

# ANÁLISE DA MELHOR RELAÇÃO EÓLICO-SOLAR CONSIDERANDO A COMPLEMENTARIEDADE DOS RECURSOS, REGULAÇÕES E INCENTIVOS NO BRASIL

Breno de Andrade Loureiro – brenoloureiro@gmail.com

Chigueru Tiba – tiba@ufpe.br

Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear

**Resumo.** Os regimes de vento e sol para algumas regiões no nordeste do Brasil são complementares considerando dados de mesoescala, tipicamente com ventos mais fracos durante o dia. O local em análise tem esse tipo de regime; esse artigo verifica se considerando a injeção de potência em uma escala temporal menor o regime complementar se mostrará benéfico. A combinação de geração através das fontes eólica e solar em conjunto deve objetivar um aumento na utilização das infraestruturas elétrica e civil, consequentemente aumentando a eficiência global do parque híbrido. A complementariedade dessas duas fontes é analisada sob aspectos da produção de energia elétrica, exibindo a melhor relação  $MWeólica \times MWsolar$  para um parque híbrido em uma região específica do nordeste brasileiro. Segundo as análises, a fração ideal estaria próximo de 1 MW de solar para cada 3,75 MW de eólica, considerando um parque híbrido de 30 MW.

**Palavras-chave:** geração híbrida, energia eólica, energia solar fotovoltaica.

## 1. INTRODUÇÃO

A busca pela produção de energia elétrica através de parques híbridos que utilizam fontes complementares com o propósito de aumentar a estabilidade e diminuir custos está sendo realizada em todo o mundo. Jong et al. (2013) examina a complementariedade das fontes solar, eólica e hídrica em relação à curva de consumo de energia elétrica na região nordeste do Brasil, a variação sazonal das fontes e do consumo ao longo de um ano típico é utilizada na análise. Os resultados obtidos indicam que existem correlações e as energias renováveis podem suprir a demanda energética considerando as variações temporais e regionais do consumo de energia de maneira eficiente e sustentável.

Rampinelli e Rosa (2012) mostram uma visão geral da integração da energia eólica com diferentes fontes de energia renovável para todo o Brasil, foi concluído que as fontes eólica e a solar são complementares considerando o perfil diário e sazonal para algumas regiões. Pianezzola (2006) produziu mapas de potencial solar e eólico para o estado do Rio Grande do Sul, no Brasil, a conclusão é que, para algumas partes do estado, a implementação de parques híbridos eólico-solar fotovoltaico são mais recomendáveis do que os parques que utilizam apenas uma dessas fontes.

Outros estudos (Jerez et al. 2013; Hoste et al. 2010 e Gburcik et al. 2011) de diferentes países analisam as características complementares de fontes renováveis de energia, mostrando as vantagens econômicas e confiabilidade técnica dos sistemas híbridos para alguns lugares.

As vantagens econômicas de combinar energia eólica e solar depende do quanto pode ser compartilhado por essas fontes como:

- Aproveitamento da terra;
- Linhas de distribuição internas;
- Subestação;
- Linhas de transmissão;
- Acessos viários;
- Licenças ambientais.

A combinação de energia solar e eólica deve visar um aumento da utilização das infraestruturas elétricas e civis da planta, aumentando assim a eficiência global dos sistemas que utilizam geração híbrida.

O Brasil fornece incentivos para parques eólicos e solares com potência instalada de até 30 MW, os descontos podem ser de até 80% nas tarifas que devem ser pagas para utilização das redes de transmissão e distribuição, conforme estabelecido pela Resolução Normativa da ANEEL N°481 de abril de 2012. Para considerar esses descontos a soma da geração deve ficar abaixo de 30 MW.

É importante verificar se em uma escala temporal mais curta e sob certas restrições a complementariedade do regime considerando a produção de energia elétrica será economicamente vantajosa. As análises e restrições são baseadas em:

- 1 ano de medições de alta qualidade dos recursos solar e eólico;
- Relação ótima  $MWeólico \times MWsolar$  para um parque híbrido de 30 MW;
- Potência sendo injetada em uma escala temporal com integralização de 10 minutos, considerando as perdas típicas de ambas as fontes, em um intervalo com diferentes combinações de potência instalada de energia solar;

- Aumento na utilização do terreno, considerando restrições como a sombra das turbinas eólicas nos módulos fotovoltaicos;
- Aumento na utilização compartilhada das infraestruturas elétricas e civis.

Utilizando as medições e dados da região a produção de energia elétrica é calculada a cada 10 minutos para ambas as fontes durante todo ano medido e diferentes potências instaladas. Com isso a complementariedade das fontes solar e eólica será verificada para cada cenário.

## 2. RECURSO

As medições dos recursos solar e eólico foram realizadas por estações de alta qualidade, com isso foi obtida uma série temporal completa para todo ano, sem falhas, erros ou perda de dados.

O local em análise tem um regime eólico com ventos mais fracos durante o dia conforme exibido na Fig 1. A Fig. 2 mostra o perfil diário média para 1 ano de medição do recurso solar.

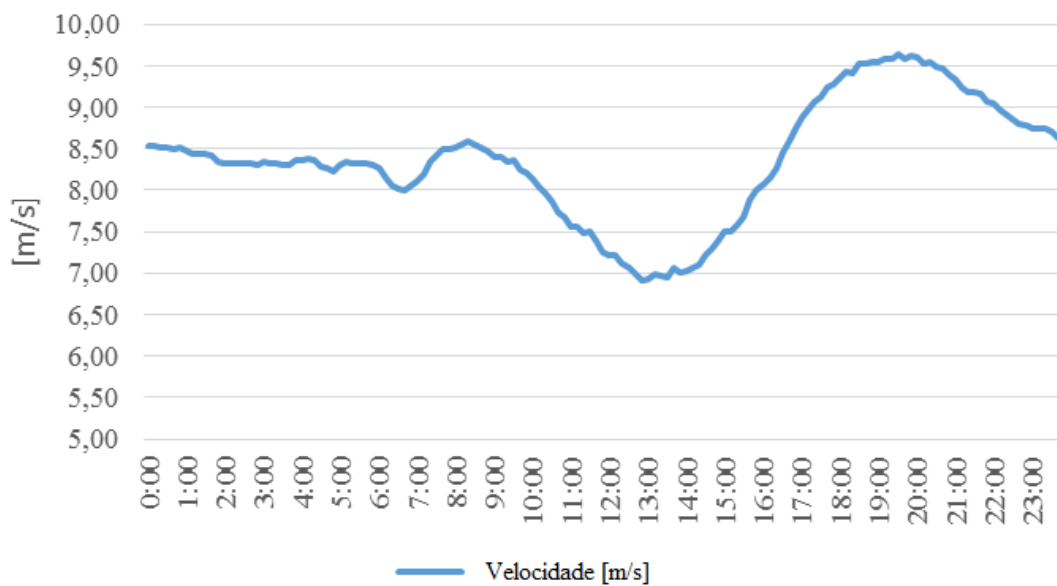


Figura 1: Perfil diário da velocidade do vento – dados medidos no local

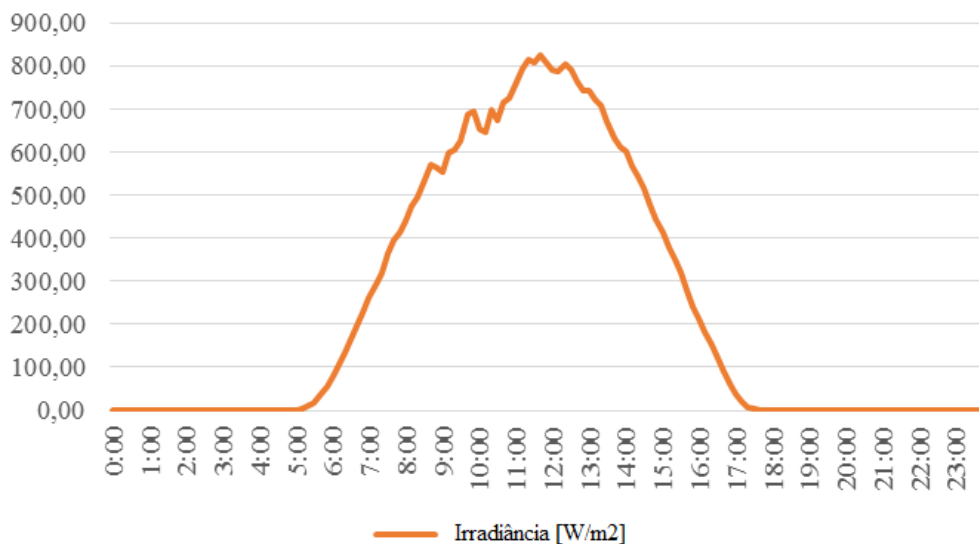


Figura 2: Perfil diário da radiação solar – dados medidos no local

Outra característica importante do vento para essa região em análise é a sua constância em relação a direção durante todo ano; isso causa um impacto positivo na escolha do posicionamento das turbinas do parque eólico. A Fig. 3 exibe a rosa dos ventos para o ano em que houveram as medições.

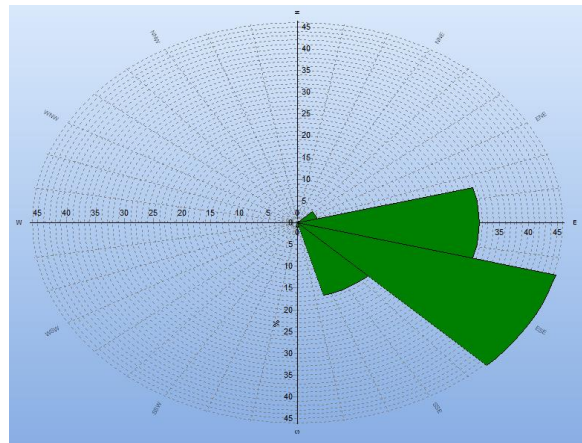


Figura 3 - Rosa-dos-ventos para o local em análise.

## 2.1 Cenários, terreno e regulação

Estimativas de energia e mapas de sombreamento foram simulados com a ferramenta WindPRO. Uma turbina moderna de 2 MW de potência e com uma ótima produção para as condições de vento locais foi utilizada.

A escolha dos locais de instalação das turbinas eólicas é feita de uma forma para diminuir as perdas de energia por efeito esteira. Considerando a rosa dos ventos para o local, a turbina escolhida e após algumas simulações considerando restrições da terra foi escolhido como layout padrão das turbinas um distanciamento lateral de três vezes o diâmetro do rotor e o distanciamento entre linhas de dez vezes o diâmetro do rotor para diminuir as perdas por efeito esteira.

A Fig. 4 mostra o layout das turbinas para esse local. Como os custos para produção de energia eólica no Brasil atualmente estão mais baixos que os custos da energia solar, foi escolhido como cenário fixo para a produção eólica um total de 15 turbinas, totalizando 30 MW de potência instalada de energia eólica.

A quantidade de módulos solares que podem ser instalados entre as linhas de aerogeradores depende altamente dos locais disponíveis com baixo nível de sombreamento das turbinas nos módulos. A Fig. 4 mostra o mapa de duração das sombras das turbinas durante todo ano, cada retângulo exibido tem menos de 1% de sombreamento e 8 hectares de área, suficiente com segurança para alocar pelo menos 2 MW de potência instalada de qualquer tecnologia fotovoltaica.

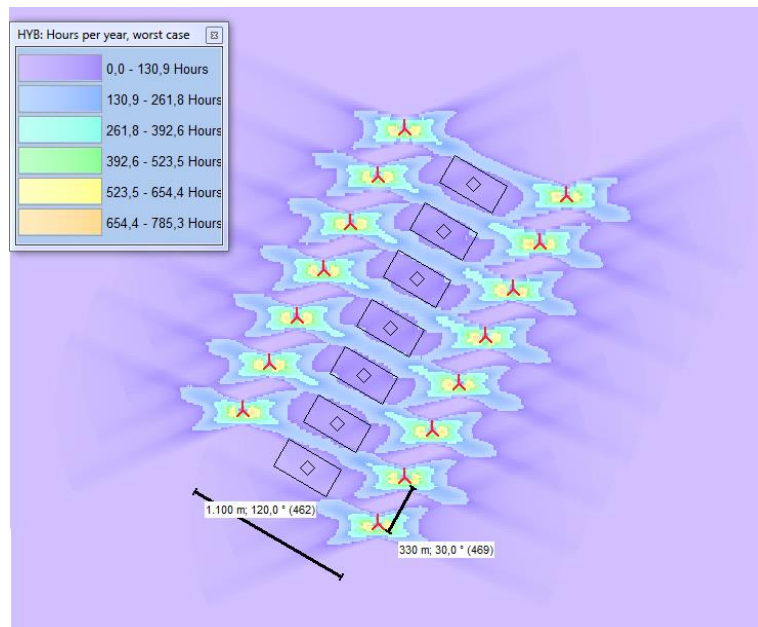


Figura 4: Layout das turbinas e locais disponíveis para instalação de módulos solares considerando as sombras das turbinas.

Os cenários avaliados são a combinação de uma planta eólica de 30 MW e de uma planta fotovoltaica de 2 MW com incrementos de 2 MW. Devido a restrições de terra e sombreamento, o máximo de potência fotovoltaica instalada que poderia ser alocada entre as linhas do parque eólico é de 14 MW (7 x 2 MW de módulos solares).

Esses cenários serão analisados sob a ótica da produção de energia elétrica e serão chamados de cenário HYBX, onde o X será quantidade total de MW de solar instalado com passos de 2 MW. Então, HYB0 será uma planta eólica de 30 MW com 0 (zero) MW de planta solar, HYB2 será uma planta eólica de 30 MW com uma planta solar de 2 MW, HYB4 será uma planta eólica de 30 MW com um parque solar de 4 MW, e assim sucessivamente.

## 2.2 Produção de energia elétrica

Como a restrição de potência máxima é de 30 MW a soma da produção de MWeólico + MWsolar tem que sempre estar abaixo desse limite. Deverá ser feito uso da eletrônica de potência da planta para limitar a geração. Devido a esse limite haverá perda da produção de energia elétrica nos momentos em que a soma da geração conjunta for maior que o limite de 30 MW. A Figura 5 mostra as perdas devido a esse efeito do caso HYB0 até o caso HYB30 para questões analíticas.

Considerou-se um parque eólico com potência instalada fixa em 30 MW devido as suas condições atuais de custos em relação à parques fotovoltaicos e a possibilidade de instalar usinas fotovoltaicas dentro das centenas de parques eólicos de 30 MW já existentes no Brasil.

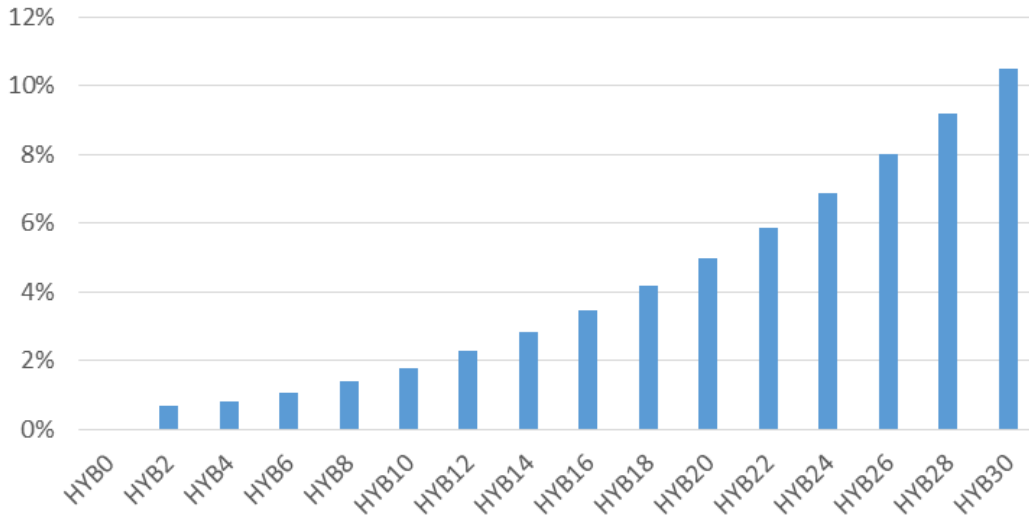


Figura 5 - Perdas devido a restrição de geração em 30 MW.

Haverá perdas de energia acima de 2% para cenários maiores que HYB10. Devido a restrições de terra e de potência considerando perdas menores que 2%, o total de MWsolar deve ser menor que 10 MW para um parque eólico de 30 MW.

A definição da melhor fração entre eólica e solar é altamente dependente de cenários econômicos. A Fig. 6 mostra o perfil de geração diário para as duas fontes combinadas até o cenário HYB10. Para perdas de geração devido a sobre potência ao redor de 1% o melhor cenário seria o HYB6. Então, na média, o cenário HYB8 se encaixa em ambas as circunstâncias.

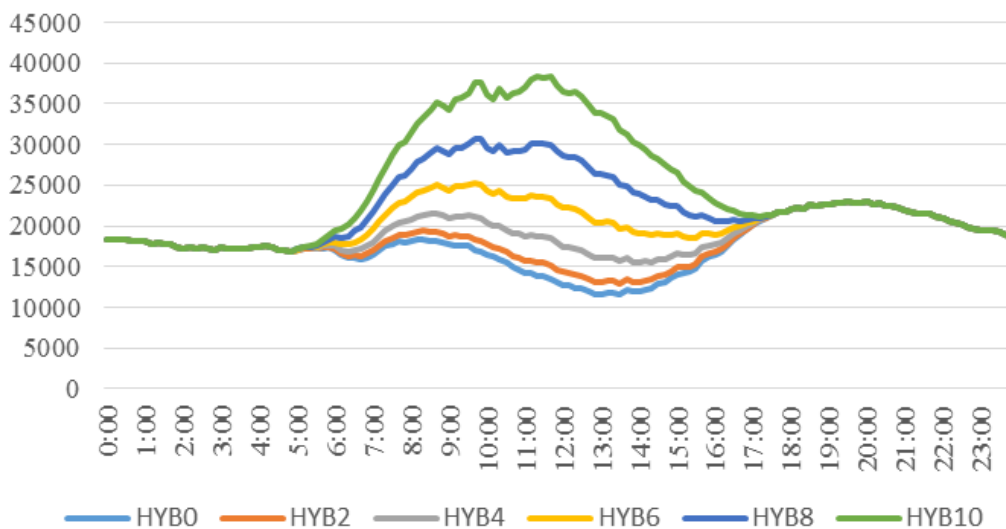


Figura 6 - Perfil diário de geração combinada solar e eólica para cenários de HYB0 (apenas eólica) a HYB10 (10 MW de solar para um parque de 30 MW de eólica) – Dados obtidos através de simulações.

### 3. CONCLUSÕES

Desde 2009, através de leilões anuais regulares, aproximadamente 15 GW de energia eólica foi contratada no Brasil. Desde então, os custos da energia eólica vêm baixando, chegando a menos da metade dos custos iniciais. Um leilão específico de energia solar foi realizado no final de 2014, com mais de 1 GW de potência solar contratada. A expectativa é que a energia solar siga o mesmo caminho da eólica no Brasil.

Esse artigo mostra as características complementares das fontes eólica e solar do ponto de vista da geração de energia, ressalta-se a quantidade ideal eólica x solar é altamente dependente das condições de cada lugar. Para o caso particular em análise, a fração ideal estaria próximo de 1 MW de solar para cada 3,75 MW de eólica, considerando um parque híbrido de 30 MW.

Uma grande aplicação seria a instalação de parques fotovoltaicos em usinas eólicas já existentes, isso abriria a possibilidade de instalação imediata de até 4 GW de solar fotovoltaica, incentivando assim ainda mais o crescimento dessa tecnologia no Brasil.

### REFERÊNCIAS

- P. de Jong, A. S. Sánchez, K. Esquerre, R. A. Kalid and E.A.Torres (2013), Solar and wind energy production in relation to the electricity load curve and hydroelectricity in the northeast region of Brazil, *Renewable and Sustainable Energy Reviews - Journal Elsevier* 23 (526-535).
- G. A. Rampinelli and C. G. Rosa (2012), “Analysis of Wind Power Generation in Brazilian Power Electric Matrix”, *Revista Ciências Exatas e Naturais* Vol. 14 n2, Brazil.
- G. Pianezzola (2006), Mapas de Complementariedade dos Potenciais Solar e Eólico no Estado do Rio Grande do Sul, Master Thesis, Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil.
- S. Jerez, R. M. Trigo, A. Sarsa, R. Lorente-Plazas, D. Pozo-Vásquez and J.P. Montávez. (2013), “Spatio-temporal complementarity between solar and wind power in the Iberian Peninsula”, *ScienceDirect Elsevier, Energy Procedia* 40, 2013, pp. 48-57
- G. R. G. Hoste, M. J. Dvorak and M. Z. Jacobson (2010), “Matching Hourly and Peak Demand by Combining Different Renewable Energy Sources”, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University.
- P. Gburcik, V. Gburcik, M. Gavrilov, V. Srdanovic and S. Mastilovic (2011), “Complementary Regimes of Solar and Wind Energy in Serbia”, University of Belgrade.

### ANALYSIS OF OPTIMAL WIND-SOLAR CAPACITY RATIO BASED ON COMPLEMENTARY CHARACTERISTICS, INCENTIVES AND BRAZILIAN REGULATIONS

**Abstract.** *Wind and solar regimes in northeast region of Brazil are complementary considering mesoscale data, typically with slower winds during daytime. The site under evaluation has that kind of regime; this paper will verify if in a smaller timestamp basis the complementary regime will be worthwhile economically sustainable. The combination of solar and wind energy aim an increasing of balance of plant utilization, consequently improving the global efficiency of a hybrid farm. The objective of the paper is to verify the complementarity of wind and solar under energy production, showing the best ratio of  $MW_{wind} \times MW_{solar}$  for a hybrid farm under some constraints. For the particular case of this paper, the ratio would be around 1  $MW_{solar}$  power for every 3.75  $MW_{wind}$  considering a 30 MW hybrid farm.*

**Key words:** *hybrid, wind, solar photovoltaic.*