

# Microgeração Eólica Embarcada para Aerogeradores com Aerofólios Cabeados

Leonardo F. Martins Marcelo L. C. de Oliveira  
Alexandre Trofino

*Departamento de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, 88040-900, Florianópolis/SC, Brasil.*

Emails: leonardo.fpmm@posgrad.ufsc.br, marcelo.lellis@ufsc.br, alexandre.trofino@ufsc.br

**Abstract:** This paper presents the design of a micro wind turbine to be embedded in the flight unit of an innovative Airborne Wind Energy (AWE) system. More specifically, it is considered the *pumping kite* configuration, which consists basically of a tethered wing (airfoil), a flight unit and a ground unit. The purpose of the microgenerator is to keep the battery pack charged in order to power the loads in the flight unit: two servomotors, a microcontroller, sensors and peripheral devices. Currently the flight unit power supply depends solely on such battery pack, thus limiting the operating autonomy of the AWE system to a few hours. The idea is to have the microturbine harvesting some of the power available in the strong apparent wind on the flight unit in order to keep the batteries charged, thus allowing for an unlimited autonomy. A Power Signal Feedback (PSF) strategy is used to track the microturbine maximum power point. Results of wind tunnel tests, used to identify the open loop system model, are discussed. In these experiments it was obtained around 28 W at 19 m/s of wind speed.

**Resumo:** Neste artigo é apresentado o projeto de um microgerador eólico a ser embarcado na unidade de voo de um aerogerador baseado na tecnologia inovadora *Airborne Wind Energy*. O aerogerador considerado é do tipo *pumping kite*, o qual consiste basicamente de um aerofólio cabeado, uma unidade de voo e uma de solo. O objetivo do microgerador é realizar o carregamento de um *pack* de baterias que, por sua vez, alimenta as cargas presentes na unidade de voo: dois servomotores, um microcontrolador, sensores e periféricos. Atualmente a unidade de voo depende exclusivamente desse *pack* de baterias, o que confere uma autonomia limitada a algumas horas de operação do aerogerador. A ideia é que o microgerador aproveite o forte vento aparente que incide na unidade de voo para manter as baterias carregadas, tornando a autonomia ilimitada. É aplicada a técnica *Power Signal Feedback* (PSF) para o rastreamento do ponto de máxima potência do microgerador. São apresentados resultados de testes de malha aberta, em túnel de vento, para a identificação do modelo do sistema. Nesses experimentos o microgerador atingiu uma potência em torno de 28 W a uma velocidade do vento em 19 m/s.

**Keywords:** Airborne Wind Energy; Wind power microturbine; Maximum power point tracking; System identification.

**Palavras-chave:** Energia eólica com aerofólios cabeados; Microgerador eólico; Rastreamento do ponto de máxima potência; Identificação de sistemas.

## 1. INTRODUÇÃO

A exploração cada vez mais expressiva de fontes renováveis de energia busca conciliar a minimização do impacto ambiental com a maximização da viabilidade econômica. Esta, por sua vez, depende de fatores como a eficiência na extração e conversão da energia, além dos custos de desenvolvimento, produção, operação e manutenção dos sistemas geradores. Buscando atender a esses requisitos, a tecnologia de energia eólica com aerofólios cabeados, mais conhecida pela sigla em inglês AWE (*Airborne Wind Energy*), tem sido objeto recorrente de pesquisas na academia e indústria nos últimos dez anos. A tecnologia AWE

se baseia no uso de dispositivos capazes de se manter no ar por forças aerodinâmicas ou aerostáticas enquanto capturam parte da energia cinética do vento. Tais dispositivos são presos ao solo por meio de um ou mais cabos, em substituição à torre de um aerogerador convencional e, portanto, conseguem aproveitar ventos em altitudes maiores, que tendem a soprar com mais força em uma parte maior do tempo, caracterizando um potencial energético maior (Cherubini et al., 2015). Outra vantagem da tecnologia AWE sobre a convencional é a redução dos custos de material e transporte do aerogerador devido à eliminação de volumosos e pesados componentes como a torre. Acredita-se também que o processo de instalação seja bem mais rápido e barato, pois o gerador elétrico pode ser instalado no solo e a fundação para ancoragem do cabo torna-se mais

\* Este trabalho foi apoiado pela CAPES, CNPq e FAPESAM.

simples. Finalmente, acredita-se que, como a manutenção do aerogerador pode ser feita completamente no solo, os respectivos custos sejam também menores (Oliveira, 2016).

Dentre as dezenas de grupos de P&D ao redor do mundo dedicados à tecnologia AWE está o UFSCkite, criado em 2012 na Universidade Federal de Santa Catarina em Florianópolis. O grupo optou pelo conceito de aerogerador AWE do tipo *pumping kite* com aerofólio flexível (“parapente” de voo livre ou “pipa” de *kitesurf*), motivado pelos baixos custos de material e desenvolvimento frente a outras abordagens. O *pumping kite* desenvolvido pelo UFSCkite consiste basicamente de uma asa (aerofólio) flexível, uma unidade de voo e uma de solo, conforme ilustrado na Fig. 1. A unidade de solo abriga um gerador elétrico de 12 kW, conectado a um carretel no qual o cabo de tração é enrolado. Na sua outra extremidade, este cabo está conectado ao aerofólio através da unidade de voo, a qual é responsável pelo controle de voo. Energia é gerada pelo desenrolamento do cabo sob alta tração enquanto o aerofólio se afasta da unidade de solo. Após um certo tempo, o aerofólio é reconfigurado para tracionar menos o cabo, o qual então é recolhido rapidamente com um pequeno gasto energético. Assim, ao final da fase de recolhimento o ciclo de operação (*pumping cycle*) é finalizado com um saldo energético positivo, e um novo ciclo se inicia (Oliveira, 2016). A otimização da trajetória de voo é fundamental para a maximização da potência média gerada no ciclo, conforme investigado por exemplo por Venegas (2017).

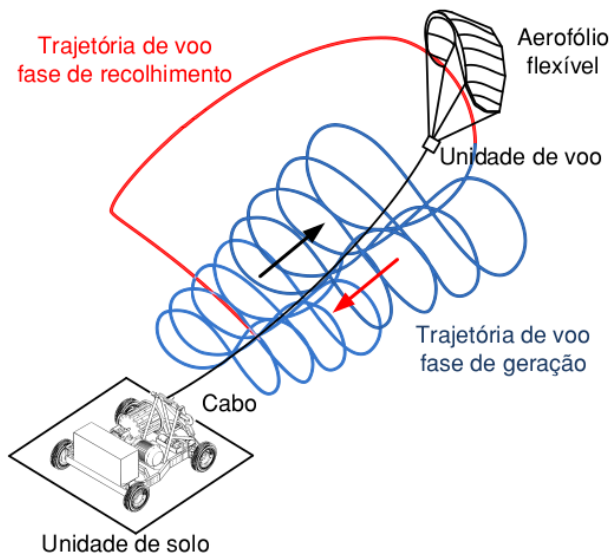


Figura 1. Aerogerador AWE do tipo *pumping kite* em desenvolvimento no UFSCkite. Fonte: Araujo (2017).

O controle de voo é realizado pela variação antissimétrica no comprimento de dois cabos de comando, conectados ao bordo de fuga (parte “traseira”) do aerofólio. Em sua outra extremidade, estes cabos são conectados a dois servomotores embarcados na unidade de voo. Na Fig. 2 é mostrado o projeto em CAD da unidade de voo do projeto UFSCkite, em que os servomotores correspondem aos cilindros dispostos longitudinalmente na parte direita da estrutura. O arranjo com atuadores em voo próximos ao aerofólio oferece um melhor desempenho do sistema de controle em relação à disposição dos atuadores no

solo, minimizando o atraso no sinal de atuação<sup>1</sup> devido ao comprimento muito menor dos cabos (Oliveira, 2016). Em contrapartida, é necessário fornecer energia para os servomotores e demais componentes eletro-eletrônicos na unidade de voo. O uso de baterias agrega peso indesejável e, por maior que seja sua capacidade, limita a autonomia na operação do aerogerador a algumas horas, o que é inconcebível para uma solução comercial que deve operar ininterruptamente enquanto houver condições propícias.

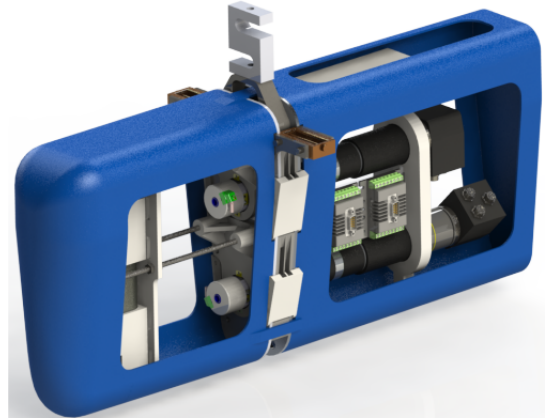


Figura 2. Projeto em CAD da unidade de voo do projeto UFSCkite. Fonte: original.

Uma das alternativas para o problema de alimentação da unidade de voo é a utilização de fios condutores inseridos no cabo de tração. Porém, esta solução torna o cabo mais denso e grosso, reduzindo a eficiência do sistema AWE, além de encarecer o componente e introduzir a necessidade de contatos deslizantes na unidade de solo devido ao (des)enrolamento do cabo durante a operação do aerogerador. Outra estratégia, a qual foi adotada pelo UFSCkite por aparentar ser a mais vantajosa, é acoplar um microgerador eólico à unidade de voo. Desta forma aproveita-se o elevado vento aparente devido à velocidade do aerofólio – ao redor de 100 km/h durante a fase de geração – para gerar, de forma local, picos de até 60 W de potência, necessários para alimentar os servomotores, sensores, microcomputador embarcado (*Raspberry Pi*) e demais componentes eletrônicos da unidade de voo.

Neste contexto, o presente trabalho visa apresentar o desenvolvimento de um microgerador embarcado na unidade de voo de um aerogerador AWE do tipo *pumping kite*. O restante do artigo está estruturado da seguinte maneira: na Seção 2 é apresentada uma fundamentação teórica quanto à geração eólica com turbinas de eixo horizontal. Na Seção 3 alguns algoritmos de MPPT encontrados na literatura são abordados. A proposta de solução para o problema de microgeração embarcada é detalhada na Seção 4. A seguir, na Seção 5 são apresentados resultados de experimentos em túnel de vento para identificação do sistema em malha aberta. O artigo é concluído na Seção 6 com um resumo e perspectivas de trabalhos futuros.

<sup>1</sup> Fenômeno conhecido na área de sistemas de controle como “atraso de transporte”.

## 2. FUNDAMENTOS DA GERAÇÃO EÓLICA

Há inúmeros estudos relacionados ao aproveitamento da energia eólica, muitos dos quais utilizam princípios de mecânica dos fluidos e aerodinâmica. A Fig. 3 apresenta o esquema de distribuição de forças em uma turbina de eixo horizontal, alinhada com a direção do vento. As forças radial ( $F_1$ ) e axial ( $F_2$ ) dependem, além da velocidade do vento ( $v_w$ ), de aspectos construtivos das pás e de parâmetros de operação como o ângulo de inclinação/*pitch* ( $\theta$ ) das pás (Johnson, 2006). Estes fatores influenciam a energia mecânica extraída do vento pela turbina ( $P_m$ ), a qual pode ser expressa em função do coeficiente de potência ( $C_p$ ) como

$$P_m = C_p \left( \frac{1}{2} \rho A v_w^3 \right) = C_p P_w, \quad (1)$$

em que  $P_w$  é a potência disponível no vento na seção transversal varrida pelas pás,  $\rho$  é a densidade volumétrica do ar e  $A$  é a área varrida pelas pás no plano de rotação. O coeficiente  $C_p$  varia em função de  $v_w$ ,  $\theta$  e da velocidade angular da turbina ( $\omega$ ). Assim, o objetivo geral nos aerogeradores é maximizar  $C_p$  enquanto a potência nominal do sistema não for atingida.

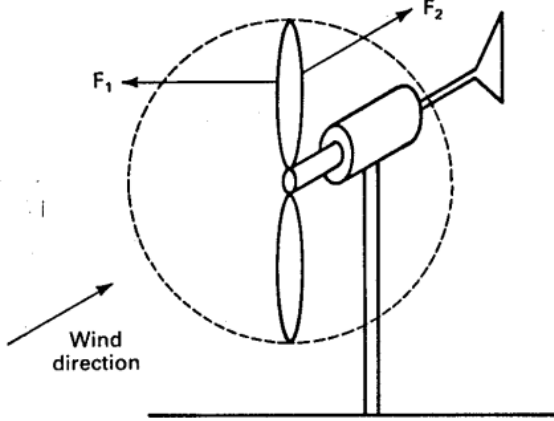


Figura 3. Forças radial ( $F_1$ ) e axial ( $F_2$ ) em um aerogerador de eixo horizontal. Fonte: Johnson (2006).

Um modelo de interesse em sistemas de energia em geral é aquele que representa a (máxima) potência gerada pelo sistema em função da intensidade da fonte primária – no caso da energia eólica, caracterizada pela velocidade do vento. O levantamento de tal modelo estático, geralmente conhecido como “curva de potência” do aerogerador, requer medições sob condições ideais, como a planicidade do local onde um aerogerador baseado em torre está instalado e um baixo nível de turbulência no vento (Papadopoulos, 2018). Conhecendo-se o máximo valor de  $P_m$  em função de  $v_w$  em (1), é possível elaborar algoritmos de maximização de potência baseados em modelo.

O levantamento da curva de potência, exemplificada na Fig. 4, é padronizado pela IEC (2005), que estabelece a medição do desempenho de turbinas eólicas. Na literatura há alguns estudos relativos ao levantamento da curva de potência de aerogeradores. Por exemplo, Quintas et al. (2017) submeteu um microgerador a testes em túnel de vento com velocidades de até 12 m/s, gerando em torno

60 W. O objetivo principal de Quintas et al. (2017) foi realizar o levantamento da curva de potência do sistema em função da velocidade do vento com o uso de uma carga resistiva na saída do circuito de geração.

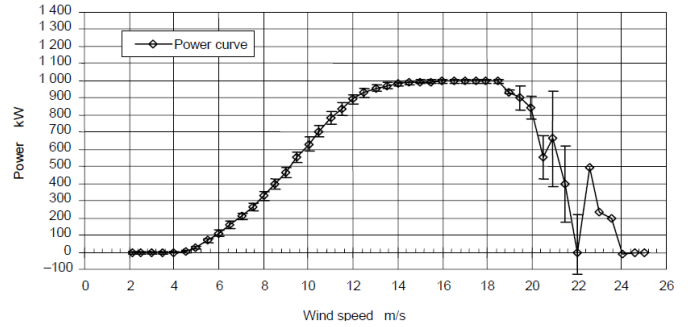


Figura 4. Exemplo de curva de potência de um aerogerador. Fonte: IEC (2005).

No presente projeto, a ideia é submeter o microgerador eólico a testes em túnel de vento, aplicando-se uma carga resistiva na saída de tensão retificada do gerador com o intuito de medir a potência gerada. Com isto, o coeficiente de potência pode ser calculado, uma vez que se conhece a velocidade do vento. Por exemplo, na Fig. 5 é apresentada a curva de  $C_p$  correspondente ao aerogerador cuja curva de potência foi mostrada na Fig. 4. Note que para velocidades do vento abaixo de 4 m/s não vale a pena operar o sistema, uma vez que ele consumiria potência ( $C_p$  negativo).

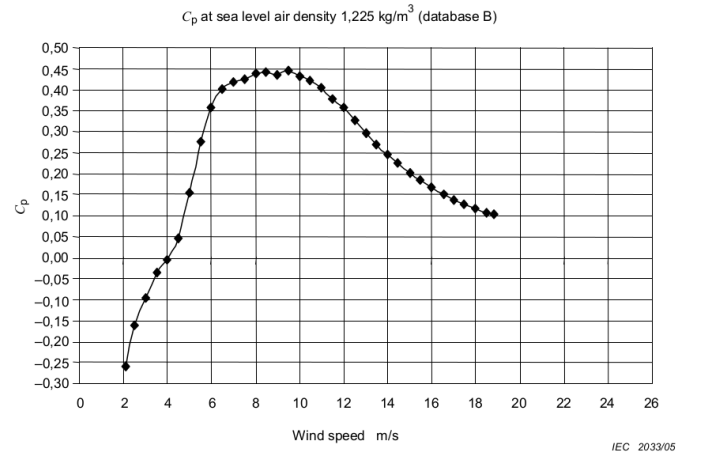


Figura 5. Exemplo de curva de coeficiente de potência de um aerogerador. Fonte: IEC (2005).

## 3. ALGORITMOS DE MPPT

A maximização da potência em sistemas de energia pode ser realizada utilizando-se algoritmos do tipo MPPT (do inglês, *Maximum Power-Point Tracking*), como o fizeram Caixeta et al. (2011) para o caso de uma turbina eólica, e Trivedi and Patel (2018), para um sistema híbrido eólico-solar, a nível de simulação. Nessa pesquisa foram utilizadas medidas de tensão e corrente nos terminais de um retificador trifásico, enquanto o controle de velocidade do rotor foi feito através do chaveamento de um conversor *boost*. Na literatura encontram-se diversas alternativas de algoritmos MPPT para o aproveitamento de energias

renováveis, os quais podem ser classificados de acordo com a Fig. 6.

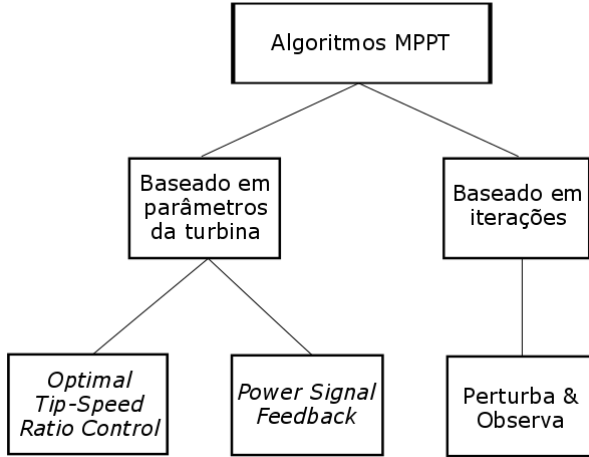


Figura 6. Classificação dos algoritmos de MPPT. Fonte: Original.

### 3.1 Perturba & Observa

Este algoritmo apresenta uma implementação relativamente simples, uma vez que não há a necessidade de identificação de parâmetros do modelo da planta. Lahfaoui et al. (2016) implementaram a técnica “perturba & observa” (P&O) para a otimização da operação de um gerador eólico submetido a testes em túnel de vento. Os resultados atestam que o algoritmo, embarcado em um microcontrolador Arduino, obteve sucesso no rastreamento da máxima potência ao variar-se a velocidade do vento.

Na literatura ainda há poucos trabalhos relacionados ao desenvolvimento de um sistema de microgeração embarcada em uma unidade de voo de um aerogerador AWE. Por exemplo, Roza (2018) testou a técnica de MPPT do tipo P&O tanto em simulações computacionais quanto em testes em túnel de vento com protótipo. Experimentos realizados com uma carga de bateria de 24 V demonstraram uma baixa eficiência do sistema de geração, uma vez que a técnica P&O é mais adequada para aplicações em que as perturbações atuam lentamente no sistema, a exemplo da irradiação solar em sistemas fotovoltaicos. Este não é o caso da microgeração em AWE, na qual o vento aparente (que incide na microturbina) pode variar algumas dezenas de km/h em poucos segundos, em função da trajetória de voo na fase de geração. Na Fig. 7 é apresentado um gráfico comparativo entre a potência gerada com a técnica P&O ( $P_o$ ), a potência em malha aberta ( $P_{o_{open}}$ ) e a potência máxima esperada ( $P_{o_{max}}$ ) obtidas por Roza (2018). Passados cerca de dois minutos e após quatro degraus sucessivos na velocidade (conhecida) do vento, o sistema deveria fornecer uma potência máxima em torno de 25 W, porém conseguiu-se gerar apenas cerca de 16 W com a técnica P&O.

### 3.2 Power Signal Feedback

Outra técnica de MPPT é a *Power Signal Feedback (PSF)*, que, diferentemente da P&O, depende de um modelo identificado do aerogerador e de medições dos sinais de

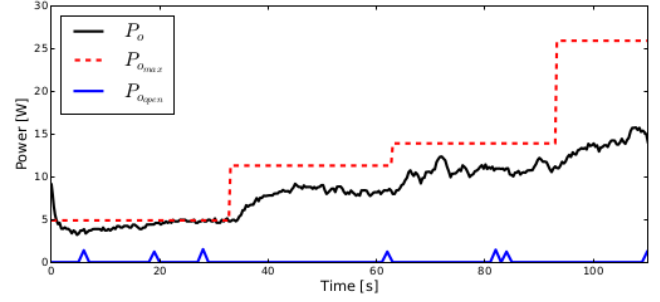


Figura 7. Rastreamento de potência com a técnica PO. Fonte: Fonte: Roza (2018).

corrente ( $I$ ) e tensão ( $U$ ) retificados. O algoritmo também utiliza a medição da velocidade angular do rotor ( $\omega$ ) para determinar a potência mecânica ótima, segundo a função

$$P_{m_{opt}} = k_{opt} \omega^3, \quad (2)$$

em que  $k_{opt}$  deve ser ajustado. Considerando a eficiência  $\eta$  na conversão de potência mecânica em elétrica, a potência elétrica ótima é

$$P_{e_{opt}} = \eta P_{m_{opt}} = \eta k_{opt} \omega^3, \quad (3)$$

o que permite calcular uma corrente de referência:

$$I_{ref} = \frac{P_{m_{opt}}}{U}. \quad (4)$$

Tal valor de referência é utilizado por uma malha de controle de corrente com o intuito de rastrear o ponto de máxima potência do aerogerador. A função  $P_{e_{opt}}(\omega)$  corresponde à ligação dos pontos de máximo em curvas de potência para diferentes valores de  $v_w$ , conforme exemplo apresentado na Fig. 8.

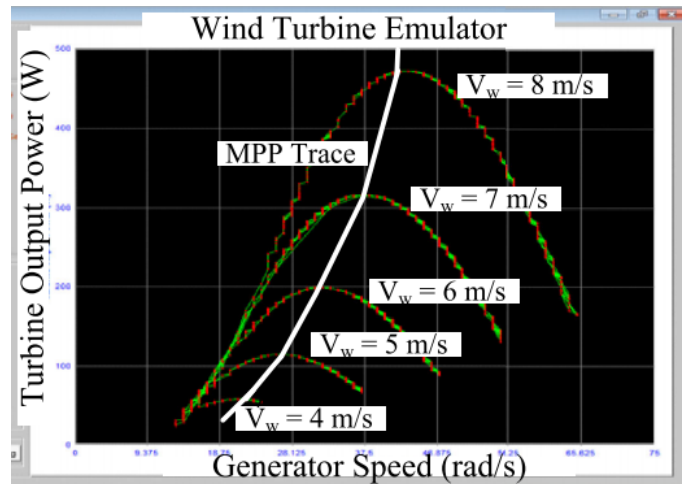


Figura 8. Exemplo de curva de MPPT obtida por simulação. Fonte: Hussain and Mishra (2016).

O diagrama de blocos na Fig. 9 mostra o sistema de controle em malha fechada da técnica PSF com a incorporação de uma bateria à saída do sistema. Um aspecto importante para o adequado rastreamento do ponto de máxima potência é



a consideração da eficiência  $\eta$  na conversão da potência mecânica em elétrica pelo microgerador.

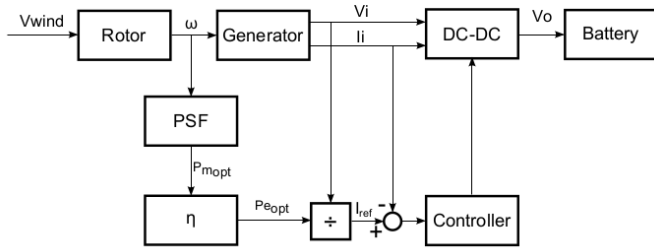


Figura 9. Diagrama de blocos da técnica PSF. Fonte: Roza (2018).

Por ser uma técnica que tem se mostrado relativamente eficaz e simples, requerendo uma infraestrutura de sensoriamento, controle e atuação de baixo custo, neste trabalho optou-se pela PSF para a maximização da potência do microgerador.

#### 4. SOLUÇÃO PROPOSTA

O sistema de microgeração proposto é composto por uma turbina de eixo horizontal, cujo rotor possui 18 cm de diâmetro (conjunto *nacelle* e pás), acoplada a um gerador AC de ímãs permanentes com 425 W de potência nominal, 48 V de tensão nominal e velocidade máxima de 19.756 RPM. Este gerador, que já possui um *encoder* óptico de 1024 pulsos por revolução, foi escolhido com base na estimativa de consumo de potência com picos de 60 W, com uma ampla margem de segurança. Foi desenvolvido um estágio de leitura dos sinais de tensão e corrente gerados a partir de um sistema de aquisição de dados baseado em microcontrolador para sensoriamento e controle. Uma solução similar para a mesma aplicação foi proposta por Kieboom (2017), que utilizou uma microturbina eólica com diâmetro de 30 cm e pás com perfil (aerofólio) do tipo NACA4418.

O protótipo desenvolvido para a presente pesquisa, que utiliza a técnica PSF, é apresentado na Fig. 10. O sinal de potência do gerador passa por um estágio de retificação seguido por um conversor *buck-boost* o qual, em sua outra extremidade, está conectado a um banco de baterias. Tal banco atua como um acumulador de energia, compatibilizando variações transitórias no consumo e geração de energia na unidade de voo. O nível de carga/tensão das baterias é monitorado de tal forma que, quando completamente carregadas, a energia (excedente) gerada é dissipada em um resistor de proteção.

Os principais componentes da solução proposta e seus respectivos custos de aquisição são apresentados na Tabela 1. Os valores são expressos em dólares, de acordo com uma média de preços no mercado internacional. Convém destacar que, em um cenário de comercialização desta tecnologia, espera-se que os custos sejam reduzidos, em particular os da *nacelle* e do próprio gerador.

##### 4.1 Identificação do Modelo

O levantamento das curvas de potência para distintos valores de  $v_w$  se faz necessário para o ajuste de  $k_{opt}$  no modelo (3), considerado na técnica PSF. Para tal, foram realizados

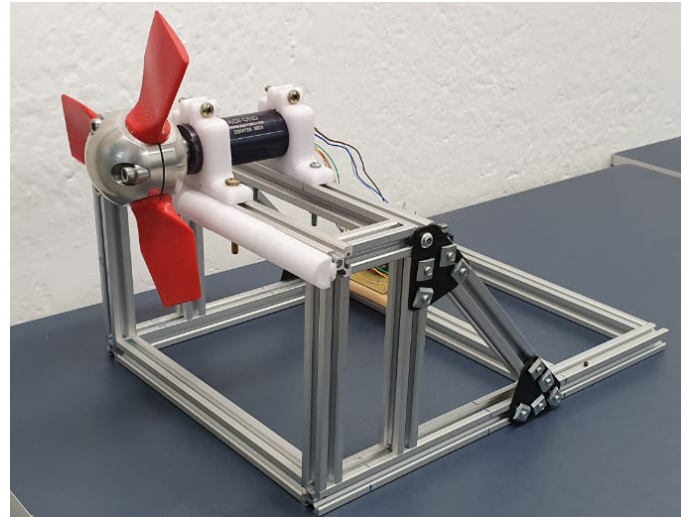


Figura 10. Estrutura para testes do microgerador eólico em túnel de vento. Fonte: original.

Tabela 1. Principais componentes do microgerador proposto. Fonte: Original

| Componente          | Especificação         | Preço (US\$)         |
|---------------------|-----------------------|----------------------|
| Placa de Aquisição  | Arduino Nano          | 11,00                |
| Sensor de corrente  | ACS712-5A             | 1,00                 |
| Sensor de tensão    | Resistivo - 0 a 25Vcc | 0,79                 |
| Ponte retificadora  | Trifásica - 36MT160   | 13,28                |
| Conversor DC-DC     | <i>Buck-boost</i>     | 3,48                 |
| Gerador com encoder | Koford 33H412A        | 658,00               |
| Bateria de lítio    | ANR26650M1B           | 11,12 x 7            |
| Pá da hélice        | PLA - sob medida      | 35,00 x 3            |
| Nacelle             | Aço - sob medida      | 200,00               |
| <b>Total</b>        |                       | <b>US\$ 1.070,39</b> |

testes em um túnel de vento instalado no laboratório de ciências térmicas (LabTermo) da Universidade Federal de Santa Catarina, conforme arranjo mostrado na Fig. 11. Além dos componentes listados na Tabela 1, para os testes foi utilizado um resistor variável com valores de 1 a 20  $\Omega$  – faixa que corresponde ao intervalo de operação esperado na curva de potência do microgerador.



Figura 11. Microgerador durante testes em túnel de vento no LabTermo da UFSC. Fonte: original.

Para auxiliar no controle de parâmetros e registro de dados durante os testes, uma interface gráfica foi desenvolvida no ambiente de desenvolvimento Visual Studio 2019, versão Community. Tal interface, apresentada na Fig. 12, possui comunicação serial com a plataforma Arduino Nano para tratamento e gravação dos dados durante a aquisição. Posteriormente, esses dados foram convertidos em um gráfico da curva de potência do microgerador.

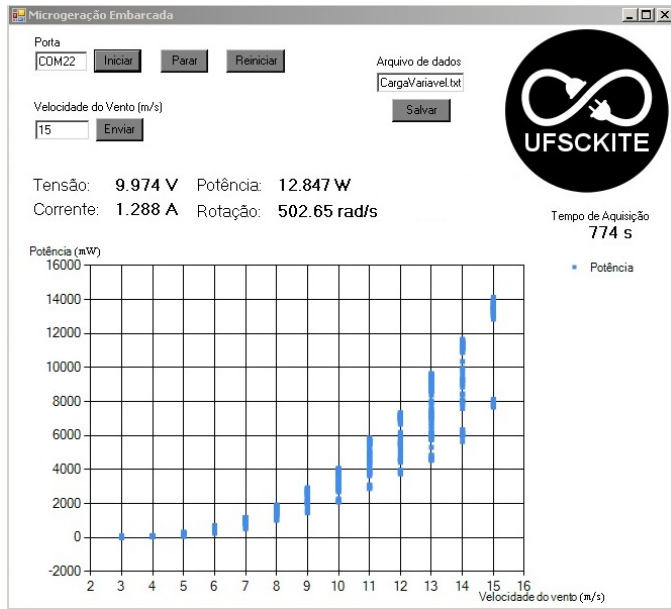


Figura 12. Interface gráfica desenvolvida para testes em túnel de vento. Fonte: original.

Os testes foram realizados em malha aberta, nos quais a velocidade do vento foi variada entre 3 e 19 m/s, o que corresponde ao intervalo de variação do vento aparente esperado para a operação do aerogerador AWE. Para cada metro por segundo incrementado na velocidade do vento realizou-se a variação da carga na saída da ponte retificadora de 3 a 20  $\Omega$  enquanto media-se corrente e tensão. De posse desses dados foi calculada a potência elétrica gerada pela microturbina.

#### 4.2 PSF com Gerenciamento de Baterias

A estrutura do algoritmo PSF foi adaptada para a inclusão do banco de baterias e seu sistema de gerenciamento de carga, conforme diagrama de blocos na Fig. 13. Por meio da informação disponibilizada por uma placa dedicada ao gerenciamento das baterias, caso o nível de tensão do banco de baterias atinja seu limite superior, o sinal de potência na saída do conversor DC-DC *buck-boost* é redirecionado a um resistor de proteção (*protection box*).

### 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos testes executados em túnel de vento foi possível determinar algumas características do microgerador. Na Fig. 14 é ilustrada a sua curva de potência, na qual cada ponto em azul corresponde a um determinado ajuste da carga resistiva na saída do circuito retificador. Já os pontos em vermelho indicam os picos de potência para cada velocidade, atingindo em torno de 28 W para a máxima velocidade do vento aplicada: 19 m/s.

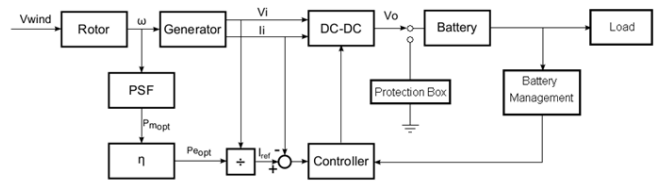


Figura 13. Estrutura proposta para o controle PSF com a inclusão do gerenciamento de baterias. Fonte: Adaptado de Roza (2018).

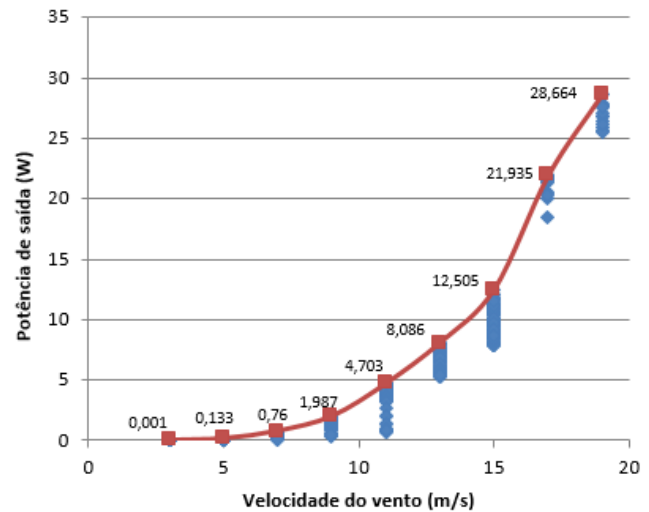


Figura 14. Curva de potência. Fonte: original.

Na Fig. 15 é apresentado o coeficiente de potência em função da velocidade do vento. Novamente, os pontos em azul representam diferentes ajustes da carga resistiva, enquanto os pontos em vermelho correspondem ao máximo valor de  $C_p$  obtido ao se variar a carga resistiva. Nota-se que o melhor aproveitamento relativo da energia cinética do vento foi conseguido com 17 m/s: cerca de 27.5%. Supondo 2.5% de perdas do gerador na conversão de potência mecânica em elétrica, a potência mecânica extraída do vento estaria em torno de 30%, ou seja, aproximadamente metade do limite teórico estabelecido por Betz:  $16/27 \approx 59\%$ .

Na literatura, frequentemente o coeficiente de potência é expresso em termos do *tip speed ratio*, definido como

$$\lambda = \frac{\omega R}{v_w}, \quad (5)$$

em que  $R$  é o raio do rotor (distância da ponta das pás ao eixo de rotação). O *tip speed ratio* é importante na otimização do ponto de operação de um aerogerador pois, tipicamente, para valores suficientemente baixos ou altos de  $\lambda$  o valor de  $C_p$  é baixo, atingindo um pico para um determinado valor intermediário de  $\lambda$  (Kot et al., 2013). Este comportamento também foi verificado no caso do microgerador testado em túnel de vento, conforme pode ser visto na Fig. 16, considerando a velocidade do vento em 17 m/s. Os pontos em azul correspondem a diferentes ajustes da carga resistiva, o que resultou em diferentes velocidades de rotação e, conseqüentemente, diferentes valores de  $\lambda$ . Com uma carga resistiva alta, a corrente do microgerador é reduzida, o que diminui a força contraele-

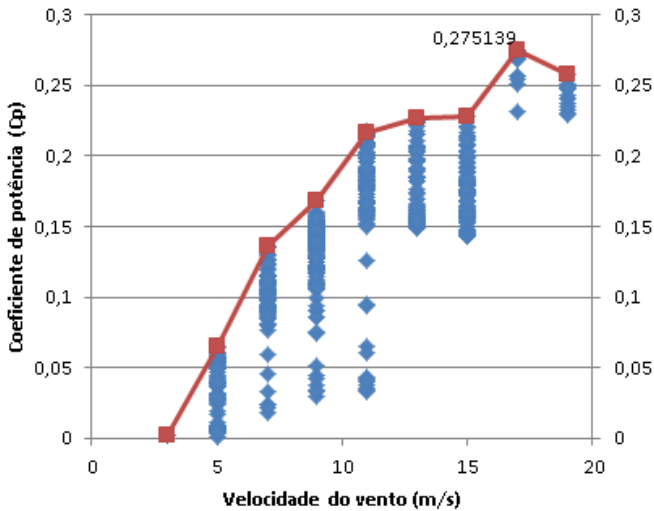


Figura 15. Coeficiente de potência. Fonte: original.

tromotriz (torque de carga) e, com isso, a velocidade de rotação aumenta. Por sua vez, uma velocidade de rotação alta faz a microturbina atuar mais como uma “parede”, impedindo a passagem do vento e, desta forma, reduzindo a potência extraída. Do ponto de vista elétrico, a corrente diminui proporcionalmente mais do que a tensão aumenta, e portanto a potência diminui. Por outro lado, uma carga resistiva muito baixa tende a curto-circuitar os terminais do microgerador, de tal forma que a corrente gerada é maior, causando um elevado torque de carga, que impede a velocidade de rotação (e portanto a tensão gerada) de assumir valores significativos. Neste caso o contrário ocorre: a tensão gerada diminui mais do que a corrente aumenta, logo a potência elétrica cai também.

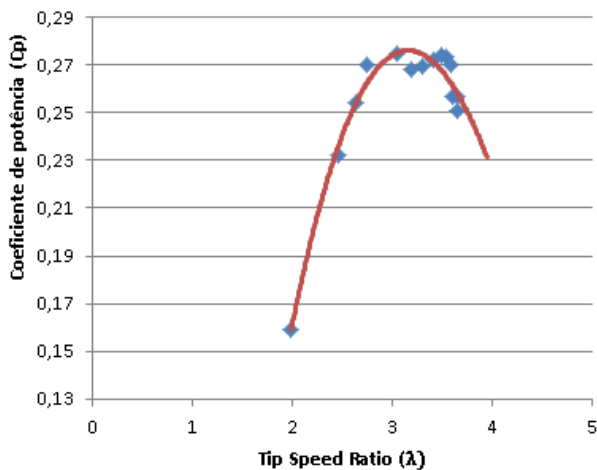


Figura 16. Coeficiente de potência em função do tip speed ratio. Fonte: original.

A partir dos dados coletados no experimento também foi possível construir a curva de MPPT apresentada em vermelho na Fig. 17. Ela é obtida como a interpolação dos pontos em vermelho, que representam a máxima potência gerada para cada valor de velocidade do vento ( $v_w$ ). Para um mesmo valor de  $v_w$ , os pontos em azul correspondem a diferentes ajustes da carga resistiva. Note

que, se dividíssemos a curva da potência de saída pela potência disponível no vento, obteríamos uma curva de  $C_p$  com formato similar ao já bem conhecido na literatura para turbinas eólicas de eixo horizontal.

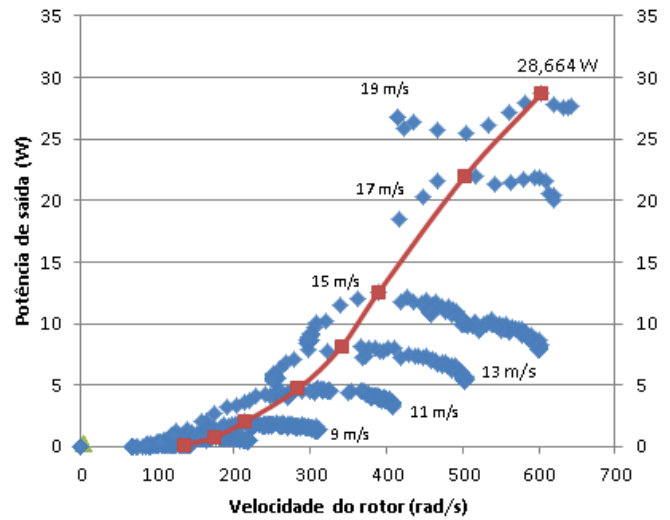


Figura 17. Rastreamento do ponto de máxima potência para diferentes velocidades do vento. Fonte: original.

## 6. CONCLUSÃO

Neste artigo foi apresentada uma arquitetura de controle para rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) em um microgerador eólico de eixo horizontal por meio da técnica *Power Signal Feedback* (PSF). Este microgerador será embarcado em uma unidade de voo de um aerogerador AWE do tipo *pumping kite* para manter um *pack* de baterias carregado e, desta forma, conferir autonomia de operação ilimitada ao sistema AWE. Foram apresentados resultados de testes em túnel de vento, a partir dos quais foram levantadas as curvas de potência, coeficiente de potência e a curva de MPPT do microgerador, em sintonia com o comportamento esperado para turbinas eólicas de eixo horizontal disponível na literatura.

Na continuação deste trabalho, assim como feito por Demirtas and Serefoglu (2014), será embarcado o algoritmo de MPPT em um microcontrolador para que a estratégia de controle do microgerador possa ser validada através de novos ensaios em túnel de vento. Uma variante da estratégia PSF poderá ser investigada, na qual o objetivo não é necessariamente maximizar a potência a todo momento, mas operar com uma referência de potência abaixo do valor ótimo, segundo a real demanda instantânea por parte do *pack* de baterias. Desta forma, evita-se desperdiçar energia gerada no resistor de proteção. Com a estratégia de controle testada exaustivamente em túnel de vento, o próximo passo será implementar a solução na unidade de voo e testá-la durante a operação do *pumping kite*.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pela CAPES e FAPEAM por meio do edital nº 001/2019 – PROPG-CAPES/FAPEAM, além de recursos via Chamada MCTIC/CNPq nº 28/2018,

processo 433113/2018-9. Os autores também são gratos pelo acesso ao laboratório LabTermo e ao INEP da UFSC.

## REFERÊNCIAS

- Araujo, H. (2017). *Controle da máquina elétrica de um aerogerador com aerofólio cabeado na configuração pumping kite*. Master's thesis, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Caixeta, D.A., Guimarães, G.C., Chaves, M.L.R., de Oliveira, J.C., and Bonelli, A.F. (2011). Maximização da potência de uma turbina eólica de velocidade variável considerando o efeito da inércia. *IX CEEL*.
- Cherubini, A., Papini, A., Vertechy, R., and Fontana, M. (2015). Airborne wind energy systems: A review of the technologies. *Elsevier*.
- Demirtas, M. and Serefoglu, S. (2014). Design and implementation of a microcontroller-based wind energy conversion system. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 1582 – 1595.
- Hussain, J. and Mishra, M.K. (2016). Adaptive maximum power point tracking control algorithm for wind energy conversion systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 31(2).
- IEC, I.E.C. (2005). *Power Performance Measurements of Electricity Producing Wind Turbines*. Suíça. International Standard.
- Johnson, G.L. (2006). *Wind Energy Systems*. Electronic Edition, Manhattan, KS.
- Kieboom, B.V.D. (2017). *Design and Noise Study of a Low-Drag Wind Turbine for Airborne Power Applications*. Ph.D. thesis, Technische Universiteit Delft.
- Kot, R., Rolak, M., and Malinowski, M. (2013). Comparison of maximum peak power tracking algorithms for a small wind turbine. *Mathematics and Computers in Simulation*, 29 – 40.
- Lahfaoui, B., Zouggar, S., Mohammed, B., and Elhafyani, M.L. (2016). Real time study of p&o mppt control for small wind pmsg turbine systems using arduino microcontroller. *8th International Conference on Sustainability in Energy and Buildings*.
- Oliveira, M.L.C. (2016). *Airborne wind energy with tethered wings: modeling, analysis and control*. Ph.D. thesis, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Papadopoulos, K. (2018). Why measure the power curve of a wind turbine? *International Wind Engineering*. URL <https://www.windengineering.gr/articles/why-measure-the-power-curve-of-a-wind-turbine>.
- Quintas, B.J., Lima, W.V.F., Celeste, W.C., Rocha, H.R.O., and Coura, D.J.C. (2017). Um modelo de previsão da potência elétrica extraída de uma turbina eólica. *Latin American Journal of Energy Research*, 3(2), 12–20.
- Roza, F.S. (2018). *A small wind generation system to the on-board control unit of an AWE system*. Master's thesis, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Trivedi, B.N. and Patel, P. (2018). Simulation and analysis of wind-solar hybrid energy conversion system. *International Journal For Technological Research In Engineering*.
- Venegas, M.S.J. (2017). *Path Optimization of a Pumping Kite System*. Master's thesis, Delft University of Technology.