

CADERNOS DO IME – Série Estatística

Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ
ISSN on-line 2317-4535 / ISSN impresso 1413-9022 - v. v.50, p.55-74, 2021
DOI: 10.12957/cadest.2021.64439

GERAÇÃO DE CENÁRIOS SINTÉTICOS DE PRODUÇÃO EÓLICA DE CURTO PRAZO A PARTIR DE UM ENSEMBLE DE PREVISÕES HORÁRIAS OU SEMI- HORÁRIAS DE VELOCIDADE DOS VENTOS

José Francisco Moreira Pessanha
Universidade do Estado do Rio de Janeiro e Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
pessanha@ime.uerj.br

Albert Cordeiro Geber Melo
Universidade do Estado do Rio de Janeiro
albert.melo@ime.uerj.br

Maria Elvira Piñeiro Maceira
Universidade do Estado do Rio de Janeiro
melvira@ime.uerj.br

Victor Andrade de Almeida
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
andrade@cepel.br

Resumo

Propõe-se uma metodologia para geração de cenários sintéticos de velocidade do vento e de produção eólica obtidos a partir das previsões horárias ou semi-horárias de velocidade do vento, e.g., disponibilizadas no sistema Sintegra do Operador Nacional do Sistema Elétrico. Assume-se que em cada hora do horizonte de estudo as previsões de velocidade do vento sejam realizações de uma distribuição de Weibull. A geração dos cenários de velocidade de vento é realizada por meio de simulações das distribuições de Weibull em cada hora do horizonte, ajustadas por modelos aditivos generalizados para localização, escala e forma (GAMLSS), mas preservando as autocorrelações horárias por meio da transformação de Nataf. Por fim, curvas de potência transformam os cenários de velocidade do vento em cenários de produção eólica. Aplicada a dois parques eólicos do sistema elétrico brasileiro, a metodologia proposta mostrou-se efetiva e promissora para ser empregada nos demais parques.

Palavras-chave: Distribuição de Weibull; Energia Eólica; GAMLSS; Geração de Cenários; Transformação de Nataf; Planejamento e Programação da Operação.

1. Introdução

Em fevereiro de 2021 a capacidade instalada em geração eólica no Sistema Interligado Nacional (SIN) alcançou 18.000 MW, distribuídos em 695 parques eólicos. Em termos relativos, a geração eólica corresponde hoje a cerca de 10% da capacidade instalada no SIN, e há a perspectiva de maior participação desta fonte na matriz elétrica brasileira: de acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia 2020-2029 (MME; EPE, 2020), estima-se que em 2029 a capacidade instalada da fonte eólica aumente mais de 2,5 vezes, atingindo cerca de 39.500 MW. A participação cada vez mais elevada da produção eólica no SIN aponta para a necessidade do desenvolvimento de técnicas que levem em conta as incertezas decorrentes da variabilidade e intermitência dessas fontes renováveis.

Para o desenvolvimento e a avaliação de novos modelos que considerem as incertezas das fontes renováveis intermitentes, requerem-se dados pareados de velocidade de vento e produção eólica. Entretanto, devido à indisponibilidade no Brasil de uma base pública de dados verificados (medidos), foi proposto em (MACEIRA *et al.*, 2018, 2020; ANDRADRE *et al.*, 2021) um procedimento que utiliza os valores previstos de velocidade de vento e da respectiva produção eólica, em base semi-horária, disponibilizados desde 2018 pelo Sintegre ONS, em conjunto com dados de reanálises (e.g., MERRA 2).

A partir de meados de 2018, com o advento do Sintegre (ONS, 2018), o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) passou a disponibilizar diariamente previsões de velocidade do vento e de produção eólica até 10 dias à frente, agregadas por pontos de conexão (subestações) e com resolução temporal semi-horária. As previsões são acompanhadas de funções matemáticas (curvas de potência) usadas na conversão da velocidade do vento (m/s) em produção eólica (MW).

Vale destacar que as previsões eólicas disponibilizadas pelo ONS têm sido recentemente utilizadas para a representação dos aproveitamentos eólicos nos modelos que suportam as decisões operativas, como é o caso da programação diária da operação, realizada pelo Modelo de Despacho Hidrotérmico de Curto Prazo - DESSEM (SANTOS *et al.*, 2020).

Uma alternativa para contornar a dificuldade na obtenção de dados verificados e pareados, é lançar mão, de previsões de velocidade de vento, acompanhados das

respectivas previsões de produção eólica, que recentemente (meados de 2018) passaram a ser disponibilizados diariamente pelo sistema Sintegre do ONS, até 168 horas à frente e em base semi-horária.

Apesar de não conter dados históricos, o Sintegre se configura como uma das principais fontes de dados públicos da geração eólica no SIN, pois é a única com dados pareados de velocidade do vento e produção. Assim, se convenientemente explorados em abordagens específicas, os dados do Sintegre se constituem em insumos valiosos no processo de representação das incertezas dos aproveitamentos eólicos ao longo de toda a cadeia de modelos de planejamento da operação e da expansão do SIN, como mais recentemente aconteceu com relação ao Modelo de Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos de Médio e Longo Prazos - NEWAVE (MACEIRA *et al.*, 2018, 2020; ANDRADRE *et al.*, 2021).

As previsões pontuais de velocidade do vento e produção eólica disponibilizadas no Sintegre resultam da combinação de previsões de velocidade do vento oriundas de 5 modelos atmosféricos distintos: BAM (FIGUEROA *et al.*, 2016), Eta (LAZIC *et al.*, 2010), ECMWF1, ECMWF2 (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) (ALESSANDRINI *et al.*, 2012) e GFS (*United States National Weather Service*) (OLIVEIRA FILHO *et al.*, 2021); trata-se, portanto, de um *ensemble* de previsões. A existência de um *ensemble* de previsões até 10 dias à frente aponta para a possibilidade da geração de cenários de produção eólica no curtíssimo prazo, i.e., para janelas temporais de 24 horas até 168 horas, bastante úteis na representação da incerteza da geração eólica (BOTTERUD *et al.*, 2010).

Até o presente, a adoção de critérios probabilísticos em diversas atividades do planejamento e operação de sistemas hidrotérmicos criou a necessidade da modelagem probabilística de afluições a locais de aproveitamentos hidroelétricos. Com a maior e crescente penetração da geração eólica na matriz elétrica brasileira passa a ser necessário também modelar de forma probabilística as velocidades dos ventos, base da geração eólica, através da geração de cenários sintéticos. Por exemplo, em sistemas com grande participação de fontes eólicas a reserva operativa deve ser dimensionada de maneira a cobrir as incertezas nas previsões de carga e de produção de energia eólica.

O presente trabalho tem por objetivo apresentar uma metodologia para a geração de cenários sintéticos de curtíssimo prazo para a produção eólica, a partir das previsões

horárias ou semi-horárias, e.g., oriundas dos modelos BAM, Eta, ECMWF1, ECMWF2 e GFS, disponibilizadas diariamente no Sintegre, e das reanálises das médias horárias da velocidade do vento, oriundas do MERRA 2 (STAFFELL; PFENNINGER, 2016).

Na metodologia proposta assume-se que em cada intervalo horário t as previsões de velocidade do vento do *ensemble* sejam realizações de uma distribuição de Weibull(λ_t, k_t) (WEIBULL, 1951; SANSIGOLO, 2005; MELO *et al.*, 2020; DING, 2020), cujos parâmetros são estimados por meio de modelos aditivos generalizados para localização, escala e forma ou *Generalized Additive Model for Location, Scale and Shape* (GAMLSS) (STASINOPOULOS; RIGBY, 2007), ajustados aos valores previstos de velocidade do vento. Uma vantagem da classe de modelos GAMLSS é que a distribuição de probabilidades da variável resposta não se restringe à família de distribuições exponenciais (e.g., distribuição Normal, Binomial, Poisson e Gama), mas inclui distribuições discretas e contínuas com forte assimetria, como por exemplo a distribuição de Weibull.

A geração dos cenários de velocidade do vento é realizada por meio de simulações estocásticas das distribuições de Weibull(λ_t, k_t), ajustadas para cada intervalo horário t do horizonte de previsão, de tal forma que os valores simulados preservem as autocorrelações temporais, calculadas com base nas reanálises disponibilizadas no MERRA 2. Para alcançar este resultado a metodologia proposta emprega a transformação de Nataf (DER KIUAREGHIAN; LIU, 1986; PESSANHA *et al.*, 2018; 2019), que tem sido empregada com sucesso na modelagem da estrutura de autocorrelação espacial da velocidade de vento (PESSANHA *et al.*, 2018; 2019). Na última etapa, os cenários de velocidade do vento são transformados em cenários de produção eólica por meio de curvas de potência, cujos parâmetros também são disponibilizados no Sintegre.

Para ilustrar a aplicação da metodologia proposta apresentam-se 2.000 cenários sintéticos de velocidade do vento e produção eólica gerados pela metodologia proposta, para até 3 dias à frente e com resolução horária, para dois parques eólicos equivalentes (PEEs), representados no Sintegre por pontos de conexão que agregam aproveitamentos eólicos nas regiões Nordeste e Sul do Brasil. Vale destacar que cenários semi-horários podem ser obtidos por meio da interpolação dos cenários horários (DUBINSKY; ELPERIN, 1997).

O trabalho está organizado em quatro seções. A seguir, na Seção 2 apresenta-se a descrição da metodologia proposta, acompanhada de uma breve introdução aos modelos GAMLSS e à Transformação de Nataf - principais técnicas consideradas na metodologia para geração de cenários horários da velocidade do vento. Na sequência, na Seção 3, apresentam-se e discutem-se os cenários de velocidade do vento e de geração eólica para dois PEEs. Por fim, as principais conclusões são apresentadas na Seção 4.

2. Metodologia Proposta

A metodologia proposta pode ser organizada em duas etapas principais: 1) geração de cenários de velocidade do vento; e 2) geração de cenários de produção eólica.

O modelo probabilístico mais largamente utilizado para modelar a velocidade do vento é a distribuição de Weibull (SANSIGOLO, 2005; DING, 2020). Em consonância, na primeira etapa da metodologia proposta, admite-se que a velocidade do vento em cada hora t seja uma variável distribuída segundo o modelo probabilístico de Weibull. Tal premissa apontou para a possibilidade de utilização de modelos GAMLSS na estimação dos parâmetros que definem uma distribuição de Weibull para cada hora t e da transformação de Nataf na simulação de cenários de velocidade do vento compatíveis com uma dada estrutura de autocorrelações. Assim, a apresentação da metodologia proposta é precedida por uma breve introdução sobre distribuição de Weibull, modelos GAMLSS e transformação de Nataf. A conversão dos cenários de velocidade do vento (m/s) em produção eólica (MW) é realizada na segunda etapa, por meio de funções matemáticas que modelam uma curva de potência, cujos parâmetros são disponibilizados no Síntese.

2.1 Distribuição de Weibull

A função densidade de probabilidade da velocidade do vento w pode ser descrita pelo modelo de Weibull, cuja função densidade de probabilidade depende de dois parâmetros (λ e k), conforme a seguir:

$$f(w) = \left(\frac{k}{\lambda}\right) \left(\frac{w}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{w}{\lambda}\right)^k} \quad (1)$$

em que λ é o fator de escala (m/s), relacionado ao valor esperado da velocidade do vento $E(w) = \lambda\Gamma(1 + 1/k)$, k é o fator de forma (adimensional), relacionado com a variância

da velocidade do vento $V(w) = \lambda^2 \left[\Gamma(1 + 2/k) - (\Gamma(1 + 1/k))^2 \right]$, e $\Gamma(\cdot)$ é a função gama. Vale destacar que um valor de k próximo de 1 indica um regime de vento altamente variável, enquanto $k > 3$ indica um regime estável.

Os parâmetros λ e k podem ser estimados a partir das medições da velocidade do vento por meio dos métodos de máxima verossimilhança e dos momentos (MELO *et al.*, 2020).

2.2 Modelos Aditivos Generalizados para Localização, Escala e Forma - GAMLSS

Introduzidos por Stasinopoulos e Rigby em 2007, os modelos GAMLSS são modelos de regressão semi-paramétricos, i.e., não modelam apenas a média (localização), mas modelam os parâmetros da distribuição de probabilidade da variável resposta como funções suaves (e.g. *splines* cúbicas) de variáveis explicativas. Nesta classe de modelos, a distribuição de probabilidades da variável resposta w não se restringe à família de distribuições exponenciais (e.g., distribuição Normal, Binomial, Poisson e Gama), mas inclui distribuições discretas e contínuas com forte assimetria, como por exemplo a distribuição de Weibull.

Da mesma forma que nos modelos aditivos e GAM (*Generalized Additive Model*), a especificação de um modelo GAMLSS envolve o uso de funções suaves das variáveis explicativas, sendo que tais funções suaves são *splines*, em geral *splines* cúbicas. As funções suaves visam capturar a relação não linear da variável resposta com as variáveis independentes e conferem aos modelos aditivos a sua natureza semi-paramétrica.

Conforme indicado na equação (1), a função densidade de probabilidade de Weibull da variável aleatória w tem dois parâmetros: o parâmetro de forma (k) e o parâmetro de escala (λ). Neste caso, considerando uma amostra aleatória de tamanho n com observações independentes $\{w_1, \dots, w_n\}$ para a variável resposta (e.g., velocidade do vento), acompanhadas dos respectivos vetores $\{x_1, \dots, x_n\}$ de variáveis explicativas (e.g., hora do dia), a proposta dos modelos GAMLSS consiste em expressar os parâmetros de escala (k) e forma (λ) como funções suaves das variáveis explicativas, por exemplo:

$$g(k_i) = \beta_{o,k} + \sum_{j=1}^{J_k} h_{j,k}(x_i) \quad \forall i = 1, n \quad (2)$$

$$g(\lambda_i) = \beta_{o,\lambda} + \sum_{j=1}^{J_\lambda} h_{j,\lambda}(x_i) \quad \forall i = 1, n \quad (3)$$

em que β denota os coeficientes a serem estimados, $h_{j,k}(x)$ e $h_{j,\lambda}(x)$ representam funções suaves (e.g. *splines* cúbicas), J_k e J_λ são hiperparâmetros que controlam o grau de

suavização do ajuste e $g()$ é a função de ligação (*link function*), sendo a função logaritmo natural no caso da distribuição de Weibull.

O ajuste do modelo é realizado pelo método da máxima verossimilhança penalizada, conforme descrito por Stasinopoulos e Rigby (2017).

2.3 Transformação de Nataf

Seja $W = (w_1, \dots, w_p)$ um vetor aleatório com densidades marginais $f_{wt}(w_t) \forall t=1, p$ e matriz de correlações R conhecida, porém com densidade de probabilidade conjunta não conhecida. Por exemplo, o vetor aleatório W corresponde ao vetor de velocidades do vento em p intervalos horários, em que cada velocidade é modelada por uma densidade Weibull(λ_t, k_t) $\forall t=1, p$. A seguir, a transformação de variáveis aleatórias em (4) relaciona as variáveis do vetor aleatório W com variáveis aleatórias normalmente distribuídas $m_t \forall t=1, p$:

$$m_t = \Phi^{-1}[F_{wt}(w_t)] \forall t = 1, p \quad (4)$$

Em (4), $F_{wt}(w_t) \forall t=1, p$ é a densidade de probabilidade Weibull acumulada e Φ é a densidade acumulada da distribuição normal padrão. A densidade de probabilidade conjunta do vetor aleatório $M=(m_1, \dots, m_p)$, é normal multivariada com matriz de correlações R^* , cujos elementos r_{ij}^* (correlação entre m_i e m_j) são funções dos elementos r_{ij} (correlação entre w_i e w_j) da matriz de correlação R . Os coeficientes r_{ij}^* e r_{ij} guardam a relação indicada em (5) quando as densidades marginais das variáveis em W seguem o modelo de Weibull, em que μ_i e σ_i denotam, respectivamente, a média e o desvio padrão da variável aleatória w_i (DER KIUREGHIAN; LIU, 1986).

$$r_{ij}^* = r_{ij} \begin{cases} 1,063 - 0,004r_{ij} - 0,2 \left(\frac{\sigma_i}{\mu_i} + \frac{\sigma_j}{\mu_j} \right) - 0,001r_{ij}^2 + 0,337 \left[\left(\frac{\sigma_i}{\mu_i} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_j}{\mu_j} \right)^2 \right] + \\ 0,007 \left[r_{ij} \left(\frac{\sigma_i}{\mu_i} + \frac{\sigma_j}{\mu_j} \right) - \frac{\sigma_i \sigma_j}{\mu_i \mu_j} \right] \end{cases} \quad (5)$$

Dado que o vetor aleatório M tem distribuição normal multivariada, amostras do vetor aleatório M podem ser obtidas por meio de simulações de um vetor aleatório Z , formado por p variáveis aleatórias normais $N(0,1)$ independentes:

$$M = LZ \quad (6)$$

onde a matriz L é obtida pela decomposição de Cholesky ou decomposição em valores singulares (*Singular Values Decomposition* - SVD) da matriz de correlações R^* , i.e.,

$$R^* = LL^T \quad (7)$$

Por fim, os vetores M amostrados passam pela transformação inversa em (8) para que sejam produzidas amostras das distribuições de Weibull(λ_t, k_t) $\forall t=1, p$ correlacionadas de acordo a matriz de correlações R :

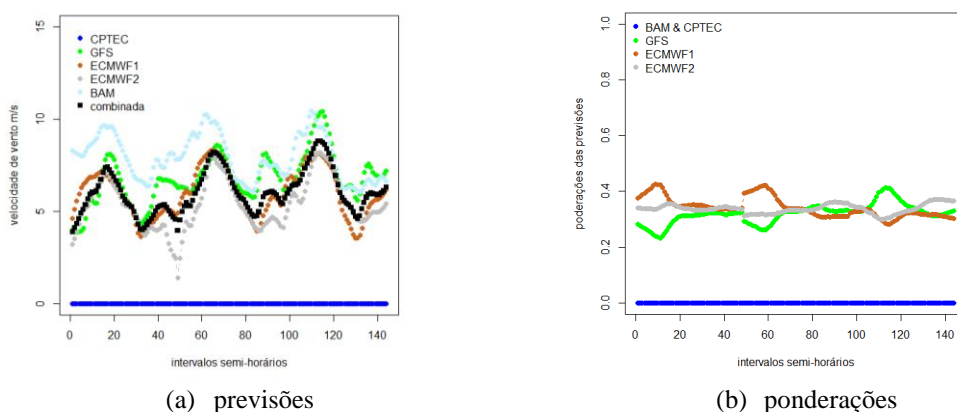
$$w_t = F_{w_t}^{-1}[\Phi(m_t)] \forall t = 1, p \quad (8)$$

2.4 Metodologia para Geração de Cenários de Velocidade do Vento

Apesar de não haver restrição potencial do seu emprego nos diversos horizontes de curto prazo, optou-se, à guisa de facilidade de explanação, adotar aqui o horizonte de até 72 horas (3 dias à frente) para geração de cenários sintéticos.

Diariamente o ONS disponibiliza previsões semi-horárias de velocidade do vento e de geração eólica para diferentes localidades do SIN. As previsões são publicadas no portal do Sintegre e incluem previsões de velocidade do vento fornecidas por até cinco modelos de previsão numérica: BAM, Eta, ECMWF1, ECMWF2 e GFS. Por exemplo, na Figura 1(a) apresentam-se as previsões semi-horárias de velocidade do vento para um período de até três dias à frente, oriundas dos cinco modelos supracitados. Ainda na Figura 1(a) apresenta-se a média ponderada das previsões (previsão combinada), realizada pelo ONS, cujas ponderações são apresentadas na Figura 1(b), na qual se observa que as previsões fornecidas pelos modelos BAM e Eta foram ponderadas com valores nulos.

Figura 1 - Previsões semi-horárias da velocidade do vento em um ponto de conexão



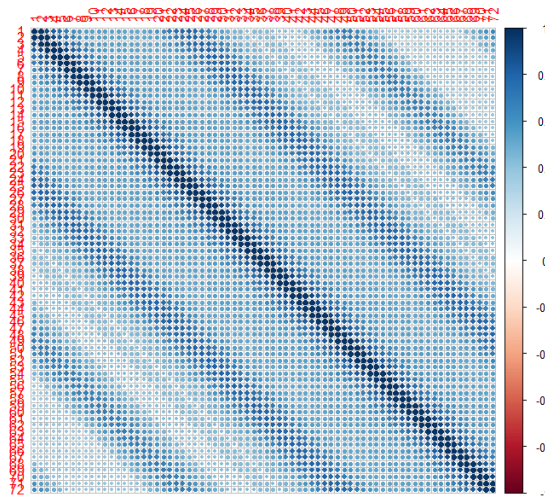
Fonte: Autores, a partir de dados do Sintegre

Como é importante procurar respeitar a estrutura de autocorrelação da velocidade de vento nos cenários gerados, as autocorrelações não devem ser calculadas a partir das

previsões do Sintegre, pois seriam imprecisas em função do reduzido número de observações para cada hora do horizonte de previsão. Uma alternativa, utilizada neste trabalho, é recorrer aos dados de reanálises do MERRA 2.

Para cada localidade mapeada no Sintegre, o MERRA 2 disponibiliza uma longa série temporal com reanálises das médias horárias da velocidade do vento a 100m de altura do solo, a partir da qual calcula-se a respectiva matriz de autocorrelações para uma janela de 72 horas (3 dias), i.e., uma matriz com dimensão 72 x 72, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Matriz de autocorrelações da velocidade do vento



Fonte: Autores

Admitindo que a previsão horária da velocidade do vento w_t seja a realização de uma variável aleatória distribuída segundo uma Weibull(λ_t, k_t), a função de ligação $g()$ passa a ser o logaritmo natural, e as equações (2) e (3) podem ser re-escritas como:

$$\log(k_t) = \beta_{o,k} + \sum_{j=1}^{J_k} h_{j,k}(x_i) \quad \forall t = 1, \dots, 72 \quad (9)$$

$$\log(\lambda_t) = \beta_{o,\lambda} + \sum_{j=1}^{J_\lambda} h_{j,\lambda}(x_i) \quad \forall t = 1, \dots, 72 \quad (10)$$

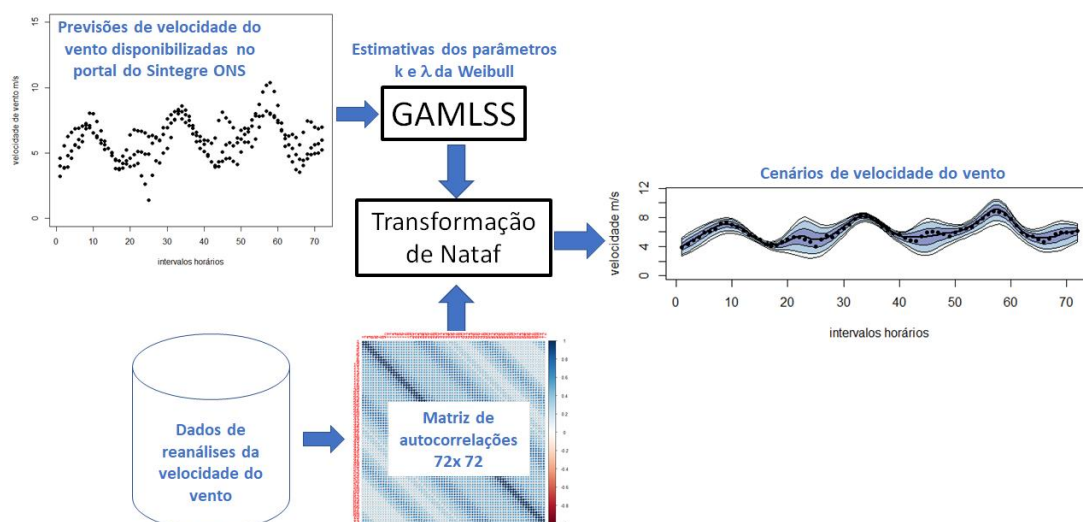
As equações (9) e (10) fornecem, respectivamente, as estimativas dos parâmetros de forma (k_t) e escala (λ_t) para cada intervalo horário do horizonte de previsão de até três dias à frente. Com as estimativas dos parâmetros de forma (k_t) e escala (λ_t) em cada intervalo horário pode-se empregar a transformação de Nataf para amostrar as

distribuições de Weibull(k_t, λ_t) em cada hora do horizonte de previsão, preservando as autocorrelações entre as velocidades horárias oriundas dos dados de reanálises.

A Figura 3 exibe uma representação pictórica da metodologia proposta para a geração de cenários de velocidade do vento, a partir das reanálises do MERRA 2 e das previsões horárias fornecidas pelos modelos de previsão numérica e disponibilizadas no portal do Sintegre. Ressalta-se que as funções suaves $h_{j,k}(t)$ e $h_{j,\lambda}(t)$ nas equações (9) e (10) conferem grande flexibilidade aos modelos GAMLSS, contudo exigem a análise de uma variedade de especificações concorrentes, sobretudo com objetivo de otimizar os hiperparâmetros que controlam o grau de suavização do ajuste (WOOD, 2006). Neste trabalho, as funções suaves $h_{j,k}(t)$ e $h_{j,\lambda}(t)$ são *splines* cúbicas e os hiperparâmetros J_k e J_λ que controlam o grau de suavização do ajuste foram determinados de forma a identificar a especificação com o menor AIC (*Akaike Information Criterion*).

Adicionalmente, a validade da distribuição assumida na modelagem da variável resposta (neste caso a distribuição de Weibull) pode ser avaliada por meio do *wormplot* dos resíduos resultantes do ajuste do modelo GAMLSS (RIGBY et al., 2020), um gráfico semelhante ao Q-Q *plot*, mas sem tendência, cuja finalidade consiste em avaliar se a distribuição dos resíduos é aderente à distribuição normal padrão, o que implica na validade da distribuição assumida para a variável resposta.

Figura 3 - Metodologia para geração de cenários de velocidade do vento



Fonte: Autores

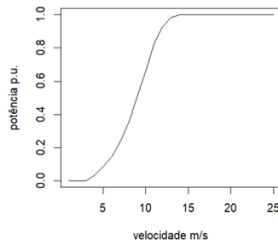
2.5 Metodologia para Geração de Cenários de Produção Eólica

A relação entre a potência elétrica gerada P por uma turbina eólica e a velocidade do vento w é descrita pela curva de potência $P(w)$ na Figura 4, cuja formulação matemática é descrita em (11), na qual C_p denota o coeficiente de performance, η_m é a eficiência do gerador, η_g é a eficiência da caixa de transmissão, ρ é a densidade do ar (kg/m^3), A é a área varrida pelo rotor (m^2) e v_{in} , v_r e v_{out} representam níveis de velocidade do vento (m/s), respectivamente, *cut-in wind speed*, *rated wind speed* e *cut-out wind speed*, informados pelos fabricantes de turbinas eólicas.

Em (12) tem-se a curva de potência disponibilizada no Sintegre (ONS, 2018) para converter as previsões semi-horárias da velocidade do vento nas previsões semi-horárias de produção eólica, cujos parâmetros α , β , B , T , b , S , V_{mid} , $\overline{V_{en}}$, V_{desv} , $Ger_{m\acute{a}x}$ e $Ger_{m\acute{m}n}$ são disponibilizados para cada intervalo semi-horário.

Na prática, o ONS aplica (12) à velocidade do vento resultante da combinação linear das previsões oriundas dos modelos BAM, Eta, ECMWF1, ECMWF2 e GFS, cujos coeficientes de ponderação são fornecidos juntamente com as previsões anemométricas, para cada intervalo semi-horário (Figura 1).

Figura 4 – Curva de potência



$$P(w) = \begin{cases} 0, & w \leq v_{in} \\ 0,5C_p\eta_m\eta_g\rho Aw^3, & v_{in} \leq w \leq v_r \\ 0,5C_p\eta_m\eta_g\rho Av_r^3, & v_r \leq w \leq v_{out} \\ 0, & w > v_{out} \end{cases} \quad (11)$$

Fonte: Autores

$$P(w) = \alpha \left[\left(B + \frac{T-B}{\left(1 + 10^{b \left(v_{mid} - \frac{w - \overline{V_{en}}}{V_{desv}} \right)^S} \right)} \right) (Ger_{m\acute{a}x} - Ger_{m\acute{m}n}) + Ger_{m\acute{m}n} \right] + \beta \quad (12)$$

Neste trabalho os cenários de produção eólica são obtidos pela aplicação da curva de potência em (12) aos cenários de velocidade do vento. A metodologia proposta foi implementada em linguagem R (R CORE TEAM, 2021) e contou com as funções disponíveis no pacote *gamlss* (STASINOPOULOS; RIGBY, 2007), em especial a função

find.hyper, responsável por otimizar os hiperparâmetros que controlam o grau de suavização do ajuste por meio das *splines* cúbicas $h_{j,k}(t)$ e $h_{j,\lambda}(t)$ nas equações (9) e (10), tendo como critério de otimização a minimização do AIC.

3. Resultados

Para ilustrar a aplicação da metodologia proposta e a qualidade dos resultados obtidos, dois PEEs foram selecionados: PEE Atlântica, no Rio Grande do Sul, e PEE Mossoró, no Rio Grande do Norte. No portal do Sintegre foram obtidas as previsões de velocidade do vento e de geração eólica para os dias 8, 9 e 10 de fevereiro de 2021 para os parques eólicos supracitados.

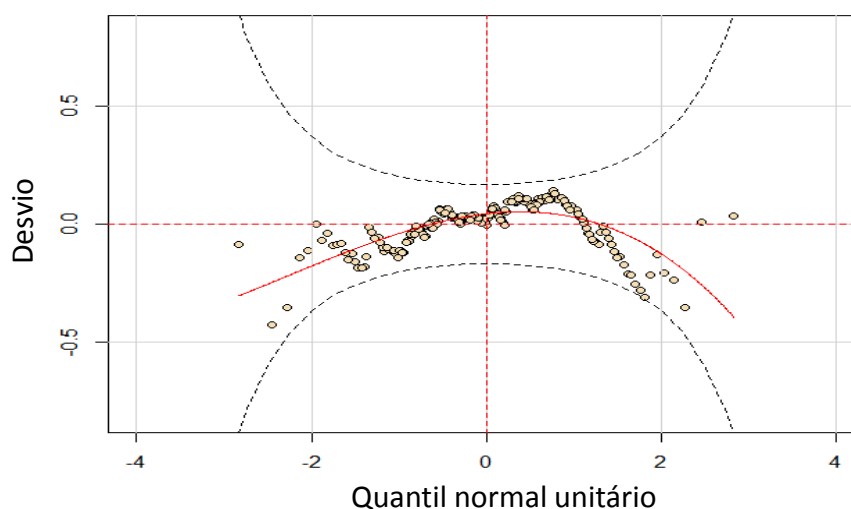
Adicionalmente, foram obtidas reanálises do MERRA 2 com dados horários da velocidade do vento, a 100 m de altura do solo, nas regiões dos PEEs analisados para o ano de 2019. Os dados do Sintegre foram utilizados no ajuste dos modelos GAMLSS, enquanto as reanálises do MERRA 2 foram utilizadas no cálculo da matriz de autocorrelações considerada na geração dos cenários de velocidade do vento, uma matriz única válida para todo o período.

3.1 Cenários para o PEE Atlântica

O ajuste das equações (9) e (10) aos dados do PEE Atlântica resultou em um modelo GAMLSS com AIC igual a 419,82, um resultado melhor que o AIC de 432,11 obtido pelo modelo GAMLSS na qual a especificação da equação (9), referente ao parâmetro de forma (k), inclui apenas o intercepto.

A seguir, na Figura 5, os pontos no *wormplot* dos resíduos do modelo ajustado mostram os desvios dos resíduos ordenados em relação ao valor esperado representado pela linha horizontal no centro do *wormplot*. A disposição dos resíduos no interior da faixa de confiança de 95% (entre as duas curvas elípticas) indica a aderência da distribuição dos resíduos com a distribuição normal e, portanto, a distribuição de Weibull assumida para a variável resposta é adequada. A aplicação da metodologia proposta resultou nos 2.000 cenários de velocidade do vento apresentados na Figura 6, que resultaram nos cenários de produção eólica apresentados na Figura 7 (todos menores que a capacidade instalada de 120 MW).

Figura 5 – Wormplot dos resíduos do modelo GAMLSS

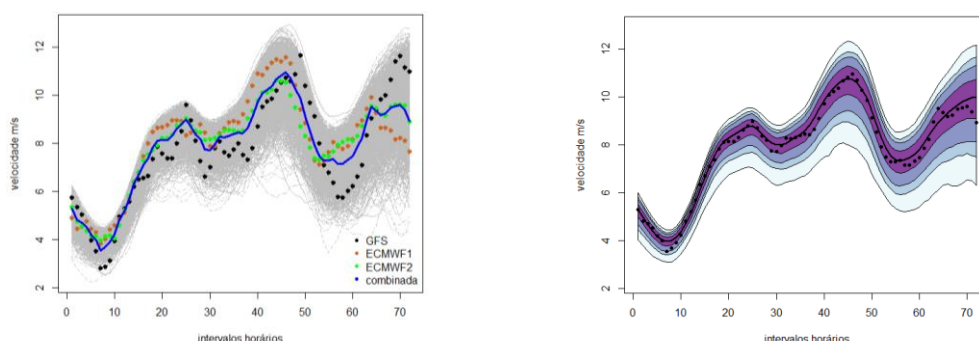


Na Figura 6(a) a previsão combinada corresponde à média ponderada das previsões dos modelos GFS, ECMWF1 e ECMWF2, já que as previsões oriundas dos modelos BAM e Eta foram ponderadas com valores nulos pelo ONS.

Já na Figura 6(b), as regiões são delimitadas pelos quantis de 1%, 5%, 10%, 25%, 50%, 75%, 90%, 95% e 99%. A região no centro da Figura 6(b) concentra 50% de probabilidade, onde também está representada a mediana (linha em preto) e a previsão de velocidade do vento disponibilizada no Sintegre (linha pontilhada).

Assim, verifica-se que a metodologia proposta foi capaz de produzir previsões pontuais de velocidade do vento compatíveis com as previsões pontuais disponibilizadas pelo ONS, além de gerar cenários de velocidade do vento coerentes com estas previsões e também previsões probabilísticas que preservam as autocorrelações horárias.

Figura 6 - Cenários de velocidade do vento para o PEE Atlântico

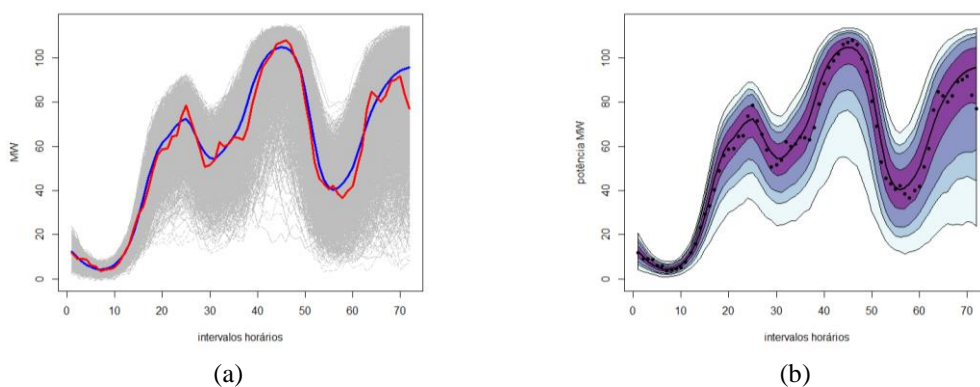


(a)
Cenários e previsões de velocidade do vento

(b)
Quantis dos cenários e previsão Sintegre

Fonte: Autores

Figura 7 - Cenários de produção eólica para o PEE Atlântica



(a) Cenários e previsão de produção eólica

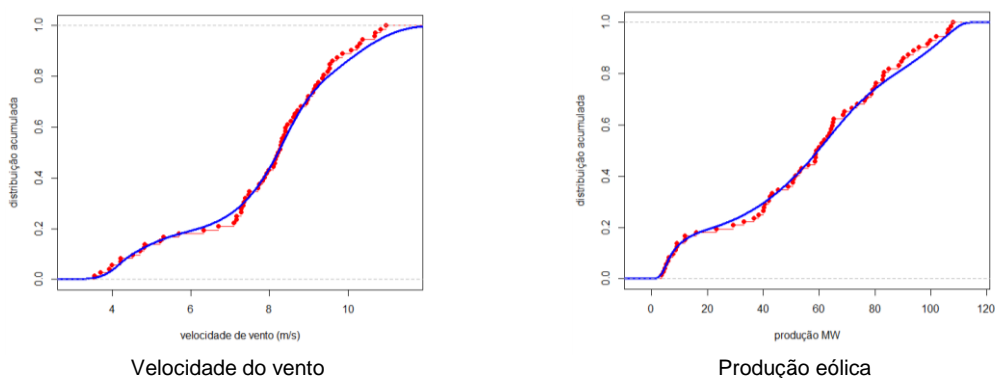
(b) Quantis dos cenários e previsão Sintegre

Fonte: Autores

Na Figura 7(a) a curva em vermelho representa a previsão de produção eólica disponibilizada pelo Sintegre, enquanto a curva em azul representa a mediana dos 2.000 cenários de produção eólica. Os desvios médios percentuais absolutos entre as previsões do Sintegre e as medianas dos cenários são aproximadamente 2,2% na velocidade do vento e 7,8% na produção eólica. Já na Figura 7(b), as regiões são delimitadas pelos quantis de 1%, 5%, 10%, 25%, 50%, 75%, 90%, 95% e 99%.

Na Figura 8, a boa aderência entre as distribuições acumuladas dos cenários de velocidade do vento e produção eólica (em azul) e das previsões do Sintegre (em vermelho) ratificam que a metodologia proposta foi capaz de gerar cenários sintéticos e produzir previsões probabilísticas de velocidade do vento e produção eólica compatíveis com as previsões pontuais calculadas pelo ONS e utilizada na programação da operação de curto prazo.

Figura 8 - Distribuições acumuladas



Velocidade do vento

Produção eólica

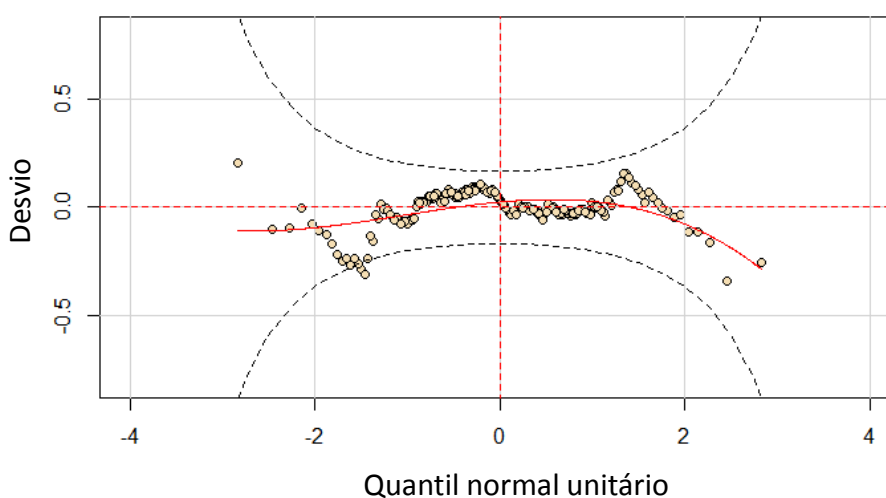
Fonte: Autores

Além disso, a metodologia proposta tem a vantagem adicional de fornecer distintos cenários de velocidade de vento e de produção de energia eólica, fundamentais para nortear as decisões operativas e também de expansão.

3.2 Cenários para o PEE Mossoró II

No caso do PEE em Mossoró II, a premissa de distribuição de Weibull para a variável resposta foi satisfeita por um modelo GAMLSS no qual a equação (9), referente ao parâmetro de forma (k), contém apenas o intercepto (parâmetro constante). O *wormplot* dos resíduos na Figura 9 aponta para o bom ajuste da distribuição de Weibull.

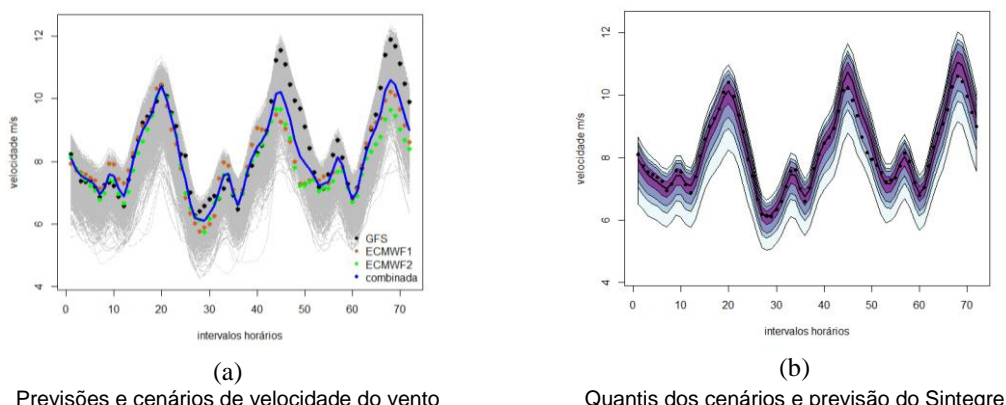
Figura 9 – *Wormplot* dos resíduos do modelo GAMLSS



A aplicação da metodologia proposta resultou nos 2.000 cenários de velocidade do vento na Figura 10. Na Figura 10(a) a previsão combinada corresponde à média ponderada das previsões dos modelos GFS, ECMWF1 e ECMWF2, pois as previsões oriundas dos modelos BAM e Eta foram novamente ponderadas pelo ONS com valores nulos. Como no exemplo anterior, na Figura 10(b) as regiões são delimitadas pelos quantis de 1%, 5%, 10%, 25%, 50%, 75%, 90%, 95% e 99%; a linha em preto no centro representa a mediana e a linha pontilhada indica a previsão de velocidade do vento disponibilizada no Sintegre.

Os cenários de produção eólica correspondentes aos cenários de velocidade do vento são apresentados na Figura 11, sendo que a curva em vermelho na Figura 11(a) representa a previsão de produção eólica fornecida pelo Sintegre, enquanto a curva em azul representa a mediana dos 2.000 cenários de produção eólica.

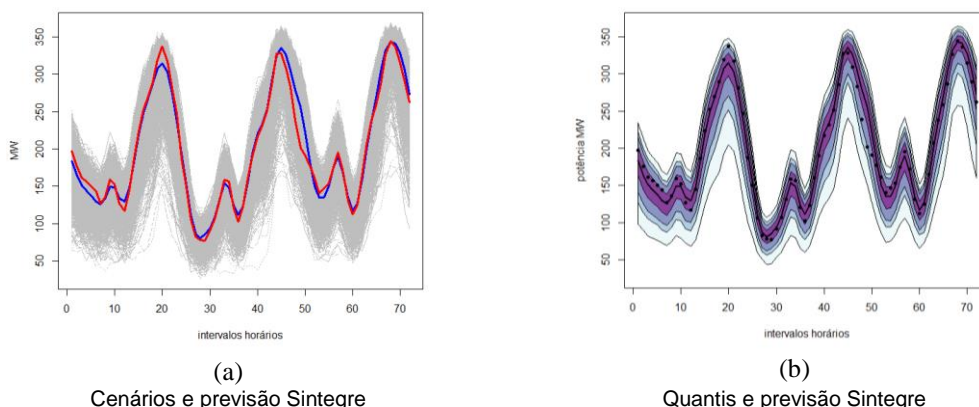
Figura 10 – Previsões e cenários de velocidade do vento para o PEE Mossoró II (RN)



Fonte: Autores

Vale destacar que todos os cenários de produção são menores que a capacidade instalada no PEE em Mossoró II, i.e., 359,7 MW. Por sua vez, na Figura 11(b) apresenta-se as regiões delimitadas pelos quantis de 1%, 5%, 10%, 25%, 50%, 75%, 90%, 95% e 99%.

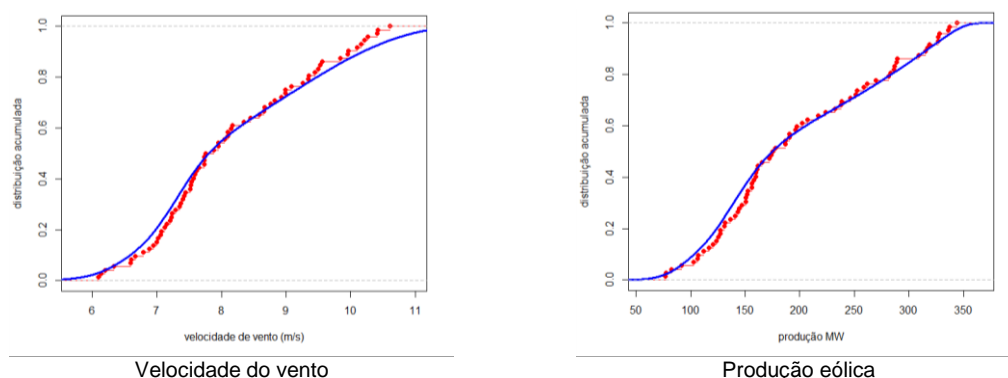
Figura 11 - Previsão e cenários de produção eólica para o PEE Mossoró II (RN)



Fonte: Autores

Os desvios médios percentuais absolutos entre as previsões fornecidas pelo Sintgre e as medianas dos cenários são menores que 2,1% na velocidade do vento e da ordem de 4,4% na produção eólica, indicando, novamente, a razoabilidade dos cenários gerados pela metodologia proposta. Conforme indicado pelas distribuições acumuladas na Figura 12, os cenários são bem aderentes às previsões fornecidas no Sintgre, sobretudo os cenários de produção eólica.

Figura 12 - Distribuições acumuladas



Fonte: Autores

4. Conclusões

Atualmente, o ONS disponibiliza diariamente previsões pontuais da geração eólica até 10 dias à frente com resolução semi-horária, que subsidiam as decisões no âmbito da programação diária da operação. Apesar do notável avanço alcançado pelas previsões pontuais de geração eólica disponibilizadas pelo ONS, tais previsões privilegiam a predição do valor esperado da geração eólica sem, contudo, quantificar e informar apropriadamente a incerteza associada à previsão. Com a maior e crescente penetração da geração eólica na matriz elétrica brasileira e em virtude do comportamento aleatório e intermitente do vento, a previsão do valor esperado da geração eólica sem uma quantificação adequada da incerteza não atende completamente as necessidades da operação em relação à adoção de critérios probabilísticos, como já é feito em relação às afluições a locais de aproveitamentos hidroelétricos.

Por exemplo, em sistemas com grande participação de fontes eólicas a reserva operativa deve ser dimensionada de maneira a cobrir as incertezas nas previsões de carga e de produção de energia eólica.

Visando preencher essa lacuna, o presente trabalho apresenta uma metodologia para geração de cenários de velocidade do vento e de produção eólica, a partir do *ensemble* de previsões de velocidade do vento, disponibilizado diariamente no portal do Sintegre, juntamente com as funções matemáticas que modelam a curva de potência.

Uma das dificuldades enfrentadas na modelagem da velocidade do vento reside no fato de se tratar de uma variável aleatória que não é normalmente distribuída, mas que é melhor representada pelo modelo probabilístico de Weibull. A metodologia proposta supera esta dificuldade por meio dos modelos GAMLSS e da transformação de Nataf,

dois métodos flexíveis e que permitem lidar com diferentes formas de funções densidade de probabilidade.

A aplicação da abordagem proposta foi ilustrada por meio de dois exemplos, um parque eólico no Rio Grande do Norte e outro no Rio Grande do Sul. Os resultados obtidos mostraram que a metodologia proposta foi efetiva, sendo capaz de gerar cenários sintéticos e produzir previsões probabilísticas tanto de velocidade do vento quanto de produção de energia eólica compatíveis com as previsões pontuais disponibilizadas e utilizadas pelo ONS no âmbito da programação da operação, com as vantagens inerentes à metodologia proposta. Estes resultados se mostraram encorajadores para a aplicação da metodologia proposta aos demais parques eólicos do sistema elétrico.

Referências

ALESSANDRINI, S.; SPERATI, S.; PINSON, P. The influence of the new ECMWF Ensemble Prediction System resolution on wind power forecast accuracy and uncertainty estimation, **Advances in Science & Research**, v. 8, p. 143-147, 2012.

ANDRADE, V.A.; PESSANHA, J.F.M.; MELO, A.C.G.; MACEIRA, M.E.P. Modelagem da Relação entre Velocidade de Vento e Produção Eólica no Modelo NEWAVE, **Anais LIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, João Pessoa, PB, Novembro 2021.

BOTTERUD, A.; WANG, J.; BESSA, R.J.; KEKO, H.; MIRANDA, V. Risk Management and Optimal Bidding for a Wind Power Producer, **In: IEEE POWER & ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING**, 2010, Minneapolis.

DER KIUREGHIAN, A.; LIU, P.L. Structural reliability under incomplete probability information. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 112, n. 1, p. 85-104, January 1986.

DING, Y. **Data science for wind energy**. CRC Press, 2020.

DUBINSKY, A.; ELPERIN, T. A method for calculating a load curve using average values of load over time intervals. **Electrical Power & Energy Systems**, v. 19, n. 6, p. 393-395, 1997.

EUROPEAN CENTRE FOR MEDIUM-RANGE WEATHER FORECASTS. **#1 global ECMWF weather forecast**. Disponível em: <https://windy.app/features/ecmwf-weather-forecast-model.html>. Acesso em: 25 dez. 2021.

FIGUEROA, S.N.; BONATTI, J.P.; KUBOTA, P.Y.; GRELL, G.A.; MORRISON, H.; BARROS, S.R.; et al. The Brazilian global atmospheric model (BAM): performance for tropical rainfall forecasting and sensitivity to convective scheme and horizontal resolution. **Weather and Forecasting**, v. 31, n. 5, p. 1547-1572, 2016.

LAZIĆ, L.; PEJANOVIĆ, G.; ŽIVKOVIĆ, M. Wind forecasts for wind power generation using Eta model, **Renewable Energy**, v. 35, p. 1236-1243, 2010.

MACEIRA, M.E.P.; PENNA, D.D.J.; DINIZ, A.L.; PINTO, R.J.; MELO, A.C.G.; VASCONCELLOS, C.V.; CRUZ, C.B. Twenty Years of Application of Stochastic Dual Dynamic Programming in Official and Agent Studies in Brazil – Main Features and Improvements on the NEWAVE Model, **Anais 20th Power System Computation Conference – PSCC 2018**, Dublin, Ireland, 2018.

MACEIRA, M.E.P.; MELO, A.C.G.; PESSANHA, J.F.M.; CRUZ, C.B.; ALMEIDA, V.A.; JUSTINO, T.C. Uma abordagem para a representação das incertezas da fonte de geração eólica no modelo Newave. **Cadernos do IME-Série Estatística**, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, v. 48, p. 1-36, 2020.

MELO, A.C.G.; MACEIRA, M.E.P.; PESSANHA, J.F.M. Ajuste de distribuições Weibull tri-paramétricas com elevadas assimetrias na geração de velocidades mensais de ventos correlacionadas com vazões na Programação Dinâmica Dual Estocástica. **Cadernos do IME-Série Estatística**, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, v. 49, p. 35-65, 2020.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2029**, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202029.pdf>. Acesso em: 25 dez. 2021.

OLIVEIRA FILHO, R.A.; CARVALHO, V.S.B.; REBOITA, M.S. Evaluation of the use of GFS analysis data for energy management over Minas Gerais State (Brazil), *Atmósfera*, [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/52916>. Acesso em: 25 dez. 2021.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS. **Desenvolvimento metodológico para previsão da geração de fonte eólica**, Dezembro, 2018. Disponível em: http://antigo.mme.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=6d2de11a-5f04-039c-508f-1acc5. Acesso em: 14 nov. 2021.

PESSANHA, J.F.M.; MELO, A.C.G.; BESSA, R.J.G.S.B.; ALMEIDA, V.A. Uma metodologia para geração de cenários de produção eólica compatíveis com as correlações espaciais entre os regimes de ventos, *In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA*, 25., 2019, Belo Horizonte.

PESSANHA, J.F.M.; MELO, A.C.G.; ALMEIDA, V.A. Impact of Wind Speed Correlations on Probabilistic Power Flow by using the Nataf Transformation, *Anais IEEE Probabilistic Methods Applied to the Power Systems*, Boise, Idaho, USA, 24-28 June, 2018.

R CORE TEAM. **The R project for statistical computing**. 2019. Disponível em: <https://www.r-project.org>. Acesso em: 21 out. 2021.

RIGBY, R.A.; STASINOPULOS, M.D.; HELLER, G.Z.; BASTIANI, F. **Distributions for Modeling Location, Scale, and Shape: Using GAMLSS in R**, CRC Press, 2020.

SANSIGOLO, C.A. Distribuição de probabilidade de velocidade e potência do vento. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.20, n. 2, p. 207-214, 2005.

SANTOS, T.N.; DINIZ, A.L.; SABOIA, C.H.; CABRAL, R.N.; CERQUEIRA, L.F. Hourly pricing and day-ahead dispatch setting in Brazil: the DESSEM model. *In: POWER SYSTEMS COMPUTATION CONFERENCE*, 21, 2020, Porto.

STAFFELL, I.; PFENNINGER, S. Using Bias-Corrected Reanalysis to Simulate Current and Future Wind Power Output. **Energy**, v. 114, n. 1, p. 1224-1239, November 2016.

STASINOPOULOS, D.M.; RIGBY, R.A. Generalized Additive Models for Location Scale and Shape (GAMLSS) in R. **Journal of Statistical Software**, v. 23, n.7, p. 1-46, December 2007.

STASINOPOULOS, D.M.; RIGBY, R.A.; HELLER, G.Z.; VOUDOURIS, V.; BASTIANI, F. **Flexible Regression and Smoothing: Using GAMLSS in R**, CRC Press, 2017.

WEIBULL, W. A Statistical Distribution Function of Wide Applicability, **Journal of Applied Mechanics**, September, 1951.

WOOD, S.N. **Generalized Additive Models: An introduction with R**. Chapman & Hall/CRC, 2006.

GENERATION OF SHORT-TERM WIND PRODUCTION SCENARIOS FROM AN ENSEMBLE OF HOURLY OR SEMI-HOURLY WIND SPEED FORECASTS

Abstract

The work describes a methodology for the generation of synthetic wind speed and wind energy production scenarios, obtained from hourly or semi-hourly wind speed forecasts, e.g., made available in Sintegre system of the National Electric System Operator. It is assumed that at each hour of the study horizon the wind speed predictions are realizations of a Weibull distribution. The generation of wind speed scenarios is performed through simulations of the Weibull distributions in each hour of the horizon using generalized additive models for location, scale and shape (GAMLSS), but preserving the hourly autocorrelations through the Nataf transformation. Finally, power curves transform wind speed scenarios into wind production scenarios. The proposed approach was applied to two wind farms in the Brazilian electrical system. The results obtained showed that the proposed methodology was effective, being able to generate synthetic scenarios and produce probabilistic forecasts of both speed and wind and wind energy production compatible with the timely forecasts made available and used by the ONS within the scope of the operation programming and scheduling, with the inherent advantages of the proposed methodology. These results are encouraging for the application of the proposed methodology to other wind farms in the electrical system.

Key-words: Weibull Distribution; Wind Energy; GAMLSS; Scenario Generation; Nataf Transformation; Operation Programming and Scheduling.