



Uma Proposta de Mudança do Atual Modelo Hidro-térmico para Hidro-eólio-elétrico no Brasil.

Nicorray de Queiroz Santos ¹, Fernando Luiz Marcelo Antunes ²

1 Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Universidade Federal do Ceará

2 Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Universidade Federal do Ceará

Campos do Pici, Fortaleza, Brasil

nicorray@hotmail.com, fantunes@dee.ufc.br

RESUMO

Este artigo tem o objetivo de apurar e analisar o fator de capacidade dos parques eólicos no Brasil. Indicador de performance muito relevante, no planejamento de produção de energia elétrica em parques eólicos associados às suas condições climatológicas. Esta análise é feita para os Estados Brasileiros, onde já existem parques eólicos instalados e em operação comercial. Serão analisados os fatores de capacidade entre os anos de 2009 à 2015 em todas as plantas eólicas, conforme estabelecido no procedimento de rede do operador nacional do sistema elétrico, referenciado em seus procedimentos. O estudo permite ainda analisar comparativamente o valor planejado e verificado, ambos em MW e também em percentual. As funções de probabilidade de Rayleigh e Weibull, permitem probabilisticamente projetar as distribuições de velocidade do vento. Será avaliado também a participação da energia eólica na matriz energética brasileira, quando comparado com a demanda em $MW_{Médio}$, e ainda são feitas proposições para viabilizar a alteração do modelo elétrico brasileiro como matriz hidro eolioelétrico em substituição ao modelo hidro-térmico, para algumas regiões com potencial eólico.

Keywords: *Energia Renovável, Velocidade média, Matriz energética.*

INTRODUÇÃO

Brasil atualmente possui uma penetração na matriz energética pela fonte eólica de 8,7 GW de potência instalada e fator de capacidade médio registrado de 39,1%, quando verificado os

principais estados federativos do Brasil para geração de energia elétrica pela fonte eólica dos quais são Bahia-BA, Rio Grande do Norte-RN, Rio Grande do Sul-RS e Ceará-CE. Após o acidente de nuclear de Chernobyl em 1986 e Fukushima em 2011, países como Dinamarca, Alemanha e China, dão relevante importância a implantação de mais energia renovável para suprimento energético a seus usuários. No Brasil, a primeira motivação se dá após a última crise energética ocorrida em 2001, quando há necessidade de mais implantação de térmicas emergenciais. Então em 2002 é criada a lei 10.438 [16] com o intuito de ampliar a matriz energética Brasileira com a inserção de mais fontes alternativas de energia elétrica, englobando biomassa, pequenas centrais hidrelétricas e eólica.

MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

A matriz de produção de energia elétrica brasileira é tradicionalmente oriunda de fonte limpa. Com 64,9% predominantemente de geração hídrica quando integradas as plantas de UHE, PCH e CGH e 6,12% de eólicas. Na Tabela 1, apresentamos de forma resumida a caracterização dessa subdivisão, conforme o banco de dados de geração da Agência Nacional de energia elétrica-ANEEL [8].

Tabela 1 - Matriz Energética Brasileira

Empreendimentos em Operação				
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	%
CGH	560	432.804	434.707	0,3
EOL	361	8.848.468	8.795.690	6,12
PCH	447	4.799.273	4.771.700	3,32
UFV	39	26.952	22.952	0,02
UHE	217	101.025.395	88.015.242	61,3
UTE	2.895	41.342.162	39.653.389	27,6
UTN	2	1.990.000	1.990.000	1,38
Total	4.521	158.465.054	143.683.680	100

Pinto afirma [2] que “por outro lado, sabe-se que a energia eólica se tornou uma bem difundida fonte de energia e uma importante peça no mercado energético mundial [...]” e de sobremaneira deve, portanto, ser um recurso natural explorado no Brasil.

O despacho das eólicas, dos quais mais do 65% estão localizadas na região NE, se dá sempre na máxima produção de energia, ou seja, o que se gerar se consome, devido a necessidade de inserção de fontes alternativas de energia para compensar os baixos níveis nos reservatórios hidrelétricos na região NE, por exemplo, do qual se encontra com 16% de nível em 2015 [11].

PARÂMETROS ANALISADOS

Vamos destacar nesse tópico, simulações estocásticas pelos métodos da função de distribuição de Rayleigh e de Weibull, ambos associados à velocidade média do vento e os fatores de capacidade verificados ao longo do período amostral nos parques eólicos em operação.

❖ *Velocidade Média do Vento*

A velocidade do vento (Z^t) é o principal recurso natural para geração de energia elétrica pela fonte eólica, e claro sem perder as características de umidade, direção e temperatura. Mapear áreas que apresentem condições climáticas favoráveis de velocidade, direção, umidade e temperatura é fator preponderante para o desenvolvimento dessa fonte. Segundo Jonhson [1], “*The most obvious way of measuring the Wind is to install appropriate instruments and collect data for a period time.*” Vê-se então o comportamento da velocidade média do vento no estado do RN ao longo do ano de 2015. Para esse em específico é analisado a velocidade média ao longo do período amostral, como fórmula expressa abaixo.

$$Vm = \sum_{i=1}^n fi \times vi \quad (1)$$

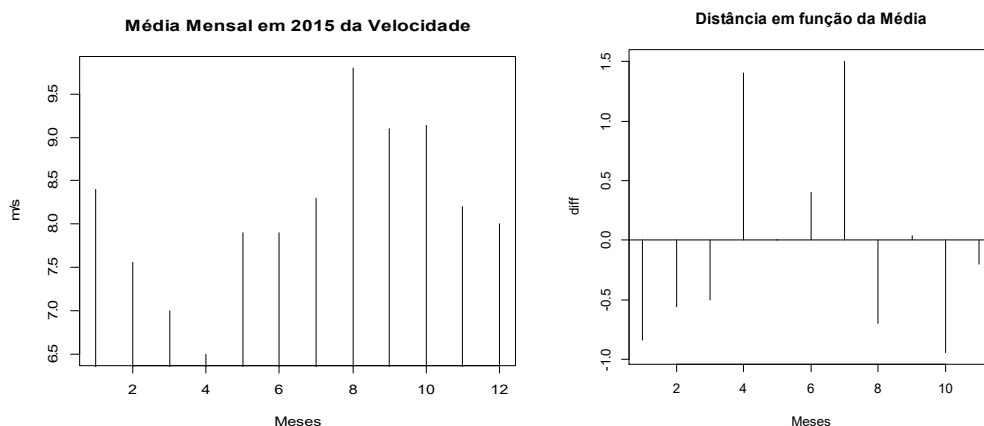


Figura 1 – Distribuição mensal e das diferenças entre as médias. Fonte:EPE

Onde V_i é a velocidade do vento e 'fi' é a frequência dessas velocidades ao longo do ano verificado. Na figura 02, destacamos a estacionariedade da velocidade média mensal ao longo do ano de 2015, apenas do RN, conforme [14] e seu comportamento relacionada a estatística descritiva ao longo do ano pelo boxplot.

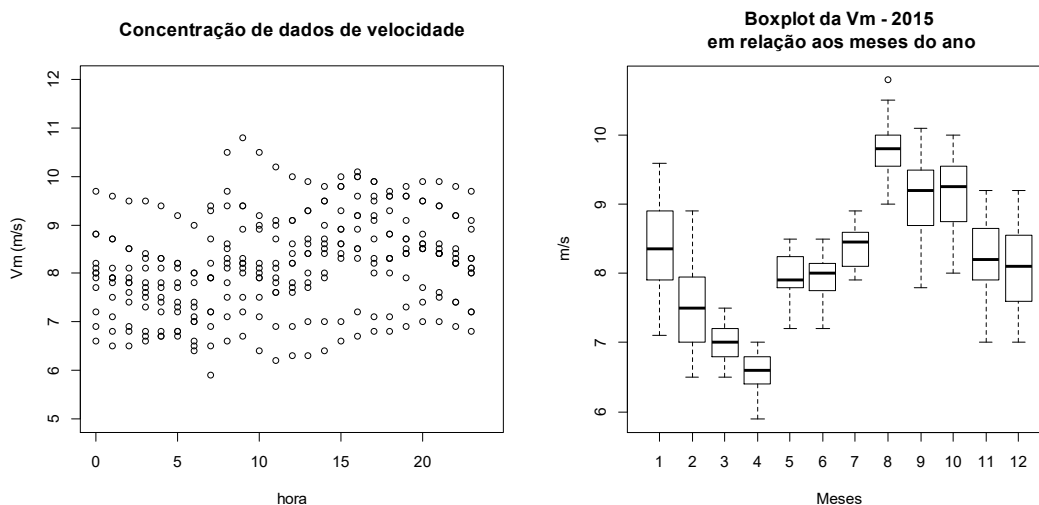


Figura 2 – Concentração e boxplot da velocidade por mês do RN. Gráfico elaborado pelo auto.

Fonte:EPE

❖ Função de distribuição de Rayleigh

A função de distribuição da probabilidade de Rayleigh é uma importante fonte de análise, para estimativa de produção de energia elétrica, e na ausência de alguns dados é recomendável para análise do planejamento energético pela fonte eólica. Por meio da expressão abaixo, conseguimos modelar as curvas de distribuição.

$$Fr = \frac{\pi}{2} \times \frac{v}{vm^2} \times \exp \left[-\frac{\pi}{4} \times \left(\frac{v}{vm} \right)^2 \right] \quad (2)$$

A distribuição de $F(r)$, é demonstrada graficamente abaixo.

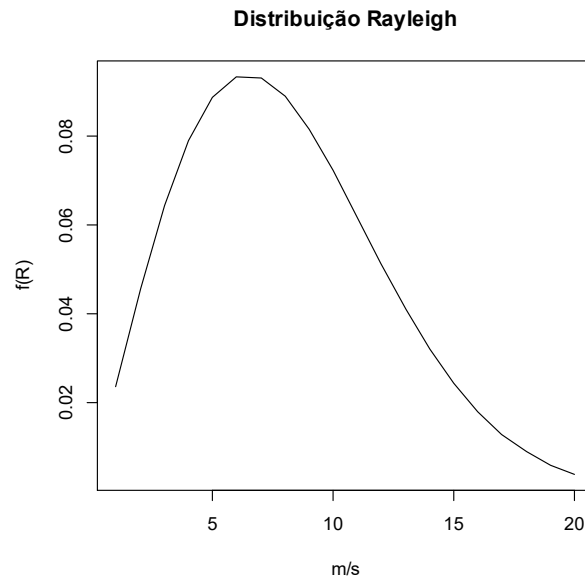


Figura 3 – Função de distribuição de Rayleigh

Onde, $F(r)$ é a função de distribuição de Rayleigh, v é a velocidade do vento, V_m é a velocidade média anual do vento. Por essa função de probabilidade, destacamos uma melhor distribuição das frequências de velocidade ao longo do ano.

❖ *Função de distribuição de Weibull*

A função de probabilidade de Weibull, nos traz uma outra perspectiva da descrição da função de distribuição das velocidades de vento da reserva estudada. Para mensurar Weibull, vamos precisar além da velocidade do vento, de outros dois parâmetros. São eles os parâmetros de forma e de escala, encontrados com base nos valores verificados de velocidade nas regiões estudadas. Então encontramos essa função através da equação expressa abaixo.

$$W = \frac{k}{c} \times \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \times \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (3)$$

Sendo k o parâmetro de forma, c o parâmetro de escala. O parâmetro de forma está associado a velocidade do vento em m/s e o parâmetro de escala é adimensional.

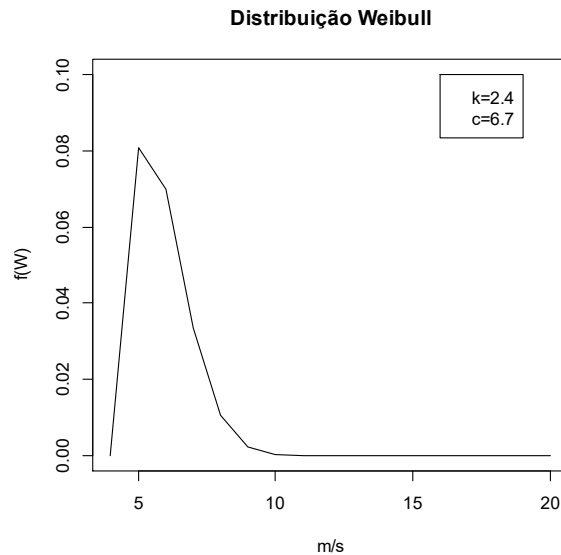


Figura 4 – Distribuição de Weibull

Os valores de k e c foram encontrados empiricamente para ajustar as curvas de destruição, ficando apenas o RS com desvio superior acima do esperado, mas para essa metodologia de análise poderia se utilizar os valores de parâmetros como acima mencionados. Jonhson [1] sugere que o parâmetro de forma que mais se adequa a fonte eólica é o 2 e o cálculo do fator de escala pode ser calculado a partir da velocidade média e do fator de forma. Sendo expressa pela fórmula abaixo.

$$Vm = c \times \tau \left(1 + \frac{1}{k}\right), \quad (4)$$

Calculado esses parâmetros, obteve-se as seguintes afirmações e premissas, com a representação da letra τ grega 'tau' sendo a própria função gama e calculada é encontrado para c o valor de 9,24. O mesmo autor, ainda descreve também a fórmula abaixo para cálculo do fator de escala, do qual o resultado é similar.

$$c = 1,12 \times Vm, \quad (5)$$

Considerado os parâmetros acima, é encontrada uma distribuição de probabilidade melhor, para efeito de estimativa de produção de energia. Com fator de forma igual a 2,4 e fator de escala igual a 6,7. Em si tratando de simulações é vital a escolha correta das probabilidades estocásticas.

Weibull calculado demonstra um FC médio de 51%, quando aplicado em sua função. Talvez para alguns parques eólicos pontuais, possa ser aplicado esse parâmetro estatístico. Para encontrarmos o valor de k vamos trabalhar com fator de forma igual a 2,4. Segundo Patel, [4] a exemplo de [1] também afirma que o fator de forma que melhor representa as plantas eólicas é o fator de forma 2. O autor ainda endossa no mesmo capítulo, que conforme a distribuição Rayleigh com o fator de forma igual a 2, podemos simular a função de Weibull.

❖ *Fator de capacidade verificado*

Vamos analisar os fatores de capacidade entre os anos de 2009 à 2015 nos estados da BA, RN, RS e CE. A definição que melhor entendemos o FC será a razão da produção de energia elétrica efetivamente realizada em um determinado período e a sua potência nominal instalada, do qual chamamos de fator de capacidade dada em % - percentual.

Apresentado inicialmente os fatores de capacidade por meio da tabela abaixo, realmente verificados [9] e [5].

Tabela 2 - Fator de Capacidade Médio Anual

Estados/anos	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
CE	36,3%	36,4%	30,6%	44,8%	46,4%	44,9%	41,29%
RN	26,5%	33,4%	33,5%	34,2%	35,3%	39,7%	36,3%
RS	29,6%	27,4%	33,6%	32,8%	34%	32,8%	28,3%
BA				14,2%	37,5%	42,7%	41,4%

A produção planejada, além do parâmetro velocidade do vento é totalmente dependente de outros fatores como a disponibilidade dos aerogeradores, subestação coletora, linhas de distribuição e condições de escoamento do Sistema Interligado Nacional - SIN. No Brasil em geral, os contratos no ambiente de contratação regulada, preveem uma disponibilidade média de 97%, sendo aproximadamente 1% para interrupções não programadas e 2% para interrupções programadas. Quando formatamos uma máquina equivalente com diâmetro do rotor em 44 metros, e eficiência de 40%, podemos simular e comparar com os dados reais conforme tabela 2 acima. Para suportar essa experiência vamos utilizar a fórmula de produção de energia por meio da fonte eólica, conforme expressão abaixo.

$$P_{eol} = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \times c_p \times \eta \quad (6)$$

Sendo P_{eol} a potência elétrica, ρ a densidade da massa do ar atmosférico dada em $1,225 \text{ kg/m}^3$, C_p o coeficiente de potência, η a eficiência do sistema e A a área de varredura da turbina. Considerando que sabemos a área de varredura do rotor o C_p e a eficiência que dependerá de uma série de fatores., como: layout do parque eólico, se há sistemas em paralelo ou apenas em série, a confiabilidade desses sistemas com base nas probabilidades de falha. Segundo Heier [6] toda a eficiência envolvida é diretamente proporcional à velocidade do vento e as relações diretas com os componentes das máquinas.

Feita simulação estocástica temos, os seguintes dados. Analisado o estado do CE, verificou-se que ao longo do ano há um de FC 42%, para BA um FC de 43,7%, para o RN um FC 42% e RS um FC 31,9%.

Identificada para esse caso uma média teórica de FC teórico de 39,09%.

❖ *Análise dos dados*

Com exceção do RS, os dados reais aproximam se da média calculada que é estimada em 39,1% para o FC médio anual. O erro encontrado quando calculamos essa diferença é de até 7%. A estatística é cada vez mais assertiva no aspecto de aderência para velocidade média do vento e ainda com bons indicadores de disponibilidade da planta, pode-se aproveitar a máxima eficiência. Dessa forma, calcula-se a participação efetiva da fonte eólica em MW, através da equação abaixo.

$$P_e = F_c \times P_t, \rightarrow 39,1\% \times 8,7GW = 3,48GW \text{ médio ao ano,} \quad (7)$$

❖ *Proposição*

É uma realidade o fato de termos que aumentar essa participação a priori a título de complementação, com viés de diversificação da matriz energética brasileira, dando mais oportunidade a essa fonte abundante. Propor 40% de potência instalada atualmente, traduz-se em uma potência nominal de 55 GW, variada a participação do $MW_{\text{Médio}}$, a depender da característica de cada estado a respeito da velocidade média do vento. Tendo em vista uma banda de 7% para mais e 7% para menos da média calculada que é de aproximadamente 39,1%, pode se obter para valores globais de FC entre 32% a 46%. Essa proposição deve apenas levar em



consideração a alta variabilidade no longo prazo das hídricas sob o aspecto da variabilidade dos níveis dos reservatórios e baixa variabilidade das eólicas no longo prazo. E da baixa variabilidade do curto prazo das hídricas e da alta variabilidade das eólicas nesse curto prazo.

ALTERAÇÃO DO MODELO

Independente do ambiente de contratação, é uma realidade a colaboração cada vez maior da fonte eólica na matriz energética. Na Dinamarca [3], debate-se à realidade sob os aspectos de demanda, consumo, qualidade, operação, balanço energético, custos, emprego, reduções de emissão do Gás Carbônico e combustível fóssil no sentido de implementar ou não mais energia renovável no sistema ajustada para 50%. EUA, também indo com políticas agressivas para maior inserção da Energia Renovável. Diferentemente o Brasil, a maior concentração das eólicas estão exatamente em uma das regiões com piores indicadores dos níveis de reservatório do qual é 16% na região NE. Razão por primeiro, poderíamos compensar de alguma forma os níveis dos reservatórios, segundo reduzir a utilização das térmicas que possuem custos operacionais elevados, terceiro as perspectivas futuras no aspecto climatológico favorecem a fonte eólica e solar. A redução do uso do combustível fóssil e CO₂, são também fatores relevantes.

CONCLUSÃO

O Brasil está dando um grande passo para o desenvolvimento no setor eólico, a exemplo de países como Alemanha e Dinamarca. A inserção de outra fonte energética, é originada sob um contexto. Pode ser avaliada pela necessidade de reserva energética, de comercialização e exportação, complementariedade ou simplesmente sócio ambiental. Lafraia [7] afirma que “planejar é exercitar possibilidades para que não sejamos surpreendidos...”. Os excelentes dados de velocidade média anual de vento em alguns estados brasileiros, variando entre 7,2 e 8,8 m/s, com já evidenciados nesse trabalho, e favorecem esse planejamento energético, tendo em vista que foi possível verificar os valores reais dos fatores de capacidade médio anual em função dessa velocidade e os fatores de forma e escala. Que o fator de capacidade médio verificado nos 4 estados analisados entre 2009 e 2015 foi 39,1%. Que o erro encontrado entre o período da amostra é aproximadamente mais ou menos 7%, com exceção do estado do RS, localizada no Sul do Brasil, que apresentou níveis de fator de capacidade abaixo da região NE. Os níveis de



incerteza são pequenos e perfeitamente possíveis de seu atingimento e conseqüentemente o rompimento do paradigma do atual modelo brasileiro.

REFERENCES

- [1] Jonhson, Gary L, Wind Energy System. Ed. eletrônica, 2009, disponível:<http://www.rpc.com.au/information/faq/wind-power/windenergy-systems.html>. cap. 3, pp.1.
- [2] Pinto, Milton de Oliveira, Fundamentos de Energia Elétrica. Rio de Janeiro, LTC, 2008, pp. 38.
- [3] Sharman, H. & Meyer, Wind Energy: The Case of Denmark, September, 2009.
- [4] Patel, Mukind R., Wind and Solar Power System, 1942, CRC Press, New York, cap. 3, pp.34.
- [5] Chesf – Companhia Hidrelétrica do São Francisco – disponível em <http://www.chesf.gov.br/portal/page/portal/chesf_portal/paginas/sistema_a_chesf/sistema_chesf_sistema_transmissao/container_sistema_transmissao?p_name=8A2EEABD3BEAD002E0430A803301D002>. Acesso em 22/01/2015..
- [6] Heier, Siegfried, Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems, Nova York, 1998, pp. 17.
- [7] Lafraia, João Ricardo Barusso, Manual de Confiabilidade, Manutenabilidade e disponibilidade, Rio de Janeiro, Qualitymark, Petrobras, 2001.
- [8] ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, Banco de Informações de Geração - Matriz Energética Brasileira de geração, disponível:<<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>
- [9] ONS, Operador do Sistema Elétrico, Resultados da operação. Disponível: http://www.ons.org.br/resultados_operacao/boletim_mensal_geracao_eolica/index.aspx .
- [10] ONS, Operador do Sistema Elétrico, Sistema Interligado. Disponível: <http://aplicsindat.ons.org.br/sindat/>.
- [11] ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico, Nível dos Reservatórios.
- [12] Disponível: http://www.ons.org.br/tabela_reservatorios/conteudo.asp.
- [13] ANEEL, Atlas de Energia Elétrica, Brasília, 2008, Brasil.



- [14] Lafraia, João Ricardo Barusso, Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e disponibilidade, Rio de Janeiro, Qualitymark, Petrobras, 2001, pp. 343.
- [15] EPE – Empresa de Planejamento Energético. Disponível em < <https://sistemas.epe.gov.br/AMADVP/> >. Acesso em 22/01/2015.
- [16] ANEEL. Lei 10.438 – Expansão da Oferta de Energia Elétrica. Brasília, 2002

BIOGRAFIAS

Nicorray de Queiroz Santos – Nascido em Natal/RN em 13/11/1976. Graduado em Engenharia Elétrica e Mestre pela Universidade Federal do Ceará, em Sistemas de Energia. Atualmente é doutorando na UFRN na área no Departamento de Ciências Exatas com pesquisa em andamento para modelamento de precipitações nas principais bacias hidroelétricas e também em recurso eólicos, com foco no planejamento energético.

Fernando Luiz Marcelo Antunes – Bacharel em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará, Bacharel em Administração de Empresas pela Universidade Estadual do Ceará, Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo e PhD pela Loughborough University of Technology Inglaterra(1991).

É Professor Titular do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará.