande os mínimos ocorreram no período de março a maio e seus máximos de julho a outubro; em Dourados, os mínimos ocorreram de março a maio, também, e máximos de julho a novembro.

Analisando os dados mensais para Campo Grande observou-se um valor máximo de velocidade em 3,36 m/s e o potencial eólico de 40,28 W/m² em julho e um mínimo de 2,13 m/s e 9,49 W/m² em março, com uma média anual de 2,76 m/s e 40,23 W/m². Na estação de Dourados ocorreram velocidades máximas em setembro de 3,61 m/s e o potencial eólico de 87,17 W/m² estando os mínimos em 2,22 m/s e 20,95 W/m² no mês de março, com uma média anual de 2,88 m/s e 48,57 W/m².

A Tabela 1 apresenta as estimativas mensais e a média anual dos parâmetros "c" (escala), "k" (forma) e o erro residual (porcentagem) calculados com base nas séries observadas da velocidade do vento distribuídas em n intervalos de classes, nos períodos e estações citados anteriormente.

Verifica-se que, para Campo Grande, "k" varia de $1,6 \leq k \leq 4,3$ ocorrendo os maiores valores no fim do inverno e no meio da primavera; para Dourados varia de $1,0 \leq k \leq 2,1$ ocorrendo máximos no período da primavera. Observa-se que, para Dourados, há pouca variação sazonal do parâmetro "k" e em Campo Grande esse mesmo parâmetro oscila bastante em relação à média – grande variação sazonal. JUSTUS et al. (1976) observaram que o valor de "k" está inversamente relacionado com a variância da

velocidade do vento em torno da velocidade média, o que implica baixas variâncias se "k" for alto e vice-versa.

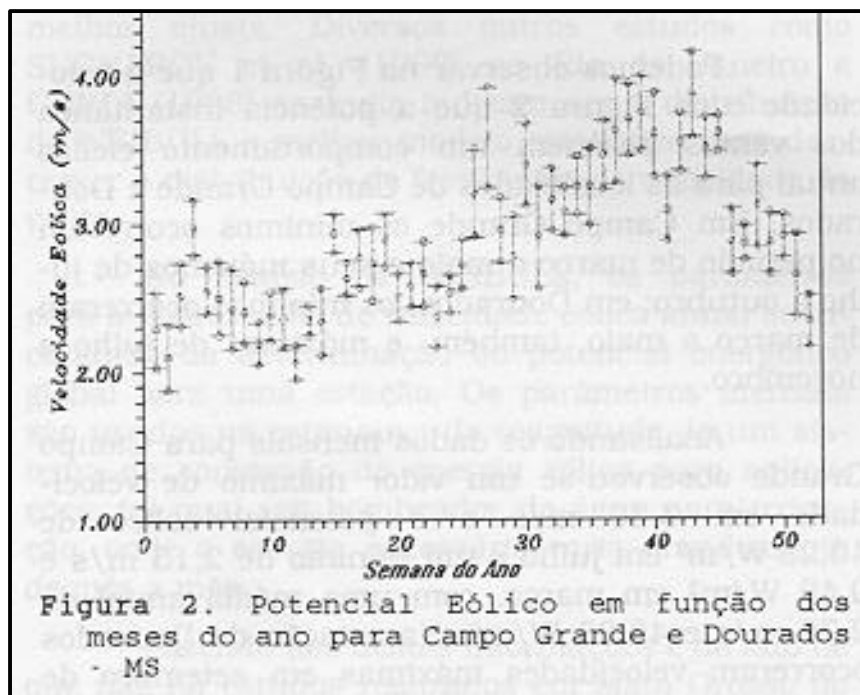
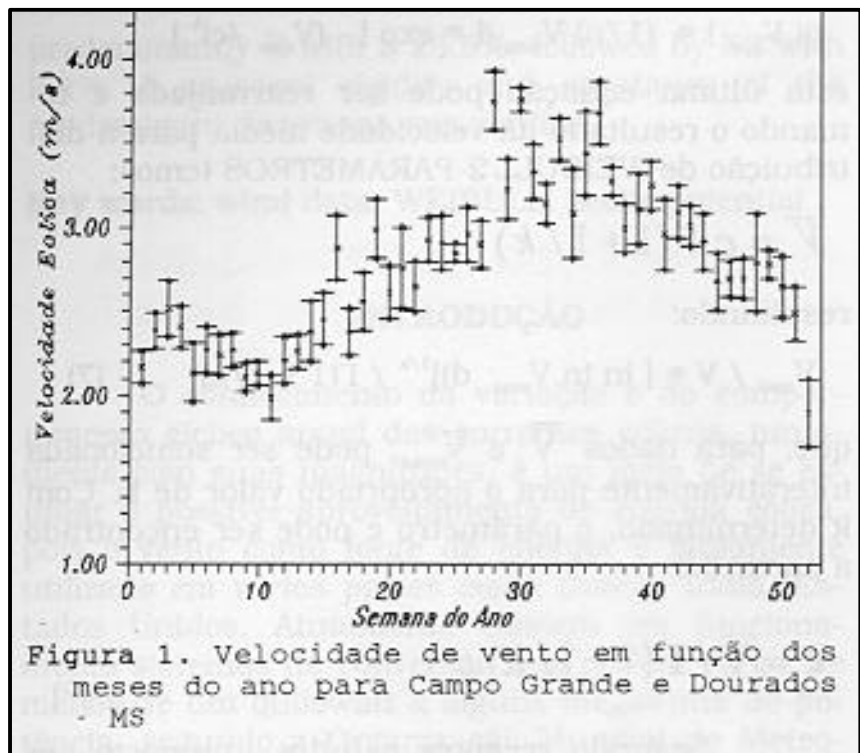


Tabela 1. Valores dos parâmetros "c" (m/s), "k" (adimensional) e do Erro (E), em porcentagem, para Campo Grande (a) e Dourados (b).

		Jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	Ano
(a)	c	2,7	2,6	2,4	2,9	3,1	3,6	4,1	3,7	3,9	3,6	3,0	3,5	3,6
	k	4,3	3,2	2,7	3,3	3,5	3,6	3,4	3,8	2,9	3,7	2,9	1,6	2,0
	E	14,3	13,3	11,1	7,1	8,5	25,3	23,8	10,8	16,7	16,9	4,6	35,9	29,5
(b)	c	2,2	2,2	2,0	2,4	2,3	2,3	2,8	2,7	3,3	3,2	2,9	2,5	2,6
	k	1,0	1,0	1,1	1,2	1,1	1,0	1,0	1,0	1,1	1,2	1,2	1,1	1,1
	E	18,1	18,3	19,4	21,7	20,4	19,6	20,6	19,2	19,3	21,5	20,4	19,9	19,6

O parâmetro "c" variou dentro do intervalo de $2,4 \leq c \leq 4,1$ para Campo Grande com valores mínimos no final do verão e início do outono; para Dourados, variou de $2,0 \leq c \leq 3,3$, ocorrendo seus menores valores no verão e outono.

O ajuste do Modelo de WEIBULL 2-PARÂMETROS aos dados de velocidade dos ventos para as duas estações foi verificada através do erro residual apresentado na Tabela 2.

Observa-se que os erros residuais calculados na coluna M.M.Q. (Método dos Mínimos Quadrados) têm os valores menores que os das duas demais colunas, para as estações. Somente em junho e julho, em Campo Grande, o ajuste do método da Velocidade Média e Máxima apresenta erros menores sendo isso devido à amplitude das séries observadas.

Considerando os valores de "c" e "k" médios anuais, a probabilidade média de ocorrerem velocidades maiores que a velocidade média anual de 1,76 m/s, para Campo Grande, é de 55,6%; para Dourados, a probabilidade de ocorrência de velocidades maiores que a média de 2,88 m/s é de 32,1%.

Tabela 2. Comparação entre os valores de erros percentuais para Campo Grande(a) e Dourados(b) entre os três diferentes métodos: Método dos Mínimos Quadrados (M.M.Q.), Método da Velocidade Média e Máxima (V_{max}/V) e Método da Relação (k vs V). Os valores são expresso em porcentagem.

Mês	(a)			(b)		
	M.M.Q. (%)	V_{max}/V (%)	k vs V (%)	M.M.Q. (%)	V_{max}/V (%)	k vs V (%)
JAN	14,3	29,1	30,1	18,1	72,0	30,6
FEV	13,3	25,4	31,0	18,3	63,9	28,1
MAR	11,1	28,6	25,9	19,4	60,8	26,7
ABR	7,1	15,0	28,2	21,7	64,6	28,8
MAI	8,5	20,5	26,6	20,4	70,0	32,7
JUN	25,3	18,9	31,6	19,6	71,5	34,1
JUL	23,8	19,3	32,8	20,6	73,2	38,6
AGO	10,2	31,1	29,7	19,2	76,6	34,0
SET	16,7	31,4	27,6	19,3	65,0	31,1
OUT	16,9	30,7	24,8	21,5	69,6	32,4
NOV	4,6	27,9	28,1	20,4	73,5	30,4
DEZ	35,9	11,5	26,5	19,9	65,6	30,4

Analisando o comportamento mensal para Campo Grande, Figura 3, observa-se que o cálculo da frequência da direção do vento predominante foi a de E (leste), com ocorrência da direção N (norte) nos meses de janeiro e dezembro; cujos valores anuais resultaram em ocorrências de 24% E (leste), 19,8% N (norte) e 12,2% NE (nordeste), com 9,2% de calmarias. Para Dourados, mensalmente, houve a predominância da direção NE (nordeste), tendo-se para o ano todo: 23,5% na direção NE, 9,4% SE (sudeste) e 8,7% SW (sudoeste), com 27,4% de calmarias.

Avaliando os valores mensais do sucesso de ocorrência das direções predominantes (Figura 3) é fácil perceber o comportamento e predominância de uma única direção em cada mês, considerando-se sua variação sazonal.

Para as estações estudadas houve uma periodicidade cujo aspecto aparenta-se a uma senóide, cujos mínimos se encontram no começo do outono e seus máximos no final do inverno e começo da primavera; as direções predominantes dos ventos são bem definidas para ambas as estações, havendo pouca variação quanto à direção predominante para cada estação, respectivamente.

O Método dos Mínimos Quadrados apresentou-se adequado para o ajuste da distribuição de frequência de velocidade dos ventos, como observado em SUCHAROV et al. (1990) e em JUSTUS et al. (1978). O método dos Mínimos Quadrados é o melhor método de ajuste para os parâmetros "c" e "k" de WEIBULL, apresentando os menores erros dentre os métodos apresentados em JUSTUS et al. (1978). Os erros apresentados na Tabela 2, no que concerne a seus valores relativamente altos, são resultado de séries temporais das velocidades eólicas não ultrapassarem efetivamente valores em torno de 5 m/s, o que é considerado uma amplitude muito baixa para um ajuste bem apurado através do modelo de WEIBULL 2-PARÂMETROS. Desta maneira, os erros estão relacionados com as amostragens das séries históricas com relação ao ajuste da distribuição de WEIBULL com dois parâmetros, pois, tais como as estações estudadas, alguns sítios têm características eólicas não previstas pela distribuição de WEIBULL 2-PARÂMETROS. JUSTUS et al. (1976) relata problemas a baixas velocidades e HENNESSEY (1977) refere-se a distribuições que são muito deformadas ou heterogêneas para uma distribuição de apenas dois parâmetros. Desta forma, pode-se testar um modelo com mais parâmetros para a previsão dessas deformações ou heterogeneidade a baixas velocidades.

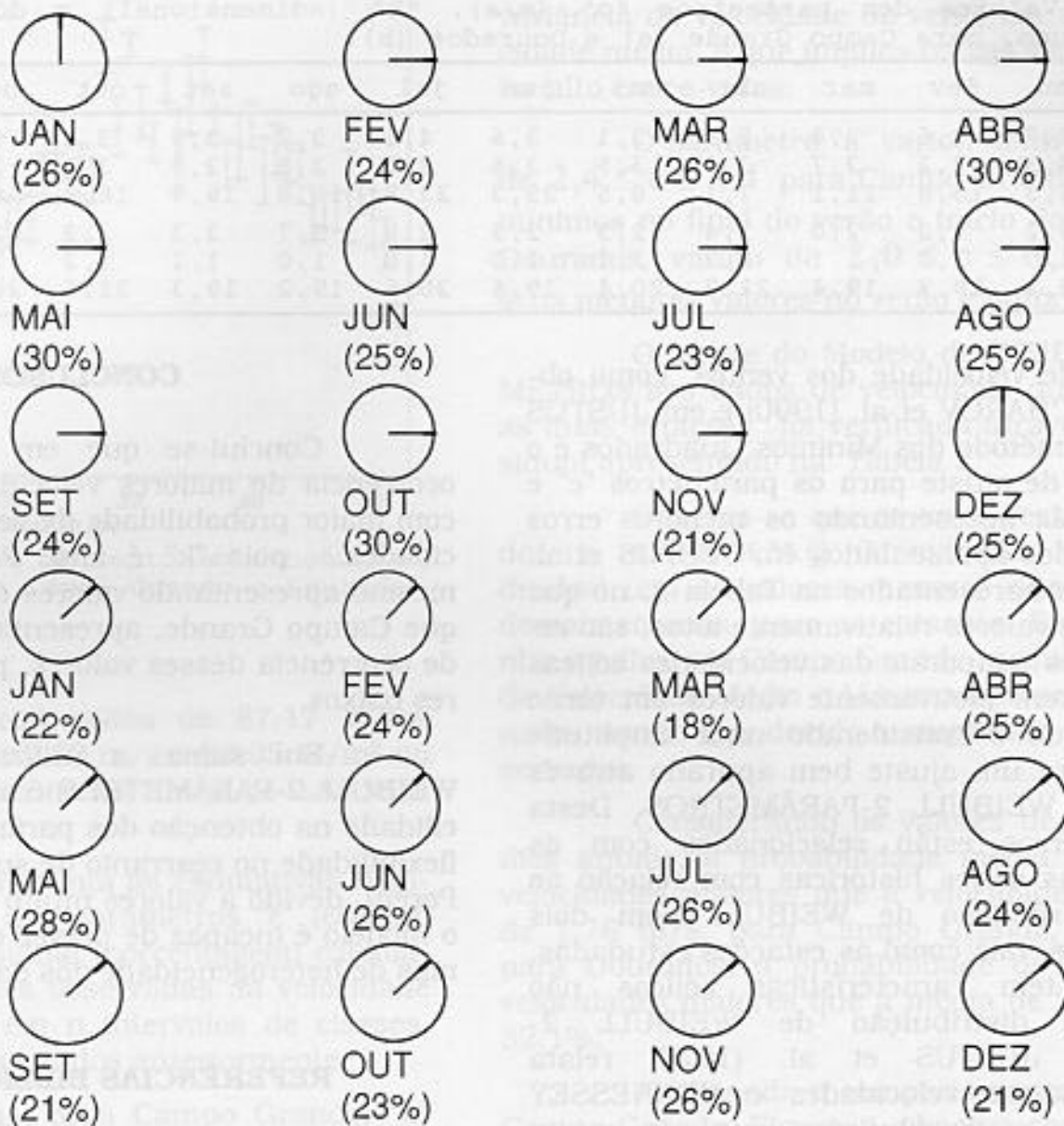


Figura 3. Direção predominante dos ventos em cada mês para Campo Grande e Dourados-MS.

CONCLUSÕES

Conclui-se que em Campo Grande há ocorrência de maiores velocidades durante o ano, com maior probabilidade de se observar essas velocidades – pois "k" é alto. Porém, em Dourados mesmo

apresentando valores de "c" pouco menores que Campo Grande, apresenta baixa probabilidade de ocorrência desses valores, pois "k" assume valores baixos.

Em suma, a utilização do modelo de WEIBULL 2-PARÂMETROS é adequada devido a facilidade na obtenção dos parâmetros citados e pela flexibilidade no rearranjo de sua forma matemática. Porém, devido a valores muito baixos da velocidade o modelo é incapaz de prever ou ajustar certas formas de heterogeneidade dos dados colhidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- GUPTA, B.K. Weibull parameters for annual and monthly wind speed distributions for five locations in Índia. **Solar Energy**. India . v. 37, n. 6, p. 469-671, 1986.
- HENESSEY, J.P. Some aspects of wind power statistics. **Journal Applied Meteorology**. USA . v. 16, n. 2, p. 119-128, 1977.
- JUSTUS, C.G., MIKAIL, A. Heigh variation of wind speed and wind distribution. **Geophys. Res. Lett.** USA . v. 3, p. 261-264, 1976.
- JUSTUS, C.G., HARGRAVES, W.R., MIKAIL, A.; et al. Methods for estimating wind speed frequency distributions. **Journal Applied Meteorology**. USA . v. 17, n. 3, p. 350-353, 1978.
- SUCHAROV, E.C., DOMINGUES, M.O., SILVA, A.L.M. O Modelo de Weibull para distribuições de velocidades do vento, no Estado do Rio de Janeiro. In: VI CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA , **Anais**, Nov. 1990. Salvador, BA., p. 593-597.
- WIDGER, W.K., Jr. Estimations of wind speed distributions using only the monthly average and fastest mile data. **Journal Applied Meteorology**. USA. v. 16, p. 244-247, 1977.