

ESTUDO DE GERAÇÃO EÓLICA DISTRIBUÍDA

Ivan Santos Pereira, ivan.santos@discente.ufg.br¹
Thiago Casale Oliveira, thiagocasale@discente.ufg.br¹
Geyverson Teixeira de Paula, geyverson@ufg.br¹

¹Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação - UFG

Resumo. O objetivo deste estudo é promover uma análise sobre a geração distribuída de energia no Brasil e em Goiás, realizando um quadro comparativo entre a energia eólica e a solar com a finalidade de investigar a viabilidade do emprego de energia eólica na geração distribuída do estado, tanto quanto escrutinar se existe utilidade para esse uso e quais são as condições para sua adoção em comparação com a forma de energia solar. A análise discorreu sobre a velocidade média dos ventos, a incidência de radiação solar no estado e ainda sobre o consumo de espaço e o custo por potência gerada de modelos de geradores presentes no mercado para cada forma de energia. O estudo concluiu que o uso dos geradores eólicos disponíveis no mercado para geração distribuída em Goiás é inviável, mas que existe potencial para emprego de energia eólica na complementação de demanda de regiões isoladas, desde que novos projetos de aerogeradores possam compensar a limitação devido aos ventos de baixa velocidade do estado.

Palavras-chave: Geração distribuída. Energia. Eólica. Solar.

Abstract. The objective of this study is promoting an analysis about the distributed generation of energy in Brazil and in Goiás, performing a comparative discussion between wind energy and solar energy with the purpose of investigating the viability of the use of distributed eolic energy in the State, while also examining if it does exist utility for this generation and what is required for its implementation in comparison to solar energy, the most used in Goiás. This analysis addressed the average speed of regional winds, the incidence of solar radiation, the physical space required for installation and the financial cost per generated power. The study concluded that the use of the available wind generators for distributed generation is not viable in Goiás, but it asserted it is possible to generate wind energy to supply the demand of isolated places that solar energy cannot, however, it is necessary that new projects of wind generators can compensate the limitations imposed by the low wind speed in the State.

Keywords: Distributed generation. Energy. Wind. Solar.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o movimento da causa ambientalista ganhou força no cenário internacional e fomentou o surgimento de debates sobre diversos tópicos da produção industrial e tecnológica que movem o mundo atual, entre elas a geração de energia. Imerso neste contexto, o Brasil passou a ser cobrado pela diversificação de sua matriz energética, tendo em vista a priorização de formas de energia limpa e renovável para preservar seu espaço natural e tornar sustentável a produção energética do país. Abaixo, na Fig. 1, está exposto um gráfico sobre o perfil da capacidade instalada de geração de energia do Brasil no ano de 2022:

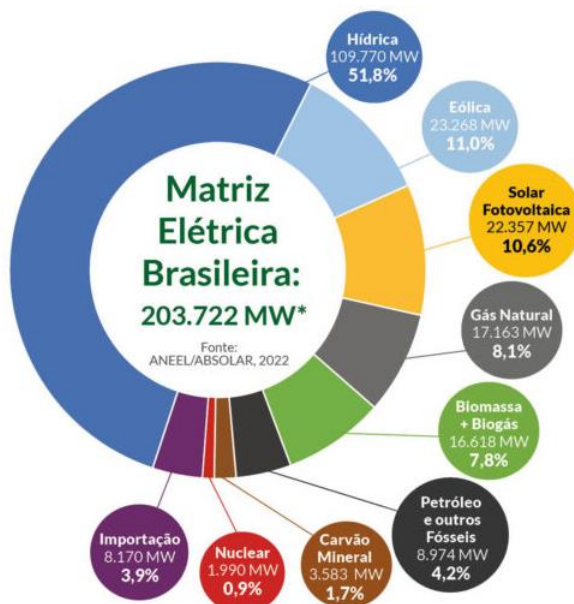


Figura 1. Gráfico da matriz energética brasileira em 2022 (ABSOLAR, 2022)

Conforme pode ser observado, a matriz energética brasileira é ainda fortemente dependente da geração hidráulica, que responde por mais de 51,8% da capacidade instalada nas usinas do país. Embora seja uma fonte de energia renovável, a energia hidráulica é criticada por não ser uma forma de energia limpa, tendo em vista os danos ambientais provocados em sua instalação, além das crises energéticas que decorrem da dependência de uma forma de energia dependente da sazonalidade do clima.

Procurando soluções para este problema, o governo regulamentou a geração distribuída de energia, que consiste na produção autônoma de energia elétrica pelos próprios consumidores, ou seja, um incentivo à iniciativa privada. O sistema criado pelo governo compensa os consumidores que geram energia elétrica abatendo sua conta de luz com o valor equivalente ao montante de energia produzido, permitindo ainda que, caso a produção exceda o consumo, a geração excedente gere “créditos de energia” que podem ser utilizados para reduzir o valor de futuras tarifas de energia, embora não possam ser revertidos em dinheiro. Um empreendimento para a geração de energia certamente representa custos consideráveis para o consumidor devido à instalação e à manutenção do sistema, contudo, a economia de energia a longo prazo tende a compensar o investimento. Tendo em vista a versatilidade para o cliente, se destacam duas formas de energia limpa e renovável que serão analisadas nesse estudo para geração distribuída: a solar e a eólica.

Segundo a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, ABSOLAR, cerca de 99,9% das instalações de geração distribuída no Brasil são de módulos fotovoltaicos, fato que se justifica devido à tropicalidade do Brasil e à maior assimilação desse serviço entre a população. Por outro lado, o uso de energia solar costuma demandar custos consideráveis com a instalação e a manutenção, além de exigir uma área grande para a instalação dos módulos. A energia eólica, em comparação, tem uma posição oposta: seu emprego na macro geração de energia supera substancialmente o da energia solar, com grande destaque para a região Nordeste do Brasil. Contudo, o uso na geração distribuída é muito inferior e pouco conhecido, apesar de existirem modelos disponíveis no mercado, como está exposto nas Figs. 2 e 3:

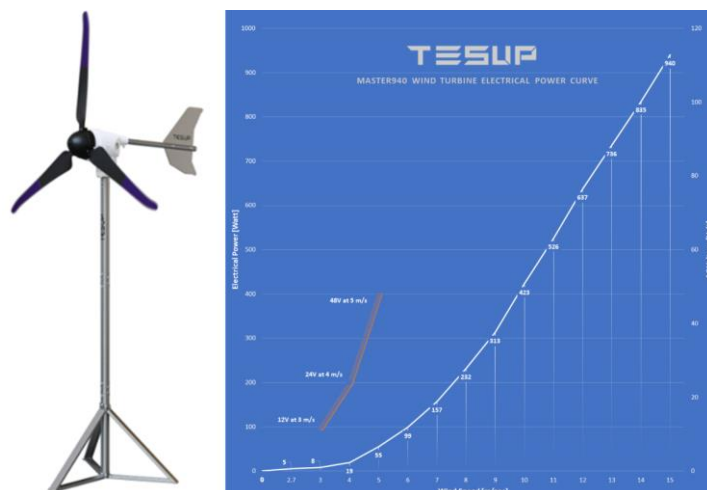


Figura 2. Gerador eólico com turbinas de 1,6 metro de diâmetro, disponível no manual do usuário em: (TESUP, 2022)

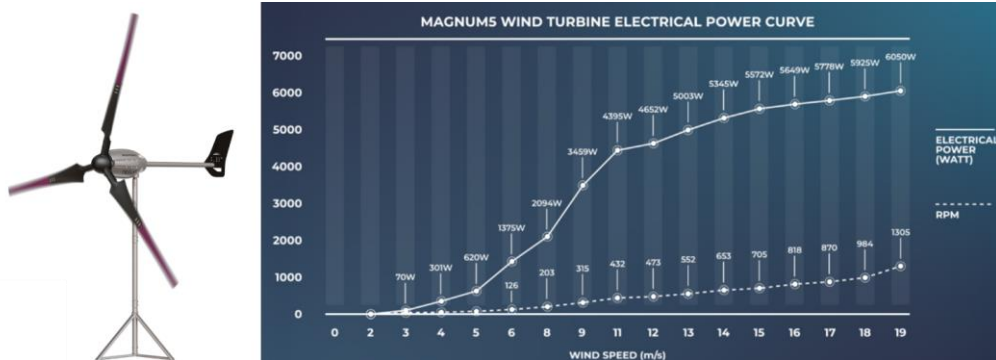


Figura 3. Gerador eólico com rotor de 2,35 metros de diâmetro. Curva de potência disponível no manual do usuário em: (TESUP, 2022)

Conforme observado nas Figs. 2 e 3 e em outros modelos que foram pesquisados durante o estudo, embora existam geradores em escala reduzida que trabalham com energia eólica, utilizando menor área de instalação do que os módulos fotovoltaicos, há um fator limitante da energia gerada que é a velocidade média dos ventos na região do consumidor, normalmente os geradores operam com ventos acima de 3 m/s.

Fica evidente, portanto, a importância da discussão acerca de sistemas distribuídos para a economia financeira dos consumidores e para atenuar a dependência da matriz energética brasileira em relação à energia hídrica. Nesse contexto, o estudo aqui apresentado, promove um levantamento sobre as condições específicas do estado de Goiás para o emprego de energia eólica na geração distribuída de energia e sua comparação com a energia solar para a mesma função.

2. Características do Vento: Região Goiás

Com o estudo de conversão eletromecânica de energia, para convertermos a energia cinética fornecida pela velocidade do vento em energia elétrica é necessário a análise de todo o sistema do aerogerador. Dessa forma, com essa análise podemos facilmente chegar ao resultado expresso através da Eq. (1) e da Fig. 4 (Picolo, *at al.*, 2014).

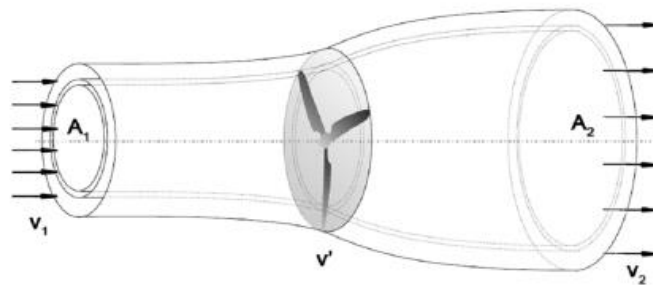


Figura 4. Representação Esquemática de um aerogerador (Picolo, *at al.*, 2014)

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_1 \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{V_2}{V_1} \right] \left[1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 \right] \right\} \quad (1)$$

Em que:

P – Potência gerada

A – Área que as pás varrem no espaço [m²]

ρ – Massa específica do ar

V₁ – Velocidade do vento antes de passar pelo aerogerador

V₂ – Velocidade do vento depois de passar pelo aerogerador

Dessa forma fica evidente que a potência fornecida pelo aerogerador depende exclusivamente da velocidade do vento que chega nas pás e da área que as pás varrem no espaço. Além disso, o termo entre chaves pode ser chamado de coeficiente de potência e atinge seu valor máximo quando a relação V₂/V₁ é de 1/3, tendo seu valor aproximado para 0,593.

Olhando por outro lado, se pegarmos a mesma equação, mas em sua forma ideal, onde toda a energia cinética do vento inicial é convertida em energia elétrica, expressa através da Equação (2), podemos observar que a geração é impulsionada

em ordem 3 pela velocidade do vento e de ordem 1 quanto maior for o diâmetro das pás do gerador (aumentando, conseqüentemente, a área). Portanto, essas duas características de um aerogerador são as mais importantes.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (2)$$

Em que:

V – Velocidade do vento na região

Entretanto, a velocidade do ar não é um padrão ao qual podemos alterar e quanto maior for as pás, maior será o peso da estrutura, o que não só pode descompensar todo o sistema, como também exigirá maior força do vento para iniciar o movimento rotacional.

Portanto, levando em consideração o que foi dito, como o foco é a geração eólica distribuída aplicada nas regiões interioranas do Brasil, foi escolhido o estado de Goiás para o estudo a seguir. Contudo, essa análise e utilização do método é válida para todo o território nacional.

Para analisarmos essa região, utilizamos a base de dados do site WindFinder para coletarmos as informações, em valores médios anuais, de quatro estações meteorológicas (Fig. 5), sendo elas: Posse (norte do estado), Itumbiara (Sul do estado), Anápolis e Goiânia (centro do estado). Dessa maneira, montamos uma tabela com os resultados obtidos através dessa pesquisa, que está representada na Tab. 1 e Fig.6.



Figura 5. Estações escolhidas para análise estadual

Medições (m/s)					
Informações (médias)	Goiânia	Anápolis	Itumbiara	Posse	Média do Estado
Vento (m/s)	3	3	1	1	2
Rajadas (m/s)	12	11	3	-	7,25
Direção	NE	ENE	N	ENE	-

Tabela 1. Informações do vento no estado de Goiás (WindFinder, 2022)

Distribuição mensal da direção e força do vento

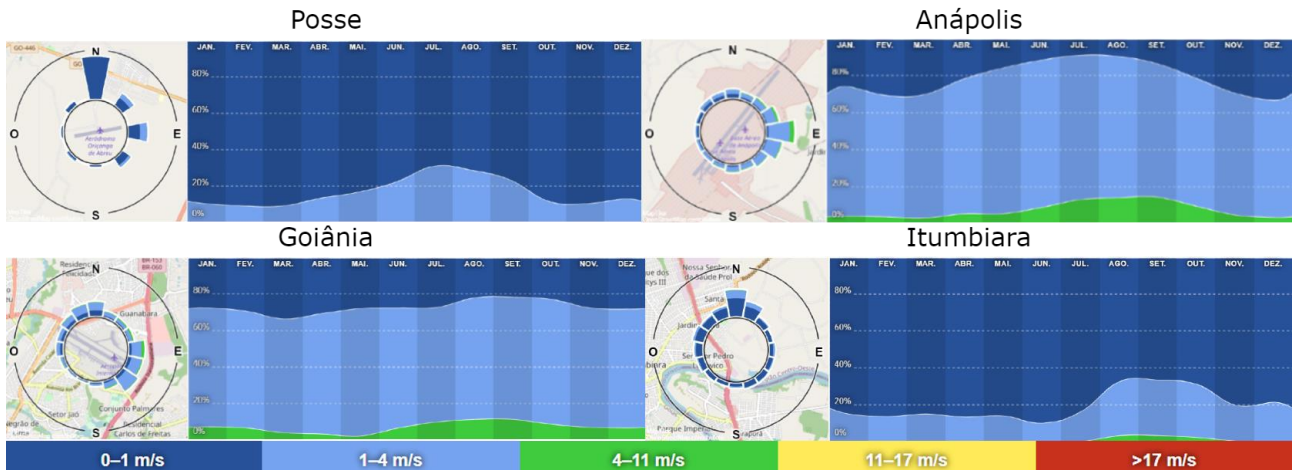


Figura 6. Distribuição mensal da direção e força do vento nas estações (WindFinder - modificado, 2022)

À vista disso, a maior parte de pequenos modelos de geradores existentes no mercado iniciam sua geração a partir de ventos de 3 m/s, o que na região do estado de Goiás iria limitar a geração de energia a valores desprezíveis, assim sendo, é de extrema necessidade um projeto específico de um aerogerador de menor escala capaz de produzir energia elétrica para essas características a fim de que a complementação do consumo por meio da energia eólica seja viável no estado.

3. Geração Solar Fotovoltaica: Região Goiás

A geração de energia elétrica através de módulos fotovoltaicos vem crescendo muito nos últimos anos em todo o mundo devido à grande capacidade de produção aliada ao barateamento dos produtos. No Brasil, um país tropical, não é diferente, segundo dados atualizados da ABSOLAR (Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica), a geração com esse tipo de energia luminosa chegou a 22,3 GW em novembro de 2022, sendo mostrada através da Fig. 7.

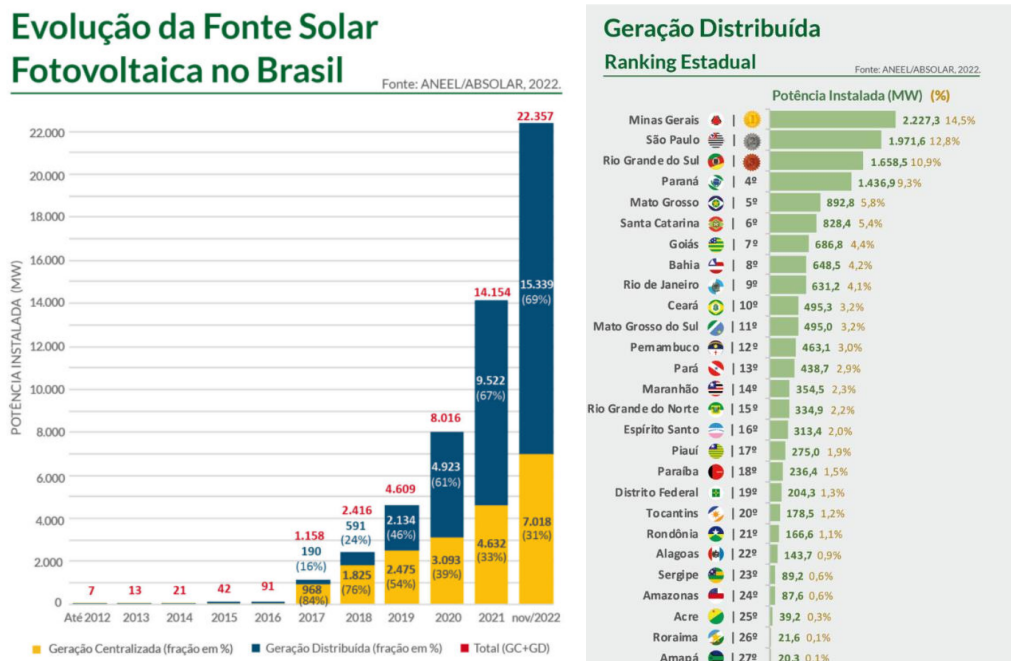


Figura 7. Dados do crescimento da geração fotovoltaica instalada no Brasil e distribuição por Estado. (ABSOLAR, 2022)

O estado de Goiás fica em 7º lugar na lista dos estados com maior potência instalada na forma de geração distribuída de energia solar, com capacidade média de 686,8 MW. Além disso, a capital do estado está na oitava colocação entre as cidades com maior potência instalada do sistema. Portanto, Goiás é um dos estados com maior capacidade de geração de energia elétrica através do sistema fotovoltaico, tendo um amplo campo da população que possui este tipo de sistema em suas residências, área rural, comércio e indústrias.

Ademais, esse tipo de geração de energia elétrica possui em média uma eficiência de cerca de 15% da energia vinda do sol. Sendo assim, os módulos solares mais comuns encontradas no mercado são as de dimensões 1,63m x 0,98m, que pesam aproximadamente 19 kg, possuem nelas 60 células fotovoltaicas e geram em média 250W. Normalmente são feitas de material de silício mono ou policristalino.

4. Complementaridade dos Sistemas de Geração

O quadro comparativo entre energia solar e eólica se inicia a partir das condições geofísicas da região em análise. Quanto à incidência dos raios solares em Goiás, está exposto abaixo (Fig.9) um mapa com a taxa de irradiação normal direta por região no Brasil, obtido na Global Solar Atlas:

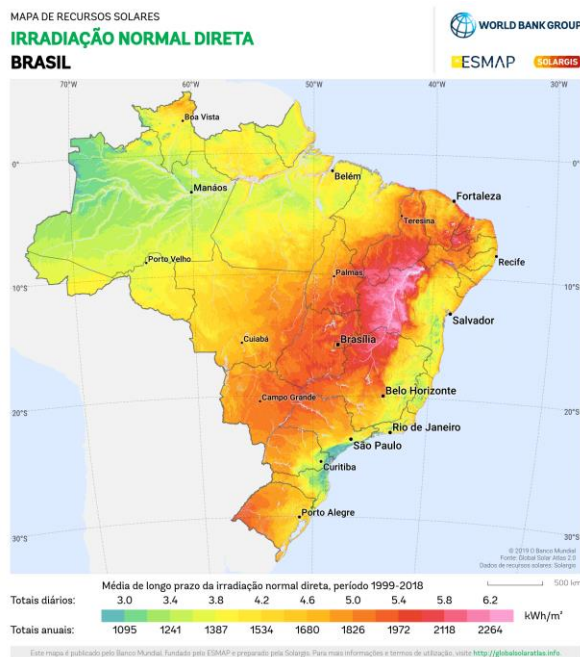
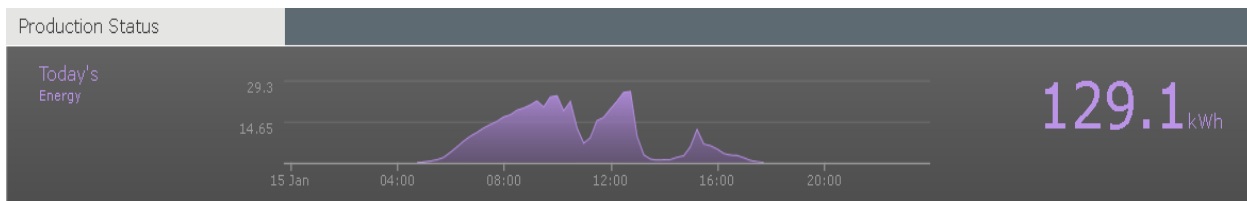


Figura 9: Irradiação normal direta de raios solares no Brasil, referente ao ano de 2019 (Global Solar Atlas, 2022)

Em comparação, a energia eólica em Goiás é atrelada à velocidade média dos ventos que pode ser observada na Tabela 1.

Uma análise de desempenho entre as duas formas de energia justifica a explícita preferência pela geração solar, considerando que a velocidade média dos ventos no Estado (2 m/s) é inferior ou igual à velocidade de startup dos micros aerogeradores analisados pelas curvas de potência das figuras 2 e 3, que exemplificam os modelos encontrados no mercado. A produção de energia pelos módulos fotovoltaicos é substancialmente maior e revela um custo de instalação similar ao dos aerogeradores estudados.

Um ponto a se destacar, no entanto, é que a análise da irradiação solar média, seja diariamente ou anualmente, oculta as deficiências da energia solar quanto à geração contínua de energia, uma vez que não é possível gerar energia em dias nublados ou durante a noite pelos módulos fotovoltaicos. Abaixo, é possível visualizar um gráfico da Theia Analyzer, representando os dados da geração de energia fotovoltaica da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação - UFG referentes ao dia 15 de janeiro de 2023, o mesmo dia utilizado para a análise dos ventos de Goiânia apresentado na mesma figura.



Relatórios de vento de domingo, 15 de janeiro de 2023

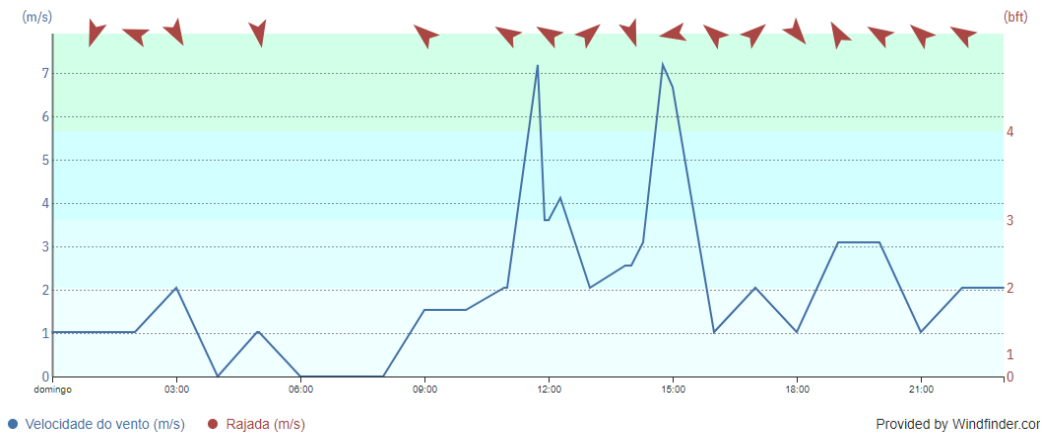


Figura 11: Relatório da geração fotovoltaica do dia 15/01/23 na EMC – UFG e de perfil de velocidade de vento em Goiânia.

Conforme observado, os módulos fotovoltaicos operaram em produção reduzida por boa parte do dia. As deficiências da geração solar representam um problema considerável para sistemas fotovoltaicos offgrid, ou seja, isolados, porque a solução disponível é o emprego de baterias que elevam muito o custo de instalação e manutenção do sistema. No entanto, a comparação entre as figuras 10 e 11 revela que a ocorrência de ventos durante os períodos de baixa operação dos módulos fotovoltaicos sugere uma complementaridade entre as duas formas de energia. E como o perfil da velocidade média mensal de Goiânia, Fig. 12, se mantém aproximadamente constante ao longo do ano, pode-se concluir que, sob condições adequadas, a produção de energia eólica na capital se manteria constante ao longo do ano.

Estatísticas mensais da velocidade e direções do vento para Aeroporto Santa Genoveva / Goiânia

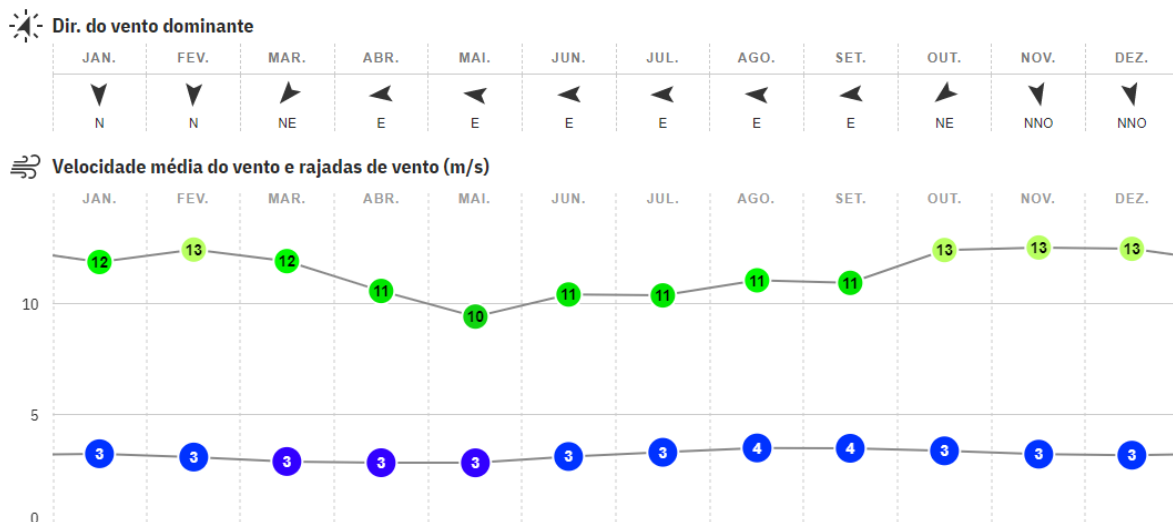


Figura 12: Perfil de velocidade do Vento: Goiânia (Windfinder, 2022).

No cenário apresentado, é possível apontar que existe potencial para uso da energia eólica como forma de energia complementar à solar, para suprir a deficiência energética em períodos sem iluminação e em regiões isoladas onde a solução por sistemas *offgrid* é muito cara, desde que o projeto dos geradores eólicos consiga atenuar a limitação existente devido à baixa velocidade dos ventos atuantes no estado de Goiás e que seja feito um estudo na região de implementação desses projetos.

5. Comparação teórica: Fotovoltaico x Eólica

Neste tópico iremos fazer uma comparação entre a energia elétrica gerada a partir de um minigerador eólico e de um módulo solar fotovoltaico, desta maneira, foi selecionado um modelo de cada matriz compatível com a maior parte dos produtos do mercado afim de se obter uma análise detalhada de cada um deles baseados em suas potências máximas, custos, densidade de potência por m² e suas respectivas áreas de ocupação.

O produto analisado da geração eólica foi a Turbina Eólica MasterX da empresa Tesup de 940 W, enquanto o gerador fotovoltaico escolhido foi o Módulo Solar Canadian Solar – Modelo CS6P 250P de 250 W. A partir disso, os dados comparativos desses dois geradores foram reunidos e expressos na Tab. 2

Comparação de Geradores		
Informações Gerais	Gerador Eólico	Módulo Solar
Dimensões (CxLxA) (m)	0,92 x 1,6 x 2,01	1,638 x 0,982 x 0,040
Área de Ocupação (m ²)	1,472	1,609
Potência máxima	940W	250W
Custo (R\$)	4200	295
Densidade de Potência (W/m ²)	638,59	155,38
Custo por Watts (R\$/W)	4,47	1,18

Tabela 2. Comparação entre as duas formas de geração

Portanto, com a análise crítica de nossos resultados obtidos, podemos perceber que os aerogeradores de pequeno porte geram muito mais energia por metro quadrado em comparação aos módulos fotovoltaicos, entretanto, seu custo é muito superior, o que acaba praticamente inviabilizando sua aplicação. Ademais, essas são as potências máximas de operação de cada um deles, devemos salientar que fatores como tempo nublado, poucos ventos e períodos noturnos podem alterar essa dinâmica de funcionamento, pois, por exemplo, o aerogerador só começa seu giro a partir de ventos de 2 m/s, velocidade média dos ventos na região em análise.

6. Conclusão e próximas etapas

Por conseguinte, após a análise detalhada de todo o estudo, fica evidente que a geração eólica distribuída no interior do estado de Goiás com os geradores que há no mercado atualmente se torna praticamente inviável ou apenas servirá como uma alternativa cara de complemento de energia. Dessa forma, a próxima etapa é o início de um projeto de estudo para a elaboração de um nano gerador de energia eólica capaz de gerar quantidades consideráveis quando em operação a baixas velocidades de vento, e levando em conta um baixo custo de construção e comercialização.

Isso decorre do fato de que na região interiorana e urbana do estado, os ventos médios são de 2 a 3 m/s, velocidades com as quais os melhores geradores eólicos atuais encontrados no mercado seriam capazes de produzir somente um pouco mais de 50W de energia, o que implicaria em um investimento financeiro muito alto para um retorno muito aquém de potência gerada.

4. REFERÊNCIAS

- ABSOLAR, 2022. “Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo”. 2 jan. 2023 <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>.
- MAP and data downloads. Global Solar Atlas, 2022. Disponível em: <<https://globalsolaratlas.info/download/brazil>>. Acesso em 5 jan. 2023
- Piccolo, A. P., Buhler, A. J., Rampinelli, G.A., 2014. “Uma abordagem sobre a energia eólica como alternativa de Ensino de tópicos de física clássica”. In Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 36, n. 4, 4306.
- TESUP, 2022. “Turbina eólica MasterX”. 3 jan. 2023 <<https://www.tesup.com.br/product-page/turbina-eolica-masterx-para-casa-Brasil>>.
- TESUP, 2022. “Turbina eólica Magnum 5”. 3 jan. 2023 <<https://www.tesup.com.br/product-page/turbina-eolica-magnum5-12v-24v-48v-5kw-Brasil>>.
- WindFinder, 2022. “Previsões de vento, velocidade do vento, tempo e mapa de vento para kite- e windsurf, vela e pesca”. 2 jan. 2023 <<https://www.windfinder.com/>>.
- Relatório de Geração Fotovoltaica EMC, 2022. Disponível em: <<http://200.137.220.91/index.htm>>. Acesso em 15 jan. 2023.