



## Avaliação do potencial eólico para a geração de energia elétrica na região da cidade de Apucarana - PR

*Evaluation of wind potential for electricity generation in the region of Apucarana – PR city*

João Donizete Delfino Junior\*, Leonardo Bruno Garcia Campanhol†, Vinicius Dario Bacon‡

### RESUMO

Este trabalho tem como objetivo investigar o potencial eólico e levantar as curvas de perfis de vento na região do município de Apucarana-PR. Para isto é estudado o Atlas do Potencial Eólico do Estado do Paraná, juntamente com a plataforma *Weather Spark*. Uma vez que estes dados apresentam a possibilidade de exploração do potencial eólico da região, realiza-se o levantamento de aerogeradores de pequeno porte disponíveis no mercado, dentro do escopo de micro e minigeração distribuída, aplicáveis a estes perfis de vento. Por fim, propõe-se uma estrutura de potência para o processamento da energia proveniente destes aerogeradores de pequeno porte. Este sistema é composto por uma ponte retificadora não controlada de seis pulsos, um conversor CC/CC *boost* controlado em corrente e responsável pelo rastreamento de máxima potência do sistema e um conversor CC/CA monofásico *full-bridge* com controle de tensão e corrente para conexão à rede elétrica. O sistema é validado por meio de simulação computacional considerando a conexão de um aerogerador de aproximadamente 6 kW, onde constata-se seu adequado funcionamento para a injeção desta potência na rede elétrica.

**Palavras-chave:** geração distribuída de energia elétrica, energia eólica, eletrônica de potência.

### ABSTRACT

This work aims to investigate the wind potential and the wind profile curves in the region around Apucarana city. Thus, the Atlas of the Wind Potential of the State of Paraná is studied, together with the *Weather Spark* platform. Once these data present the possibility of exploring the region's wind potential, a survey of small wind turbines available on the market is carried out, within the micro and distributed mini-generation scope, applicable to these wind profiles. Finally, a power structure for the processing of energy from these small wind turbines is proposed. This system is composed of an uncontrolled six-pulse rectifier bridge, a DC/DC boost converter controlled in current and responsible for the system maximum power point tracking and a full-bridge single-phase DC/AC converter with voltage and current control for connection to the electrical network. The system will undergo validation through computer simulation considering the connection of an approximately 6 kW wind turbine, where it is verified its proper functioning for the injection of this power in the electrical network.

**Keywords:** distributed generation of electric power, wind power, power electronics.

\* Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, Paraná, Brasil; [joaojunior.1997@alunos.utfpr.edu.br](mailto:joaojunior.1997@alunos.utfpr.edu.br)

† Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Apucarana; [campanhol@utfpr.edu.br](mailto:campanhol@utfpr.edu.br)

‡ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, Paraná, Brasil; [viniciusbacon@utfpr.edu.br](mailto:viniciusbacon@utfpr.edu.br)



## 1 INTRODUÇÃO

Com o aumento significativo das discussões a respeito da sustentabilidade e meio ambiente, há uma crescente busca pela utilização de energias renováveis (BÚRIGO, 2016, p.1). Segundo dados disponibilizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) do Ministério de Minas e Energia, referente ao ano de 2020, a matriz energética brasileira é composta em 48,4% por fontes de energia renováveis (Empresa de Pesquisa Energética, 2021). No entanto, a matriz elétrica ainda é bastante dependente dos recursos hídricos, representado 58,8% da potência instalada (ABEEÓLICA, 2020, p.4). A energia eólica ocupa a segunda posição 10,1%.

A energia eólica vem amplamente conquistando o mercado nos últimos anos devido ao seu baixo impacto ambiental, reduzido tempo para a implementação e operacionalização de turbinas eólicas, bem como custos mais atrativos (KREMES, 2016, p.25). Estudos técnicos e mapas eólicos desenvolvidos pelo Centro Brasileiro de Energia Eólica indicam que os perfis de ventos brasileiros possuem grande capacidade para a geração de energia elétrica, por apresentarem comportamentos uniformes e com velocidade adequada para geração eólica. No entanto, em alturas de até 100 m, o vento é fortemente influenciado pelas condições de relevo, rugosidade do terreno e a presença de obstáculos. Para se utilizar adequadamente o recurso eólico da área de interesse, é de extrema importância a medição do potencial eólico desta região (PAVINATTO, 2005, p.9; SCHULTZ et al, 2007, p.11).

Todavia, ao avaliar os dados do quantitativo de instalações em sistemas de geração distribuída (GD), constata-se que os sistemas eólicos não apresentam uma participação tão expressiva. Conforme informações disponibilizadas em (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2021), atualmente há 533.786 unidades de GD instaladas no Brasil. Deste montante, apenas 69 unidades utilizam a cinética do vento (sistemas eólicos) como fonte de geração, contra 533.376 que utilizam a radiação solar (sistemas fotovoltaicos). Isso mostra que, no Brasil, a expansão dos sistemas eólicos vem acontecendo predominantemente em instalações elétricas de grandes parques eólicos em sistemas de geração centralizada. Neste cenário, surge a seguinte questão: “A região de Apucarana-PR possui potencial eólico para a geração de energia elétrica através de unidades GD?”

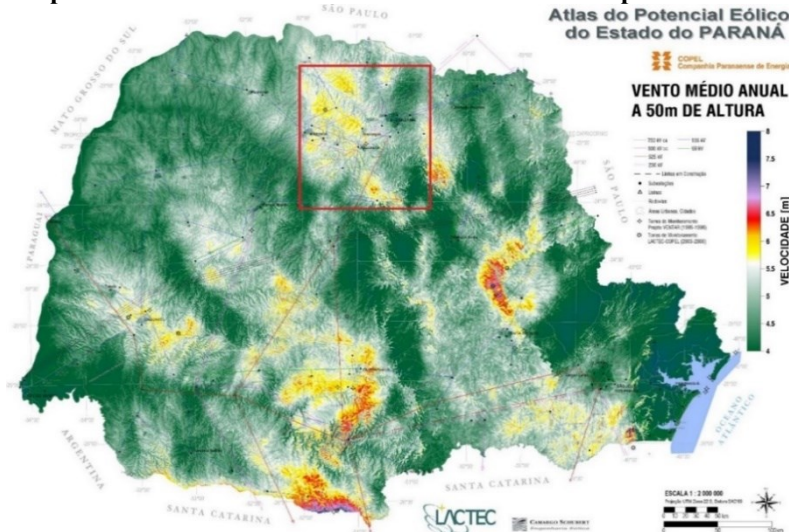
Diante de tal contexto, presente trabalho visa avaliar a viabilidade de utilização de sistemas eólicos na geração de energia em instalações de geração distribuída na região de Apucarana, bem como desenvolver e implementar, via *software*, um adequado sistema para processamento ativo de energia proveniente de aerogeradores de pequeno porte.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para estudar a potencial eólico da região de Apucarana-PR, o Atlas do Potencial Eólico do Estado do Paraná foi consultado. A Fig. 1 apresenta o mapa da velocidade média anual do vento para uma altura de 50 m. Observando a região de Apucarana, destacada em vermelho, nota-se que em algumas áreas (em amarelo) a velocidade do vento pode chegar em até 6 m/s.

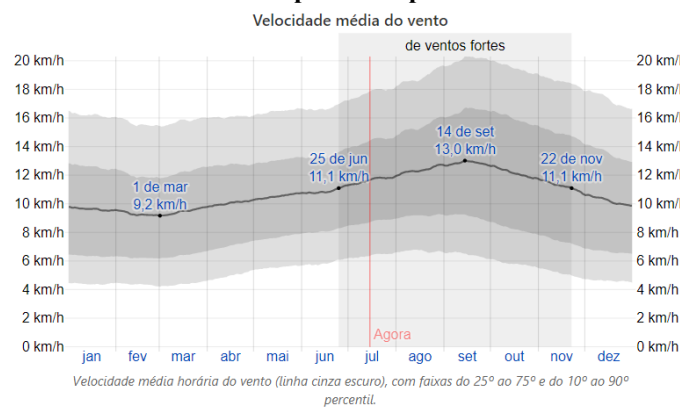
Uma vez que aerogeradores de pequeno porte são normalmente aplicados em alturas de aproximadamente 10 m, foi utilizada a plataforma online *Weather Spark* para complementar os estudos. Através do gráfico da Fig. 2, observa-se um pico médio máximo anual de 13 km/h (3,61 m/s) e uma velocidade média mínima de 9,2 km/h (2,56 m/s).

**Figura 1 – Mapa da velocidade média anual do vento no Paraná para uma altura de 50 m**



Fonte: SCHULTZ et al (2007, p.43)

**Figura 2 – Velocidade do vento em Apucarana para uma altura de 10 m para 2020**



Fonte: WEATHER SPARK (2020)

Os dados apresentados na Fig. 1 são obtidos através da combinação de medidas anemométricas e modelos digitais de terreno, aplicados a um modelo numérico denominado MesoMap (SCHULTZ et al, 2007, p.17). Na Fig. 2, os dados são oriundos do método conhecido como Análise Retrospectiva da Era Moderna (WEATHER SPARK, 2020). Neste caso, há a combinação de diversas medições de uma área ampla em um modelo meteorológico global de última geração, resultando na reconstrução de um histórico das condições meteorológicas da região.

Embora os dados apresentados indiquem a possibilidade de exploração do potencial eólico desta região, o uso de modelos matemáticos resulta em uma incerteza sobre o perfil do vento em regiões mais específicas. Deste modo, as nuances de cada localidade devem ser consideradas e uma leitura anemométrica mais precisa realizada. Todavia, considerando os valores médios de velocidade do vento avaliados, pode-se levantar aerogeradores comerciais aplicáveis a tais perfis de vento. A Tab. 1 apresenta alguns modelos com potencial de operação disponibilizados pela empresa Enersud. Embora a velocidade média na região de Apucarana não atinja o suficiente para que os aerogeradores forneçam a potência nominal continuamente, o potencial eólico é suficiente para que as turbinas rotacionem constantemente.

**Tabela 1 – Aerogeradores de pequeno porte aplicáveis à região de Apucarana**

Empresa	Modelo	Diâmetro de Hélice (m)	Velocidade de Partida (m/s)	Velocidade Nominal (m/s)	Potência Nominal (W)	Sistema Elétrico	Tensão de Saída (V)
Enersud	Gerar 246	2,46	2	12,5	1000	Trifásico	24/48/220/400
Enersud	Gerar Extreme	2,46	2,2	13	1200	Trifásico	12/24/48
Enersud	Verne 555	5,55	2,2	12,5	6000	Trifásico	120/240/400

Fonte: Autoria própria (2021)

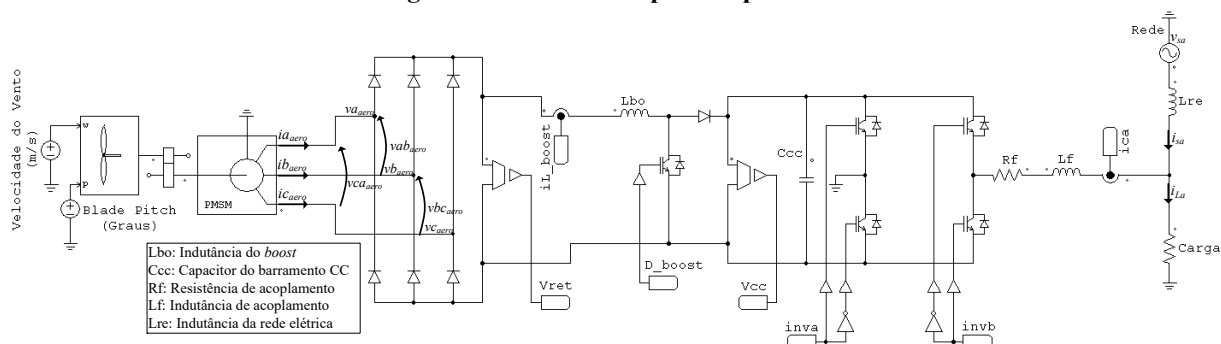
A topologia do sistema proposto para conexão de aerogeradores de pequeno porte à rede elétrica consiste em uma ponte retificadora trifásica não controlável de seis pulsos, um conversor CC-CC *boost* e um inversor monofásico *full-bridge*. Esta estrutura tem por objetivo a simplicidade e baixo custo para implementação.

O retificador de seis pulsos é responsável por gerar o barramento CC dada a tensão trifásica fornecida pelo aerogerador, assim compondo o primeiro estágio do sistema. No segundo estágio, o conversor *boost*, controlado em corrente, visa extrair a máxima potência fornecida pelo aerogerador utilizando um algoritmo de MPPT (*Maximum Power Point Tracking*). O terceiro estágio consiste no inversor monofásico *full-bridge* com controle de tensão no barramento CC e controle de corrente para assim realizar a sincronia com a rede elétrica com o auxílio de um sistema PLL (*Phase-Locked Loop*).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Fig. 3 descreve o sistema completo implementado via *software PSim*. Para a simulação considerou-se um aerogerador capaz de fornecer cerca de 6 kW de potência.

**Figura 3 – Sistema completo implementado**



Fonte: Autoria própria (2021)

Na Fig. 4 são apresentados os resultados para uma incidência de vento com velocidade para potência nominal, 12,5 m/s, e considerando a presença de uma carga na rede elétrica que consome metade da potência.

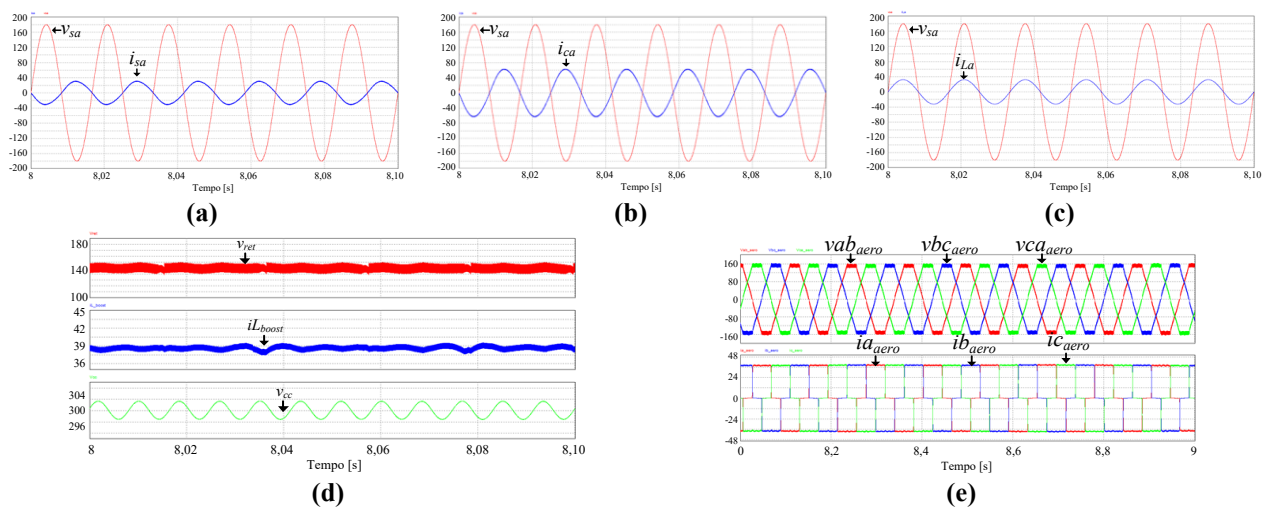
Nas Figs. 4(a) e 4(c) as correntes da rede ( $i_{sa}$ ) e da carga ( $i_{La}$ ) possuem um valor eficaz de cerca de 22,77 A, enquanto a corrente do inversor ( $i_{ca}$ ), conforme Fig. 4(b), apresenta 44,37 A de corrente eficaz. Isto denota que o sistema está alimentando a carga e injetando o excedente na rede elétrica, indicado por  $v_{sa}$  estar em contra fase com  $i_{ca}$ . Já na Fig. 4(d) tem-se que a tensão retificada ( $v_{ret}$ ) apresenta um valor de



aproximadamente 150,8 V. A corrente média no indutor do boost ( $i_{L_{boost}}$ ) é de 38,56 A e a tensão média do barramento CC ( $v_{CC}$ ) do inversor é 300,11 V, com ondulação de  $\pm 3,36$  V. As tensões  $v_{ab_{aero}}$ ,  $v_{bc_{aero}}$ ,  $v_{ca_{aero}}$  e correntes  $i_{a_{aero}}$ ,  $i_{b_{aero}}$ ,  $i_{c_{aero}}$  fornecidas pelo aerogerador são apresentadas na Fig. 4(e).

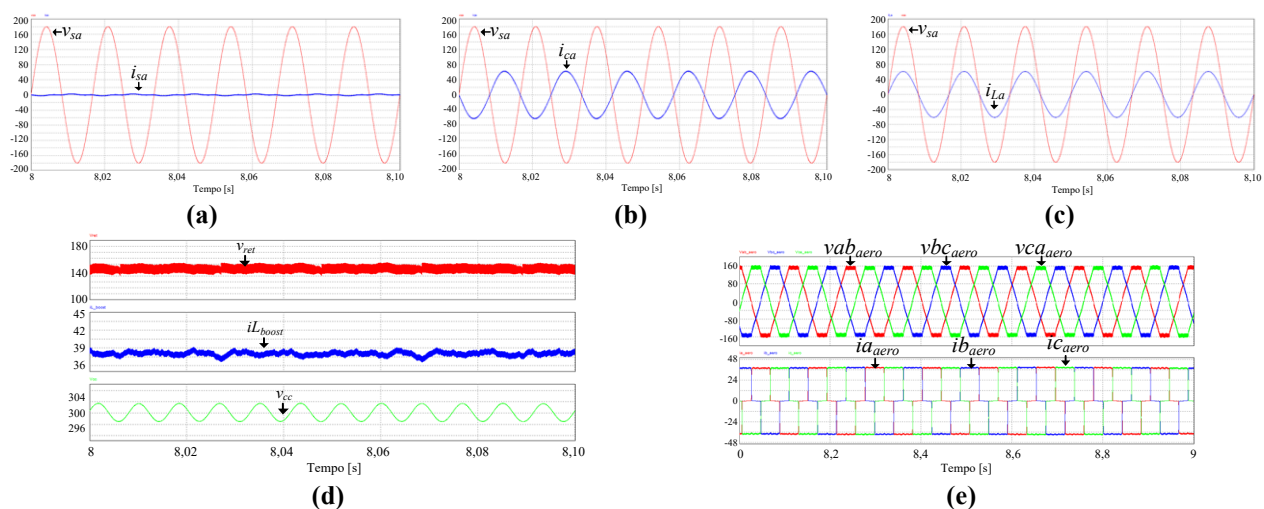
Quando uma carga, capaz de consumir o equivalente à potência nominal de geração, é adicionada ao sistema (Fig. 5), toda a corrente  $i_{ca}$  segue para a carga enquanto a  $i_{sa}$  fica em torno de zero. Uma vez que não foram modificados parâmetros referentes ao modelo de aerogerador e conversores, nota-se que a corrente  $i_{ca}$ , tensão  $v_{ret}$ , corrente  $i_{L_{boost}}$ , tensão  $v_{CC}$ , tensões  $v_{ab_{aero}}$ ,  $v_{bc_{aero}}$ ,  $v_{ca_{aero}}$  e correntes  $i_{a_{aero}}$ ,  $i_{b_{aero}}$ ,  $i_{c_{aero}}$  não sofreram alterações, demonstrando que o sistema se comporta corretamente dada as variações de carga.

**Figura 4 – Resultados do sistema com carga consumindo cerca de metade da potência nominal: (a) tensão e corrente da rede; (b) tensão da rede e corrente do inversor; (c) tensão da rede e corrente da carga; (d) tensão retificada, corrente no indutor do boost e tensão no barramento CC; (e) tensões e correntes do retificador**



Fonte: Autoria própria (2021)

**Figura 5 – Resultados do sistema com carga consumindo a potência nominal: (a) tensão e corrente da rede; (b) tensão da rede e corrente do inversor; (c) tensão da rede e corrente da carga; (d) tensão retificada, corrente no indutor do boost e tensão no barramento CC; (e) tensões e correntes do retificador**



Fonte: Autoria própria (2021)



## 4 CONCLUSÃO

Com o auxílio do mapa do potencial eólico do estado do Paraná, juntamente com os dados obtidos pela plataforma Weather Spark, levantou-se os perfis de vento na região de Apucarana-PR. Tendo em mãos estes dados, levantou-se aerogeradores de pequeno porte comerciais com potencial de geração na região delimitada e um sistema para realizar sua conexão à rede elétrica foi proposto.

O sistema de conexão foi validado através de uma implementação via *software*, considerando um aerogerador com características semelhantes aos encontrados comercialmente. Tal sistema foi capaz de realizar a extração da potência gerada bem como sincronizá-la e injetá-la na rede elétrica.

## REFERÊNCIAS

- ABEEÓLICA. **Boletim anual de geração eólica 2020**. 2021. Disponível em: <http://abeeolica.org.br/dados-abeeolica/>. Acesso em: 10 de jul. de 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Geração distribuída**. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>. Acesso em: 10 de jul. de 2021.
- BÚRIGO, Lucas Rocha. **Estudo de um sistema para conexão de aerogeradores de pequeno porte com a rede elétrica**. 2016. 211f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco energético nacional 2021**: Relatório síntese/ Ano base 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>. Acesso em: 13 de jul. de 2021.
- KREMES, William de Jesus. **Retificador bridgeless SEPIC PFC com rastreamento de máxima potência para processar energia elétrica de um sistema eólico de pequeno porte**. 2016. 234f. Dissertação de Mestrado – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2016.
- PAVINATTO, Eduardo Fiorini. **Ferramenta para auxílio à análise de viabilidade técnica da conexão de parques eólicos à rede elétrica**. 2005. 173f. Tese de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- SCHULTZ, Dario Jackson. et al. **Atlas do Potencial Eólico do Estado do Paraná**. Curitiba, 2007.
- WEATHER SPARK. **Condições meteorológicas médias de Apucarana**. Disponível em: <https://pt.weatherspark.com/y/29743/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Apucarana-Brasil-durante-o-ano>. Acesso em: 14 de jul. de 2021.