

# Application of the Cuckoo Search in the Adjustment of Weibull Curves for Wind Energy Using Wind Data of Petrolina City

C. F. de Andrade, F. R. Veiga, M. V. S. Macedo, L. F. dos Santos, P. A. C. Rocha and K. S. Guedes

**Abstract**— In this work a Cuckoo Search (CS) applicability study was carried out using the methodology described by Yang and Deb (2009) in the optimization of Weibull curves, being implemented from an algorithm written in programming language R. The real velocity data were obtained from the National System for the Organization of Environmental Data (SONDA) platform for the city of Petrolina - PE, because it is located in a state with great potential for wind energy generation. The Cuckoo Search heuristic method was compared with six deterministic methods widely used in the literature from the results of the statistical tests Root Mean Square Error (RMSE),  $R^2$ , Mean Absolute Error (MAE) and Power Density Error (EDP). With the objective function used, Cuckoo Search was satisfactory in the wind representation of the studied region, presenting RMSE of 0.006052,  $R^2$  of 0.99348 and MAE of 0.003979, more desirable in relation to the other methods. Also, an EDP of approximately 1.12% above the actual power density was obtained, which makes it difficult to use for problems in which energy oversizing is not allowed.

**Keywords**— Cuckoo Search, Weibull curve, wind potential.

## I INTRODUÇÃO

De acordo com os estudos, os dados de velocidade de vento mostraram ser bem representados por uma distribuição de Weibull, que apresenta a frequência de ocorrência de valores de velocidade ao longo de um período. Para construir essa curva, é necessário determinar os parâmetros que a definem, que são o fator de forma ( $k$ ) e o fator de escala ( $c$ ) [4].

Para encontrar esse conjunto de parâmetros, os métodos determinísticos são largamente utilizados e percebe-se que, para cada localidade, há um procedimento distinto que melhor define o vento da região. O uso desses métodos está sendo comparado com os métodos heurísticos, que são um conjunto de algoritmos matemáticos exploratórios que atuam a partir do aprendizado de variáveis, buscando as melhores soluções possíveis para um problema com grande eficiência [3].

A Busca Cuco é um algoritmo heurístico baseado no parasitismo de ninhada praticado por algumas espécies de cuco, cuja estratégia de reprodução consiste no depósito dos ovos em ninhos de outras espécies de pássaros [20].

Esse método mostrou uma rápida e competente convergência quando aplicado em diversos problemas pela literatura, o que representa uma vantagem frente ao uso de métodos determinísticos para a resolução dos mesmos problemas.

Devido à grande importância da caracterização do vento de um determinado local para viabilizar projetos de geração eólica, é necessário obter os parâmetros de Weibull de forma eficiente e que resultem em uma curva que represente com boa precisão os dados de vento de uma região. Modelagens errôneas do recurso eólico de um local podem causar tanto um superdimensionamento do parque eólico, quando as velocidades reais são predominantemente menores do que as calculadas, quanto sobrecarga das torres, quando dimensionadas para velocidades menores do que as reais. O trabalho tem como inovação, obter os parâmetros de Weibull, não só através dos tradicionais métodos determinísticos, mas também usando um método heurístico, Busca Cuco, de fácil convergência e que ainda é pouco aplicado em energia eólica.

O estado de Pernambuco, que possui grande importância no abastecimento de energia do Nordeste, vem se expandindo na área de energia eólica e atrai diversos investidores para o local, o que contribui para o crescimento econômico das áreas de implementação de energia limpa, devido à geração de renda e empregos. Assim, é necessário aplicar medidas efetivas de caracterização do vento com a finalidade de dar continuidade a essa tendência.

Os métodos determinísticos são largamente utilizados pela literatura para resolver diversos tipos de problemas de engenharia. Entretanto, os métodos heurísticos geralmente apresentam resultados superiores aos determinísticos, com erros menores e uma convergência mais rápida. Portanto, esse trabalho teve como objetivo a avaliação da efetividade do método heurístico da Busca Cuco na otimização de uma curva de Weibull a partir da obtenção do conjunto de parâmetros que caracterizam essa distribuição, a fim de descrever o regime de ventos da cidade de Petrolina, no estado de Pernambuco, região Nordeste do Brasil.

## II METODOLOGIA

### A. Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull é utilizada para realizar o estudo do vento de determinado local e oferece um panorama da frequência de ocorrência das velocidades do vento ao longo de

C. F. Andrade, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil, [carla@ufc.br](mailto:carla@ufc.br), F. R. Veiga, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil [fernandarochaveiga@gmail.com](mailto:fernandarochaveiga@gmail.com)

L. F. do Santos, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil, [lindemberg.li@hotmail.com](mailto:lindemberg.li@hotmail.com),

M. V. S. Macedo, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil, [marcusmacedo87@gmail.com](mailto:marcusmacedo87@gmail.com)

P. A. C. Rocha, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil, [paulo.rocha@ufc.br](mailto:paulo.rocha@ufc.br), K. S. Guedes, Universidade Federal do Ceará, [kevin\\_guedes@hotmail.com](mailto:kevin_guedes@hotmail.com).

Corresponding author: Carla Freitas de Andrade

um período de tempo [4]. Essa distribuição é representada por (1).

$$f(v) = k \frac{v^{k-1}}{c^k} \exp \left[ - \left( \frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (1)$$

Na qual  $f(v)$  é a função densidade de probabilidade de ocorrência da velocidade  $v$ , que está em  $m/s$ ;  $c$  é o fator de escala medido em  $m/s$  e  $k$  é o fator de forma que é adimensional, sendo  $v, c$  e  $k > 0$  [4].

A função cumulativa de distribuição, representada por  $F(v)$ , que é a fração do tempo na qual a velocidade média por hora é maior que a velocidade  $v$  [11], e é obtida por (2):

$$F(v) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (2)$$

Algoritmos foram utilizados para resolver problemas relacionados ao estudo do vento por meio de métodos determinísticos e heurísticos.

### B. Método Determinísticos

Para esse trabalho, foram utilizados métodos determinísticos aplicados na estimativa dos parâmetros  $c$  e  $k$  da curva de Weibull [5], a fim de comparar o desempenho deles com o do método da Busca Cuco. Esses métodos foram o Método Empírico, o Método da Energia Padrão, o Método Gráfico, o Método do Momento, o Método da Máxima Verossimilhança e o Método da Máxima Verossimilhança Modificado.

### C. Método Empírico (ME)

O Método Empírico foi utilizado em curvas de velocidade do vento [9] e, nesse processo, é necessário que os valores da velocidade média e do desvio padrão dos dados de vento coletados estejam disponíveis. Assim, o parâmetro  $k$  é obtido por (3):

$$k = \left( \frac{\sigma}{\bar{v}} \right)^{-1,086} \quad (3)$$

Na qual  $\bar{v}$  é a velocidade média, dada pela Equação 4, e  $\sigma$  é o desvio padrão, dado por (5).

$$\bar{v} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i \quad (4)$$

$$\sigma = \left[ \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v})^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

Onde  $N$  é o número total de dados de velocidade e  $v_i$  é o valor da velocidade do vento no instante  $i$ . A partir da quantia encontrada para o parâmetro  $k$ , o parâmetro  $c$  pode ser calculado a partir de (6):

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma \left( 1 + \frac{1}{k} \right)} \quad (6)$$

Tal que a função Gama ( $\Gamma$ ) é representada, para  $x > 0$  [1], por (7):

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} s^{x-1} e^{-s} ds \quad (7)$$

### D. Método da Energia Padrão (MEP)

O fator padrão de energia ( $E_{pf}$ ) representa a relação entre o total de energia que o vento dispõe e a potência que é efetivamente gerada por um aerogerador [11]. Desse modo, tem-se que o fator de energia padrão é obtido por (8):

$$E_{pf} = \frac{1}{N\bar{v}^3} \sum_{i=1}^N v_i^3 \quad (8)$$

Onde  $N$  é o número total de dados de velocidade,  $v_i$  é o valor da velocidade do vento no instante  $i$  e  $\bar{v}$  é a média das velocidades do vento, representada por (4). A média dos cubos das velocidades do vento ( $\bar{v}^3$ ) é dada por (9):

$$\bar{v}^3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^3 \quad (9)$$

Então, tem-se que o fator de energia padrão é dado por (10):

$$E_{pf} = \frac{\bar{v}^3}{\bar{v}^3} \quad (10)$$

Com o conhecimento do parâmetro  $k$ , o parâmetro  $c$  é obtido a partir da Equação 6. Segundo o resultado por (10), o parâmetro  $k$  pode ser calculado por (11):

$$k = 1 + \frac{3,69}{E_{pf}^2} \quad (11)$$

### E. Método Gráfico (MMQ)

A partir de (2), que representa a função cumulativa de distribuição, pode ser obtida por (12) isolando o fator exponencial e tomando o logaritmo natural duas vezes:

$$\ln \{ -\ln [1 - F(v)] \} = k \ln v - k \ln c \quad (12)$$

A partir da representação de um gráfico linear, comparando-se a (12) com uma equação de primeiro grau, o par ordenado  $(x, y)$  é tal que  $\ln \{ -\ln [1 - F(v)] \}$  representa o valor do eixo das ordenadas e  $\ln v$  representa o valor do eixo das abscissas. Dessa forma, tem-se que:

$$a = k \quad (13)$$

$$b = -k \ln c \quad (14)$$

Tem-se, portanto, que os parâmetros  $c$  e  $k$  são adquiridos pelas (15) e (16):

$$k = a \quad (15)$$

$$c = \exp \left( -\frac{b}{a} \right) \quad (16)$$

### F. Método do Momento (MM)

O Método do Momento tem como elementos principais o desvio padrão e a velocidade média dos dados de vento, que devem ser inicialmente conhecidos e são suficientes para o processo [9]. Dessa forma, a velocidade média ( $\bar{v}$ ) e o desvio padrão ( $\sigma$ ) são obtidos, respectivamente, pelas (17) e (18):

$$\bar{v} = c \left[ \Gamma \left( 1 + \frac{1}{k} \right) \right] \quad (17)$$

$$\sigma = c \left[ \Gamma \left( 1 + \frac{2}{k} \right) - \Gamma^2 \left( 1 + \frac{1}{k} \right) \right]^{1/2} \quad (18)$$

Na qual  $\bar{v}$  e  $\sigma$  também são dados por (4) e (5), respectivamente, e a função Gama é expressa por (7). Pode-se dividir (18) por (17) para obter uma expressão para o cálculo do  $k$  por (19):

$$\frac{\sigma}{\bar{v}} = \left[ \frac{\Gamma \left( 1 + \frac{2}{k} \right)}{\Gamma^2 \left( 1 + \frac{1}{k} \right)} - 1 \right]^{1/2} \quad (19)$$

Assim, o parâmetro  $k$  deve ser calculado a partir de um processo iterativo, tal que é necessário supor um valor inicial para esse fator. Será utilizada a suposição de que  $k = 2$  é uma boa hipótese para o valor inicial da variável [13]. Assim,  $k$  é calculado por (20):

$$\frac{\Gamma\left(1+\frac{2}{k_t}\right)}{\Gamma^2\left(1+\frac{1}{k_t}\right)} - \left(\frac{\sigma}{v}\right)^2 - 1 = 0 \tag{20}$$

G. Método da Máxima Verossimilhança (MMV)

O Método da Máxima Verossimilhança é um método de estimativa de parâmetros para modelar dados de vento [15], sendo o parâmetro  $k$  da curva de Weibull estimado por (21).

$$k = \left( \frac{\sum_{i=1}^N v_i^k \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^N v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^N \ln(v_i)}{N} \right)^{-1} \tag{21}$$

Na qual  $v_i$  é a velocidade, dada em  $m/s$ , no instante  $i$  e  $N$  é o número total de valores de velocidade diferentes de zero. Para utilizar (21), todos os valores de velocidade que sejam iguais a zero foram retirados do banco de dados.

O resultado de (21) é obtido através de um processo de iteração numérica, sendo necessário o emprego de métodos numéricos para sua resolução. Para obter essa resposta, é necessário supor um valor inicial para o parâmetro  $k$ . É considerado que  $k = 2$  é uma boa hipótese para o valor inicial da variável [13].

Determinado o  $k$ , o parâmetro  $c$  pode ser calculado por (22):

$$c = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^k \right)^{1/k} \tag{22}$$

H. Método da Máxima Verossimilhança Modificado (MMS)

O Método da Máxima Verossimilhança possui resolução similar ao do método anterior e somente pode ser utilizado se os dados relativos à velocidade do vento estiverem na forma de uma distribuição de frequência de Weibull [5].

Assim, os valores da velocidade são agrupados obtendo a frequência relativa em cada intervalo de velocidade, caracterizada por  $f(v'_i)$ , onde  $v'_i$  é a velocidade média do intervalo  $i$ ,  $f(v \geq 0)$  é a probabilidade de ocorrência da velocidade do vento ser maior que zero e  $N$  é o número total de intervalos.

Dessa forma, o parâmetro  $k$  da curva de Weibull é estimado por (23):

$$k = \left( \frac{\sum_{i=1}^N v'^k_i \ln(v'_i) f(v'_i)}{\sum_{i=1}^N v'^k_i f(v'_i)} - \frac{\sum_{i=1}^N \ln(v'_i) f(v'_i)}{f(v \geq 0)} \right)^{-1} \tag{23}$$

Determinado o  $k$ , o parâmetro  $c$  pode ser calculado por (24):

$$c = \left( \frac{1}{f(v \geq 0)} \sum_{i=1}^N v'^k_i f(v'_i) \right)^{1/k} \tag{24}$$

I. Método Heurístico

Métodos heurísticos são um conjunto de algoritmos matemáticos, possivelmente iterativos e exploratórios, que ocasionalmente são inspirados por fenômenos naturais. Eles, quando iterativos, buscam a solução de um problema a partir do aprendizado de variáveis, pois, a cada iteração, os resultados intermediários se moldam para aproximarem-se cada vez mais dessa solução [3].

Os métodos heurísticos modernos (ou meta-heurísticos) são métodos heurísticos de alto nível, que possuem uma eficiência

e eficácia maior ao explorar um espaço de busca [2]. A eficiência dos métodos heurísticos que se inspiram em fenômenos naturais é explicada pelo fato de que eles imitam as melhores características da natureza, que foram evoluídas pela seleção natural ao longo dos anos, com a sobrevivência do mais adaptável ao ambiente [20].

J. Busca Cuco

A Busca Cuco (*Cuckoo Search* – CS) é um algoritmo heurístico desenvolvido para auxiliar na resolução de problemas de otimização. Ele é baseado no parasitismo de ninhada praticado por algumas espécies de cuco, cuja estratégia de reprodução consiste no depósito dos ovos em ninhos de outras espécies de pássaros [20].

K. Voos de Lévy

Os voos de Lévy são passeios aleatórios cujo comprimento do passo é modelado a partir da distribuição de Lévy e definido pela lei de potência, mostrada por (25). O passo é um tamanho calculado e, nesse caso, retrata o quanto um valor suposto de uma variável se distanciará do valor atual da mesma. Passeios aleatórios, por sua vez, são objetos matemáticos definidos por uma função no espaço cuja próxima situação depende somente da atual, sendo, portanto, uma série de etapas consecutivas e aleatórias [19].

$$L(s) \sim |s|^{-1-\beta} \tag{25}$$

Sendo  $s$  o tamanho do passo e  $\beta$  um índice, tal que  $0 < \beta \leq 2$ .

Os voos de Lévy são mais eficientes que passeios aleatórios comuns, pois sua variância sofre incrementos mais rapidamente [19]. Para gerar números aleatórios a partir dos voos de Lévy deve-se gerar a direção, por uma distribuição uniforme, e o passo, por (26).

$$s = \frac{u}{|v|^{1/\beta}} \tag{26}$$

Sendo  $s$  o passo,  $\beta$  um valor tal que  $1 \leq \beta \leq 2$ ,  $u$  e  $v$  números aleatórios de uma distribuição normal, tal que:

$$u \sim N(0, \sigma_u^2) \tag{27}$$

$$v \sim N(0, \sigma_v^2) \tag{28}$$

As variâncias de  $u$  e  $v$  são representadas por  $\sigma_u$  e  $\sigma_v$  e dadas por (29) e (30), respectivamente:

$$\sigma_u = \left\{ \frac{\Gamma(1+\beta) \sin(\frac{\pi\beta}{2})}{\Gamma[\frac{(1+\beta)}{2}] \beta 2^{\frac{\beta-1}{2}}} \right\}^{1/\beta} \tag{29}$$

$$\sigma_v = 1 \tag{30}$$

Para preservar a melhor solução, se o elemento em questão for o melhor, a subtração garantirá que o passo será zero e, portanto, o elemento não sofre modificações. Desse modo, com o conhecimento de  $s$ , poderá ser gerado o valor de  $\alpha$ , por (31):

$$\alpha = 0,01s(s - s_{melhor}) \tag{31}$$

Portanto, a geração de uma nova posição é dada por (32):

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + \alpha \oplus Lévy(\lambda) \tag{32}$$

Sendo  $x_i^{(t+1)}$  o novo elemento gerado a partir do elemento  $x_i^{(t)}$ ,  $\lambda$  é um parâmetro, tal que  $1 < \lambda \leq 3$ , e  $\alpha$  é o tamanho do passo, calculado por (31). Assim, o novo elemento depende do elemento anterior acrescido de um valor que acompanha a

distribuição de Lévy. Desse modo, pode-se inferir que haverá uma maior probabilidade de o novo valor ser próximo ao que o derivou, pois a distribuição é mais densa para números menores [20].

A Fig. 1 apresenta o fluxograma do algoritmo Busca Cuco, resumindo todas as etapas descritas anteriormente.

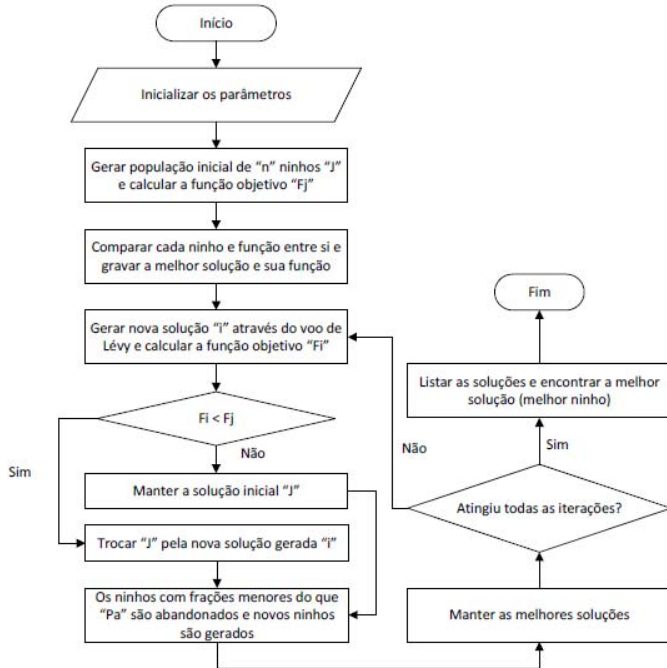


Figura 1. Fluxograma do algoritmo Busca Cuco.

#### L. Testes de análise estatística

Os parâmetros de diversos modelos estatísticos precisam ser medidos da forma mais precisa possível, a fim de não se distanciar tanto da distribuição com a qual os dados são representados [21]. Assim, testes estatísticos são aplicados para avaliar a eficiência dos métodos propostos em aproximar os dados de velocidade de vento para uma distribuição de Weibull, quantificando a dispersão entre eles e verificando sua correlação [10].

#### M. Teste da Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (RMSE)

É utilizado para calcular a diferença entre dados previstos e dados observados, a fim de avaliar se as estimativas são confiáveis [12]. Dessa forma, tem-se que o RMSE é dado por (33):

$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{E[(y_i - x_i)^2]} \quad (33)$$

Tal que  $E(x)$  é a esperança de uma população  $x$ , representada por (34).

$$E(x) = \mu \quad (34)$$

Sendo  $\mu$  a média dessa população, mostrada por (35).

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (35)$$

Relacionando (33) e (35) tem-se, portanto:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2} \quad (36)$$

Tal que  $y_i$  é o dado experimental e  $x_i$  é o dado obtido pela distribuição de Weibull no instante  $i$  e  $N$  é o número total de dados existentes. Como a análise será realizada de acordo com a função densidade de probabilidade, então tem-se (37):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_{medido_i} - f_{calculado_i})^2} \quad (37)$$

Os valores desse teste serão sempre positivos e é interessante obter um valor pequeno de  $RMSE$ , pois isso indica que a dispersão entre os dados é baixa. A desvantagem desse método é que, se houver alguns erros grandes, o valor do  $RMSE$  aumenta substancialmente, mesmo que a quantidade de defeitos seja pequena.

#### N. Teste do Coeficiente de Determinação ( $R^2$ )

O coeficiente de determinação, denotado por  $R^2$ , é uma medida da proporção com a qual uma curva é bem ajustada [17]. Esse teste retorna um valor entre 0 e 1, tal que, quanto mais próximo de 1 melhor é a adaptação do cálculo aos dados reais. Desse modo, o  $R^2$  é dado por (38):

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (38)$$

Tal que  $SSE$  é o erro da soma dos quadrados e  $SST$  é a soma total dos quadrados, dados por:

$$SSE = \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2 \quad (39)$$

$$SST = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \quad (40)$$

Sendo  $y_i$  o valor real e  $x_i$  o valor calculado do elemento  $i$ ,  $N$  é o número total de dados e  $\bar{y}$  a média de todos os valores reais. Como a análise foi realizada de acordo com a função densidade de probabilidade, então:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (f_{medido_i} - f_{calculado_i})^2}{\sum_{i=1}^N (f_{medido_i} - \bar{f}_{medido})^2} \quad (41)$$

Esse tipo de teste é bastante utilizado pela sua simplicidade de operação e sua confiabilidade depende da quantidade de valores no banco de dados e do tipo de aplicação.

#### O. Teste do Erro Médio Absoluto (MAE)

O teste do erro médio absoluto é uma medição que avalia a magnitude do erro entre dois conjuntos de dados. Esse procedimento calcula o grau de dispersão absoluto entre duas variáveis relacionadas e a média entre essas divergências, conforme (42).

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - x_i| \quad (42)$$

Sendo  $y_i$  o valor real e  $x_i$  o valor calculado do elemento  $i$  e  $N$  é o número total de dados. Como a análise foi realizada de acordo com a função densidade de probabilidade, então:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |f_{medido_i} - f_{calculado_i}| \quad (43)$$

Os valores obtidos por esse processo são sempre positivos e eles não possuem tanta influência por dados discrepantes como o  $RMSE$  [18].

#### P. Teste do Qui-quadrado ( $\chi^2$ )

O Teste do Qui-quadrado ( $\chi^2$ ) é utilizado para analisar a discrepância, para certo parâmetro, entre dados de frequência observados e teóricos ou obtidos experimentalmente e, assim, averiguar a eficiência do método considerado [14].

Esse teste é apresentado por (44).

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(y_i - x_i)^2}{N} \tag{44}$$

Tal que  $y_i$  é o dado esperado e  $x_i$  é o dado obtido pela distribuição de Weibull no instante  $i$  e  $N$  é o número total de dados existentes. Como a análise será realizada de acordo com a função densidade de probabilidade, então:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(f_{medido_i} - f_{calculado_i})^2}{N} \tag{45}$$

Quando  $\chi^2 = 0$ , é representado que a distribuição de Weibull com os parâmetros calculados reproduz fielmente os dados experimentais de velocidade de vento. Quanto maior o valor de  $\chi^2$ , maior será a divergência entre os dados.

*Q. Teste de Erro de Densidade de Potência (EDP)*

A fim de avaliar a viabilidade de instalação de energia eólica em um determinado local, é necessário conhecer as características do vento da região e, assim, avaliar o potencial energético que ele pode gerar. Para isso, pode-se calcular a densidade de potência média do vento, dada por  $\frac{\bar{P}}{A}$ , que representa uma medida quantitativa da energia disponível por unidade de área [7], sendo dada por:

$$\frac{\bar{P}}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 \tag{46}$$

Na qual  $P$  representa a potência em  $W$ ,  $\rho$  a densidade do ar em  $kg/m^3$ ,  $A$  a área do disco varrido pelo rotor, dada em  $m^2$ , e  $v$  a velocidade do vento em certo instante, medida em  $m/s$ . Como a densidade do vento é constante, a densidade de potência média é calculada por:

$$\frac{\bar{P}}{A} = \frac{1}{2} \rho \bar{v}^3 \tag{47}$$

Onde  $\bar{v}^3$  é a média dos cubos das velocidades do vento, calculada pela Equação 48 se houver os dados de velocidade ou pela Equação 49 se houver o valor do  $k$  e do  $c$  [7]:

$$\bar{v}^3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^3 \tag{48}$$

$$\bar{v}^3 = c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \tag{49}$$

Assim, para avaliar a discrepância entre a densidade de potência obtida pelos dados de velocidade reais e pelo conjunto de parâmetros calculados, aplica-se um erro relativo percentual, cujo resultado será denominado *EDP*, tal que:

$$EDP = \frac{\frac{\bar{P}_{medido}}{A_{medido}} - \frac{\bar{P}_{calculado}}{A_{calculado}}}{\frac{\bar{P}_{medido}}{A_{medido}}} \tag{50}$$

$$EDP = \frac{\bar{v}^3_{medido} - \bar{v}^3_{calculado}}{\bar{v}^3_{medido}} \tag{51}$$

Sendo  $\bar{v}^3_{medido}$  calculado por (48) e  $\bar{v}^3_{calculado}$  calculado por (49). Dessa forma, quanto menor o *EDP* obtido, mais próxima a densidade de potência calculada será da real.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para realizar o tratamento dos dados de vento, as aplicações dos métodos determinísticos, do heurístico e dos testes estatísticos, foram desenvolvidos algoritmos na linguagem de programação R.

Os dados de velocidade do vento utilizados nesse projeto foram obtidos a partir da plataforma do Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA)

operada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) [6], que possui estações solarimétricas e anemométricas em várias cidades do Brasil e disponibiliza os dados online e em livre acesso.

*A. Resultados dos Métodos Determinístico*

Depois da execução dos algoritmos dos métodos determinísticos escolhidos, os valores dos parâmetros obtidos foram apresentados na Tabela I, sendo arredondados para cinco casas decimais.

TABELA I  
PARÂMETROS DA CURVA DE WEIBULL OBTIDOS PELOS MÉTODOS DETERMINÍSTICOS

Método	k	c [m/s]
ME	2,99974	5,46809
MEP	2,87776	5,47771
MMQ	2,09553	4,79347
MM	2,99789	5,46824
MMV	2,95974	5,45450
MMS	2,93396	5,45669

As curvas de Weibull criadas a partir de cada conjunto foram expostas na Fig. 2, juntamente com o histograma de velocidades reais com base na frequência relativa dos intervalos de velocidade.

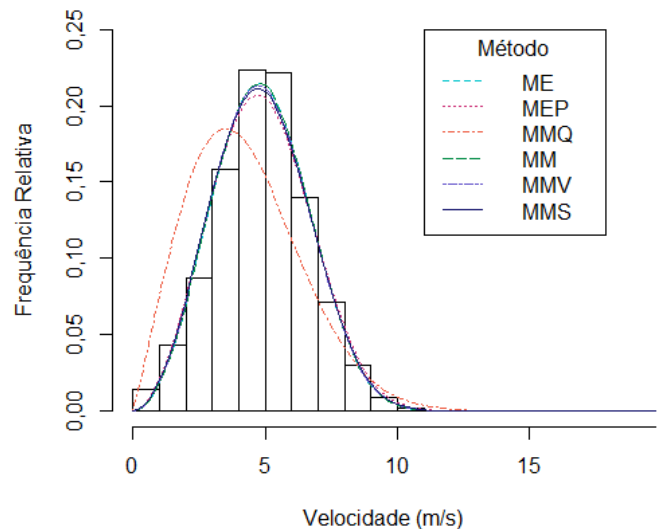


Figura 2. Curvas de Weibull obtidas pelos métodos determinísticos.

A partir dos dados apresentados na Tabela I e da Fig. 2, pode-se perceber que a maioria dos métodos, com exceção do Método Gráfico, resultou em um conjunto de parâmetros que representa bem o formato do histograma.

O Método Gráfico apresentou um resultado discrepante dos demais e da aparência do histograma, com um valor médio menor e uma dispersão maior dos dados. Desse modo, pode-se concluir que o MMQ, da forma como foi parametrizado, não representa satisfatoriamente o regime de ventos da cidade de Petrolina, sendo desaconselhado para uso nessa região. Já os

demais métodos se mostraram adequados para a caracterização dos recursos eólicos.

### B. Resultados da Busca Cuco

A partir do algoritmo utilizado para a Busca Cuco, o resultado do conjunto de parâmetros pode ser observado na Tabela II, sendo os valores arredondados para cinco casas decimais.

TABELA II  
PARÂMETROS OBTIDOS PELA BUSCA CUCO COM 1000  
ITERAÇÕES

Método	$k$	$c$ [m/s]
CS	3,22243	5,49462

A curva de Weibull, construída a partir do  $k$  e  $c$  atingidos por esse procedimento sobre o histograma de dados reais de velocidades, pode ser vista na Fig. 3 de acordo com a frequência relativa de ocorrência de cada intervalo.

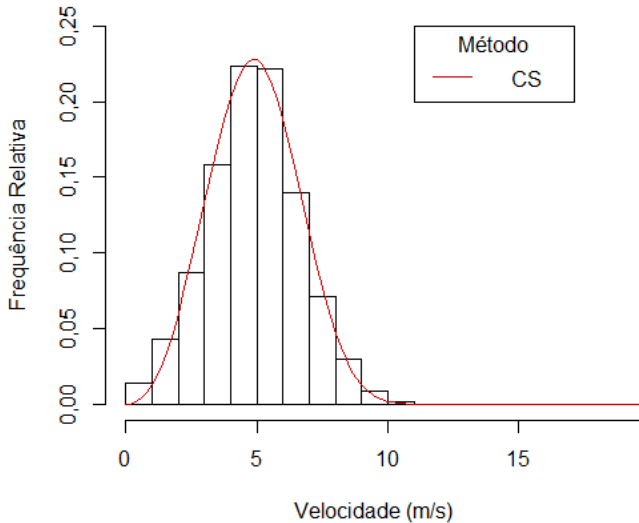


Figura 3. Curva de Weibull obtida pela Busca Cuco com 1000 iterações.

A partir dos dados expostos na Tabela II e na Fig. 3, pode-se constatar, visualmente, que o formato da curva representa de modo adequado a aparência do histograma, salientando que a Busca Cuco, com a função objetivo utilizada, pode ser empregada para caracterizar o vento da cidade de Petrolina. A curva obteve um valor médio de, aproximadamente, 5 m/s, medida similar ao do histograma e próxima do resultado alcançado do parâmetro  $c$ .

O tempo de processamento desse método, para uma aplicação, foi de 15,73s, consideravelmente maior que o dos métodos determinísticos, cujos períodos permaneceram entre 0,01 e 6,50s, mas ainda assim é relativamente curto e aplicável. Notou-se a partir da execução do processo que, utilizando 1000 iterações, os resultados obtidos eram iguais até a sétima casa decimal para todas as 10 repetições do método. Como apresentaram diferenças muito pequenas entre eles, os valores podem ser considerados aproximadamente iguais.

Utilizando 100 iterações, após 10 repetições, o resultado do conjunto de  $c$  e  $k$  calculado é mostrado na Tabela III.

TABELA III  
PARÂMETROS OBTIDOS PELA BUSCA CUCO COM 100 ITERAÇÕES

Repetição	$k$	$c$ [m/s]
1	3,22245	5,49454
2	3,22251	5,49456
3	3,22225	5,49471
4	3,22233	5,49463
5	3,22256	5,49455
6	3,22250	5,49465
7	3,22225	5,49461
8	3,22249	5,49463
9	3,22248	5,49463
10	3,22211	5,49467
<b>Média</b>	<b>3,22239</b>	<b>5,49462</b>

A curva obtida pela média dos parâmetros é apresentada pela Fig. 4. Como as soluções foram bem parecidas para 1000 e 100 iterações, de acordo com o período de execução do método, é mais interessante utilizar um menor número de iterações, devido ao menor tempo de processamento.

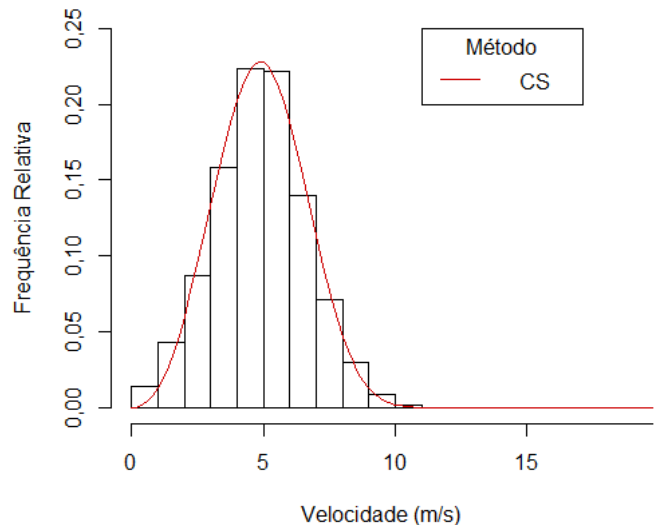


Figura 4. Curva de Weibull obtida pela Busca Cuco com 100 iterações.

### C. Resultados dos testes Estatístico e do Erro de Densidade de Potência

Como mostrado nas Tabelas I e III e nas Fig. 2 e 4, os resultados dos métodos, com exceção do Método Gráfico, foram bastante similares. Portanto, é necessário realizar testes estatísticos para compará-los efetivamente. Além disso, é importante avaliar o potencial energético consequente do conjunto de parâmetros para constatar se essa variável também está sendo bem representada.

Os erros obtidos em cada procedimento dos testes estatísticos  $RMSE$ ,  $R^2$  e  $MAE$  e no Erro de Densidade de Potência ( $EDP$ ) estão expostos na Tabela IV.

TABELA IV  
RESULTADOS DOS TESTES ESTATÍSTICOS E DO EDP

Método	$k$	$c$ [ $m/s$ ]	$RMSE$	$R^2$	$MAE$	$EDP$ [%]
ME	2,999	5,468	0,0080	0,9883	0,0047	-0,1851
MEP	2,877	5,477	0,0102	0,9812	0,0058	-2,5948
MMQ	2,095	4,793	0,0365	0,7617	0,0217	14,3972
MM	2,997	5,468	0,0081	0,9882	0,0047	-0,2195
MMV	2,959	5,454	0,0088	0,9861	0,0048	-0,0155
MMS	2,933	5,456	0,0092	0,9847	0,0050	-0,5244
CS	3,222	5,494	0,0060	0,9934	0,0039	1,1223

Com relação aos testes estatísticos, com exceção do Método Gráfico, todos os métodos obtiveram resultados desejáveis, pois os valores do  $RMSE$  e do  $MAE$  foram próximos de 0 e os do  $R^2$  foram perto de 1. A Busca Cuco apresentou um  $RMSE$  de 0,006052,  $R^2$  de 0,99348 e  $MAE$  de 0,003979, soluções consideravelmente mais próximas das almejadas em comparação com os outros métodos. Portanto, a respeito dos erros testados, o procedimento mais interessante é o CS, seguido pelo ME, MM, MMV, MMS, MEP e, por último, o MMQ.

Os dados reais apresentaram uma densidade de potência de aproximadamente  $105,5 W/m^2$  para a região estudada. De acordo com o Erro de Densidade de Potência, o Método Gráfico também apresentou resultados indesejáveis, com um valor energético aproximadamente 14% maior que o real. O MMV foi o método que apresentou o melhor ajuste energético, sendo aproximadamente 0,016% menor que o real. Assim, para essa análise, o melhor método é o MMV, seguido do ME, MM, MMS, CS, MEP e, por último, o MMQ.

Mesmo que a Busca Cuco seja um dos piores métodos para o cálculo do  $EDP$  com a função objetivo utilizada, em comparação com os métodos determinísticos estudados, o erro ainda é pequeno, sendo aproximadamente 1,12% maior que o real, uma diferença de mais ou menos  $1,18 W$ . Dessa forma, como apresentou os melhores resultados para os testes estatísticos e uma diferença pequena para o  $EDP$ , a Busca Cuco é o procedimento mais recomendado para a região de Petrolina.

#### IV. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi construído um histograma de frequência de ocorrência de velocidades do vento para a cidade de Petrolina – PE. Os dados reais utilizados foram obtidos da plataforma SONDA e separados em intervalos de 1 em 1 m/s. A velocidade média e o desvio padrão calculados foram de  $4,95 m/s$  e  $1,77 m/s$  respectivamente. O histograma pode ser bem representado por uma distribuição de Weibull, pois possui a maior parte dos dados perto do valor médio.

Foram implementados os algoritmos de seis métodos determinísticos largamente empregados na literatura, sendo eles o ME, MEP, MMQ, MM, MMV e MMS. Os conjuntos de parâmetros encontrados por meio de cada método citado foram expressos na Tabela I. A partir dos gráficos obtidos, constatou-se que o MMQ não retrata de forma satisfatória o histograma de velocidades reais, estando sua curva muito

distante das demais. Os outros métodos apresentaram curvas equivalentes entre si, além de conjuntos de parâmetros com valores próximos.

A partir da aplicação do algoritmo da Busca Cuco, atingiu-se um fator de forma ( $k$ ) de 3,222 e um fator de escala ( $c$ ) de 5,494 m/s, valores adequados com o esperado, pois o valor de  $c$  está próximo do valor médio do histograma e o valor de  $k$  abrange bem a dispersão das frequências. Notou-se que o CS obtém valores ótimos rapidamente, sendo aceitável utilizar uma quantidade de 100 iterações, que mostrou discordâncias entre os resultados apenas na quarta casa decimal. O gráfico da curva de Weibull, gerada por esses parâmetros, também não foi muito distante visualmente do histograma de velocidades reais.

Com base na solução dos testes estatísticos, a Busca Cuco apresentou um  $RMSE$  de 0,0060,  $R^2$  de 0,9934 e  $MAE$  de 0,0039, valores aprovados para essas análises. Conforme esses testes, todos os métodos, com exceção do MMQ, podem ser utilizados para caracterizar o vento de Petrolina, sendo o melhor o CS.

De acordo com o  $EDP$ , o CS apresentou um erro de aproximadamente 1,12% acima do valor real, que é um resultado pequeno e plausível para a medida de energia. Para projetos eólicos, nos quais se deseja um melhor ajuste energético dos dados de velocidade de vento, a utilização do MMV é sugerida, por oferecer uma medição de energia mais semelhante a real.

#### AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi apoiada conjuntamente pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Educação Superior (CAPES) e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), agências governamentais brasileiras.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Andrews, L. C. Special Functions of Mathematics for Engineers. 2.ed. Nova Iorque: Mcgraw-Hill, pp. 1992. 479.
- [2] Blum, C.; Roli, A. Metaheuristics in combinatorial optimization. ACM Computing Surveys, v. 35, n. 3, pp. 268-308. 2003
- [3] Bueno, F. Métodos Heurísticos: Teoria e Implementações. f. 42 Tutorial - Instituto Federal Santa Catarina, Araranguá. 2009
- [4] Burton, T.; Jenkins, N.; Sharpe, D.; Bossanyi, E. Wind Energy Handbook. Chichester: John Wiley & Sons. 742 p. 2011
- [5] Chang, T. P. Performance comparison of six numerical methods in estimating Weibull parameters for wind energy application. Applied Energy, v. 88, n. 1, pp. 272-282. 2011
- [6] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Sistema Nacional de Organização de Dados Ambientais (SONDA). 2017. Disponível em: <<http://sonda.ccast.inpe.br/index.html>>. Acesso em 16 jan. 2018.
- [7] Jamil, M.; Parsa, S.; Majidi, M. Wind power statistics and an evaluation of wind energy density. Renewable Energy, v. 6, n. 5-6, pp. 623-628. 1995
- [8] Justus, C. G.; Hargraves, W. R.; Mikhail, A.; Graber, D. Methods for Estimating Wind Speed Frequency Distributions. Journal of Applied Meteorology, v. 17, n. 3, pp. 350-353. 1978
- [9] Justus C. G.; Mikhail A. Height variation of wind speed and wind distribution statistics. Geophysical Research Letters, v. 3, n. 5, pp. 261-264. 1976

- [10] Maia N. H. F. Análise Comparativa da Eficiência de Sete Métodos Numéricos para Determinação dos Parâmetros da Curva de Weibull Utilizando Dados de Velocidade de Vento e de Potência Eólica. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2012
- [11] Manwell, J. F.; McGowan, J. G.; Rogers, A. L. Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. Chichester: John Wiley & Sons, 577 p. 2002
- [12] Scheaffer, R. L.; Mulekar, M. S.; Mcclave, J. T. Probability and Statistics for Engineers. 5. ed. Boston: Brooks/Cole. 2011
- [13] Seguro, J. V.; Lambert, T. W. Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v. 85, n. 1, pp. 75-84. 2000.
- [14] Spiegel, M. R. Estatística. 3.ed. São Paulo: Pearson, 2006
- [15] Stevens, M. J.; Smulders, P. T. The estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy utilization purposes. Wind Engineering, v. 3, n. 2, pp. 132-145. 1979
- [16] Souza J. S.; Molina Y. P.; Araújo C. S.; Farias W. P.; Araújo I. S. Modified Particle Swarm Optimization Algorithm for Sizing Photovoltaic System. IEEE Latin America Transactions, vol. 15, pp. 283-289, Fevereiro. 2017
- [17] Walpole, R. E.; Myers, R. H.; Myers, S. L.; Ye, K. Probability & Statistics for Engineers & Scientists. 9.ed. Boston: Prentice Hall. 2012
- [18] Willmott, C. J.; Matsuura, K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. Climate Research, v. 30, pp. 79-82. 2005
- [19] Yang, X. Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms. 2.ed. Cambridge: Luniver Press. 2010
- [20] Yang, X.; Deb, S. Cuckoo Search via Lévy flights. World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing, pp. 1-7. 2009
- [21] Yi, G. Y. Statistical Analysis with Measurement Error or Misclassification: Strategy, Method and Application. Nova Iorque: Springer, 2017.



**Carla Freitas de Andrade** possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Ceará (2000), mestrado em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) pela Universidade Federal do Ceará (2003) e doutorado em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) pela Universidade Federal do Ceará (2006). Atualmente é professora da Universidade Federal do Ceará. Tem experiência na área de Modelagem Matemática, Engenharia Mecânica, Aproveitamento da Energia, Mecânica dos Fluidos, Energia Eólica e Aerodinâmica



**Fernanda Rocha Veiga** é estudante de graduação em Engenharia de Energias Renováveis pela Universidade Federal do Ceará, Foi participante do Programa ciência sem fronteiras na Columbia University no curso de Engenharia Mecânica (2014). Foi bolsista de iniciação científica pelo programa Jovens Talentos (2013) e de iniciação a docência em Aerodinâmica e Energia Eólica (2016). Possui experiência em análise de dados anemométricos e solarimétricos, dimensionamento fotovoltaico e projeto de parques eólicos.

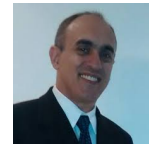


**Marcus Vinícius Silveira Macedo** possui graduação em Engenharia Mecânica (2009) pela Universidade Federal do Ceará, Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho (2012) pela Faculdade Dr. Leão Sampaio e MBA em Gestão de Projetos (2014) pela Fundação Getúlio Vargas. Possui

experiência em planejamento e montagem de turbinas eólicas e tem interesse nos temas de energias renováveis.



**Lindenberg Ferreira dos Santos** possui graduação em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal Rural do Semi-Árido (2011) e graduação em Engenharia Mecânica pela mesma instituição (2013). Atualmente discente do programa de pós-graduação em engenharia mecânica da Universidade Federal do Ceará.



**Paulo Alexandre Costa Rocha** possui graduação (Magna Cum Laude) em Engenharia Química pela Universidade Federal do Ceará (1995), mestrado em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) pela Universidade Federal do Ceará (1999) e doutorado em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) pela Universidade Federal do Ceará (2006). Atualmente é professor da Universidade Federal do Ceará e efetivo. Tem experiência na área de Mecânica dos Fluidos (Modelagem de Escoamentos em Engenharia) e Energia Solar Térmica (Sistemas de Aproveitamento de Energia Solar e Heliotérmicas), com ênfase em Sistemas para Energias Renováveis.



**Kevin Santos Guedes** possui graduação em Engenharia Mecânica (2017) pela Universidade Federal do Ceará. Faz parte do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica na Universidade Federal do Ceará (2018). Tem interesse na área de energia renovável, principalmente na fonte eólica.