

Controlador rotacional de aerofólio construído com materiais de baixo custo com potencial de aplicação na geração de energia elétrica

RESUMO

Vários grupos vêm atuando no desenvolvimento de aerofólios (pipas) capazes de alcançar altitudes que variam de 200 a 800 m acima do nível do solo, onde os ventos são mais intensos, tem maior incidência e com menos turbulência, altitudes bem superior às alcançadas pelas torres eólicas convencionais, que é aproximadamente de 150 m do nível do solo. Este trabalho constituiu no desenvolvimento de um controlador de trajetória de pipas, sendo composto por um sistema que trabalha de forma mecânica e automática no processo de voo, através de material de baixo custo e/ou alternativos, capaz de mudar o seu sentido de movimento transversal ao vento (vento cruzado). O voo do aerofólio em vento cruzado permite maior conversão de energia eólica e conseqüentemente um potencial na conversão em energia elétrica. Para isso uma série de testes foi realizada em campo, para ajustar as posições dos dispositivos no aerofólio. Foram observados aumentos de até 50% na força de tração do cabo que liga o aerofólio ao solo, quando comparado às mesmas condições sem movimento de vento cruzado.

PALAVRAS-CHAVE: energia eólica; aerodinâmica; aerofólios.

Flávio Silva Dias

flavio.dias@ifba.edu.br

orcid.org/0009-0000-2799-6678

Instituto Federal da Bahia, Vitória da Conquista, Bahia, Brasil.

Lailah Silva Anjos

lailahsilva.anjos@gmail.com

Instituto Federal da Bahia, Vitória da Conquista, Bahia, Brasil.

Ítalo Santos Bonfim

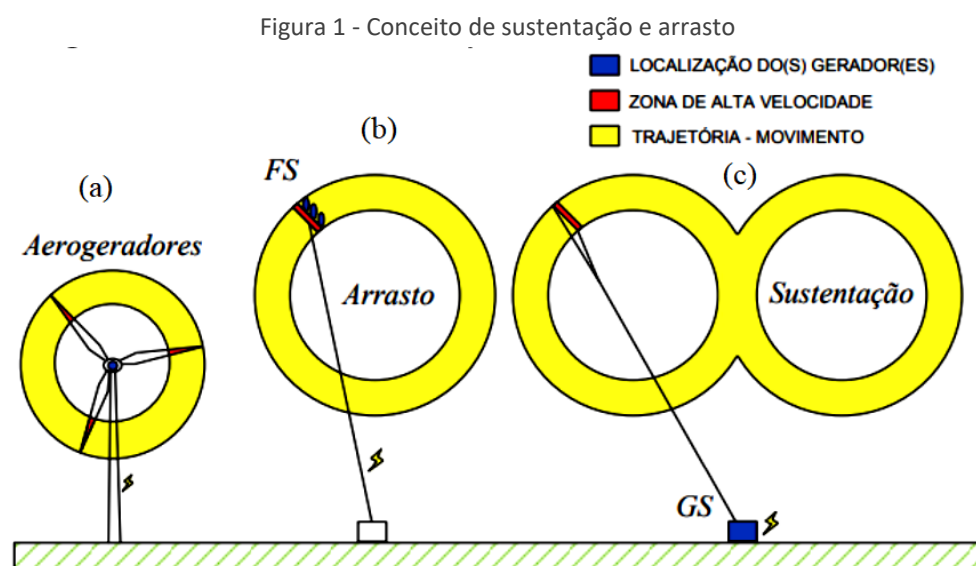
italobonfim18@gmail.com

Instituto Federal da Bahia, Vitória da Conquista, Bahia, Brasil.

INTRODUÇÃO

No momento, no Brasil, a energia eólica é segunda fonte em produção de energia elétrica, correspondendo a quase 12% da matriz energética do país. Esta forma de geração de energia apresenta benefícios, como a ausência de emissão de dióxido de carbono e o aproveitamento de terras improdutivas para sua implantação ou até mesmo a combinação com áreas produtivas através de consórcio com plantações (ABEEÓLICA, 2020). A tecnologia eólica convencional é baseada em altas torres e fundações pesadas com turbinas de geração de energia. Devido aos custos de construção dessas torres e falta de perspectiva de descobertas relevantes nessa modalidade, diversos grupos de pesquisa ao redor do mundo, como *Sky WindPower*, *KiteX*, *AMpyx Power*, *AirLoom Energy* e outros, investigam novos modelos de exploração desta fonte renovável de maneira econômica e sustentável. Estes grupos têm o objetivo de explorar uma enorme quantidade de energia eólica presente em altitudes acima da altura máxima das torres eólicas que é de aproximadamente 150 m. Os grupos vêm atuando no desenvolvimento de dispositivos inovadores capazes de alcançar altitudes que variam de 200 m a 800 m do nível do solo, onde, em geral, há a maior incidência de ventos com maior velocidade e com menos turbulência (ARCHER, *et al.*, 2013).

Para usufruir desta energia eólica em altas altitudes faz-se necessário o emprego de componentes apropriados capazes de permanecerem suspensos no ar através da força aerodinâmica exercida pelo vento, como as pipas (aerofólios flexíveis), asas (aerofólios rígidos) ou balões. Estes dispositivos, quando se encontram em voo, permitem a produção de energia elétrica através de geradores que podem estar suspensos (**Figura 1b**) ou localizados no solo (**Figura 1c**). Esses modelos podem fazer o mesmo papel dos aerogeradores tradicionais (**Figura 1a**), porém com um raio de giro e altura superior. Estas aplicações foram chamadas de energia eólica no ar (AWE - *airborne wind energy*).



Fonte: Adaptado de Lellis (2016).

A principal barreira a ser superada nessa área de pesquisa é a confiabilidade para a geração de energia elétrica, os aerofólios cabeados necessitam operar de maneira confiável independentemente da existência de condições atmosféricas adversas, como chuva, tempestade ou pouca incidência de vento. Isto requer o

uso de componentes resistentes, bem como sistemas de controle robustos e confiáveis que garantam a correta operação do sistema em qualquer cenário. Um exemplo de tecnologia similar que já atingiu estágio comercial é o uso de aerofólios cabeados como sistema de propulsão auxiliar em embarcações (SKYSAILS, 2020).

O papel do controlador de voo é manter a pipa em vento cruzado, já que a sustentação simples (quando a pipa não possui movimento lateral) e desloca-se somente no sentido do vento, a estimativa teoricamente para a energia gerada na sustentação simples é de 43 vezes menor do que o valor esperado quando em deslocamento no sentido do vento cruzado em estimativa teórica (TAIROV, 2018). Pela importância do controlador de voo em paralelo o desenvolvimento de propostas que sejam economicamente viáveis, neste trabalho buscou-se construir um controlador de voo com materiais de baixo custo e/ou alternativos.

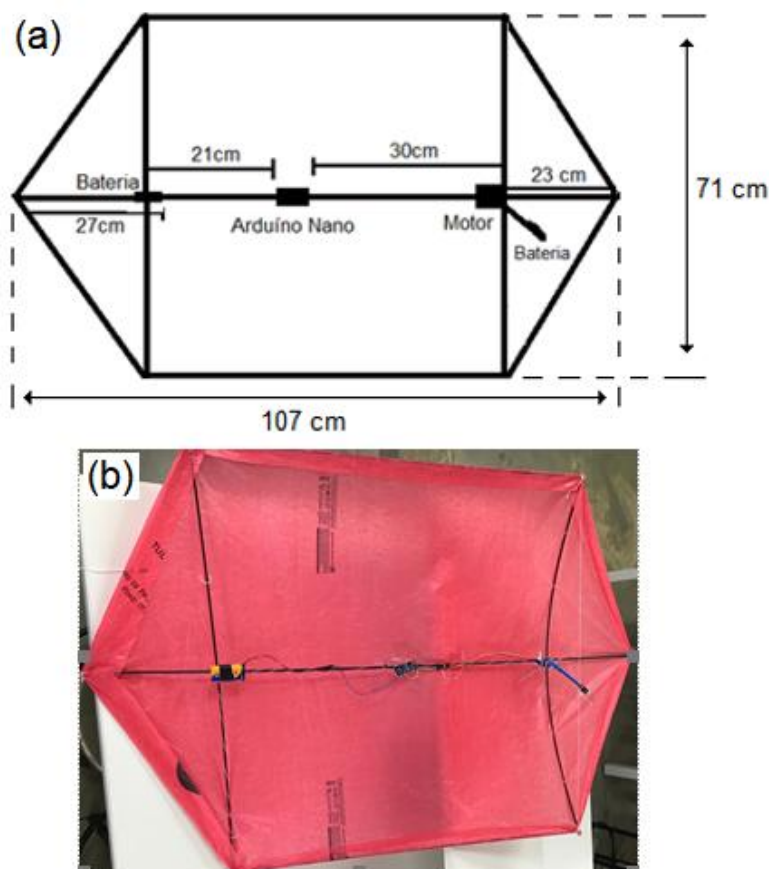
MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa visa construir um sistema que trabalhe de forma mecânica e automática em voo, o que reduz os custos com dispositivos de interação à distância e garanta um sistema com menor massa, características importantes na manutenção da pipa em voo. Para isso foi desenvolvido um controlador de trajetória de pipa, e também desenvolvida uma pipa com dimensões e particularidades específicas para acoplar os componentes de controle.

Os materiais utilizados para construir o controlador de voo da pipa foram: um servo motor, um arduíno nano, duas baterias recarregáveis e conectadas em série modelo 18650 com capacidade máxima de carga elétrica de 9800 mAh, massa de 35 g e tensão de 4,2 V cada, cabos de conexão (*jumpers*), uma pá parafusada ao servo motor de comprimento 12,5 cm (feita manualmente com pedaço de tampa plástica) e um peso acoplado a pá (uma das baterias). Para prender os dispositivos foram usadas fita isolante e abraçadeiras de nylon. Na **Figura 2a** ilustra-se o esquema do modelo de pipa com componentes e as medidas e distância entre a estrutura e dispositivos. A estrutura da pipa com hastes e cobertura possui massa de 39 g e foi capaz de suportar um peso médio em voo de 95 gramas (equipamentos acoplados a pipa), conforme **Figura 2b**.

Os testes em campo foram realizados em área afastada de residências e circulação de veículos para evitar acidentes em caso de queda da pipa. Em dias com formação de chuvas não foram realizados testes em campo devido à possibilidade de incidência de raios.

Figura 2 – (a) esquema dos componentes na pipa, (b) pipa com componentes instalados



Fonte: Autoria própria.

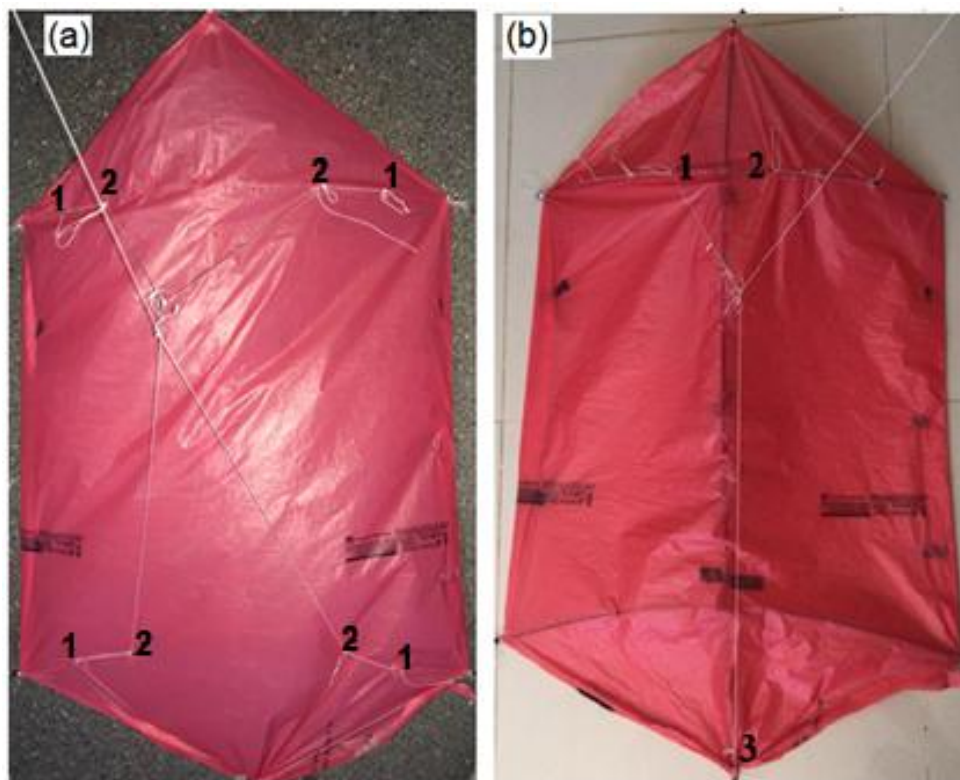
RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tecnologia de AWE utiliza da força aerodinâmica exercida pelo vento sobre os dispositivos em voo. Nesse sentido, para implementar o controle de voo, foi necessário a construção de uma pipa. Para isso adotou como base às pipas tradicionais, que usam de uma estrutura armada que suporta um plano de papel ou plástico que apresenta a função de asa. Esse modelo, conforme **Figura 3**, foi escolhido por ter uma fácil construção e permitir a utilização de materiais reutilizáveis e de baixo custo.

No início foi necessário testar a “chave” (também chamada de cabresto) da pipa, o qual é responsável por sustentá-la em voo. A primeira chave testada, marcada nas posições descritas pelo número 1, apresenta uma distância de 10 cm das extremidades. Essa chave contém quatro linhas, conforme **Figura 3a**. O teste nessa posição permitiu a pipa voar com equilíbrio, mas não facilitou o deslocamento do centro de massa para realização de movimentos laterais. Em seguida, foi testada a chave nas posições marcadas com o número 2, com 16 cm centímetros da extremidade. Nessa configuração a pipa apresentou boa estabilidade de voo e foi possível verificar o surgimento de movimentos laterais. Na sequência foi testada a chave de três linhas, conforme **Figura 3b**, configuração essa que melhor respondeu ao controlador de voo, onde as posições 1 e 2 estão a 22 cm da extremidade e a posição 3 da linha está presa na extremidade da

haste central. Um problema observado nesta configuração, que quando sob forte vento, a pipa sofreu flexão da haste central, algo que não aconteceu com a chave em outras posições.

Figura 3 – (a) chave com quatro linhas, (b) chave com três linhas



Fonte: Autoria própria.

Na construção do controlador da pipa foi utilizado um servo motor, que é um dispositivo caracterizado por seu formato compacto, com alta potência, baixa inércia e alta eficiência. Ele é composto por um motor DC, engrenagens, um circuito de controle e um potenciômetro. Os modelos de servo motor mais comuns são os que possuem rotação limitada de 0° a 180° , sendo possível o controle da sua posição e velocidade. O valor angular é alterado através da posição do potenciômetro. O envio dos comandos ao servo motor é feito através do sinal PWM (*Pulse Width Modulation*), que é um sinal modulado por largura de pulso. O controlador do servo motor tem como sinal de entrada um período de 20 ms e identifica alterações de tensão (0 a 5 V) entre os tempos $t=1$ ms e $t=2$ ms, o que representa a mudança de posição do eixo, fazendo com que o motor se movimente (TANNUS, 2018).

A programação, conforme script presente na **Tabela 1**, define que o servo motor entra no funcionamento após 30 s da ligação do microcontrolador, mandando o sinal de tensão para que a posição seja alterada em baixa velocidade (comando `servo.slowmove`) de 0° para 90° , de 90° a 180° e retornando a 90° , fechando o laço do *loop*. O tempo de cada *delay* é o tempo em que o servo motor fica parado em determinada posição previamente escolhida.

Tabela 1 - Programação de funcionamento do servo motor

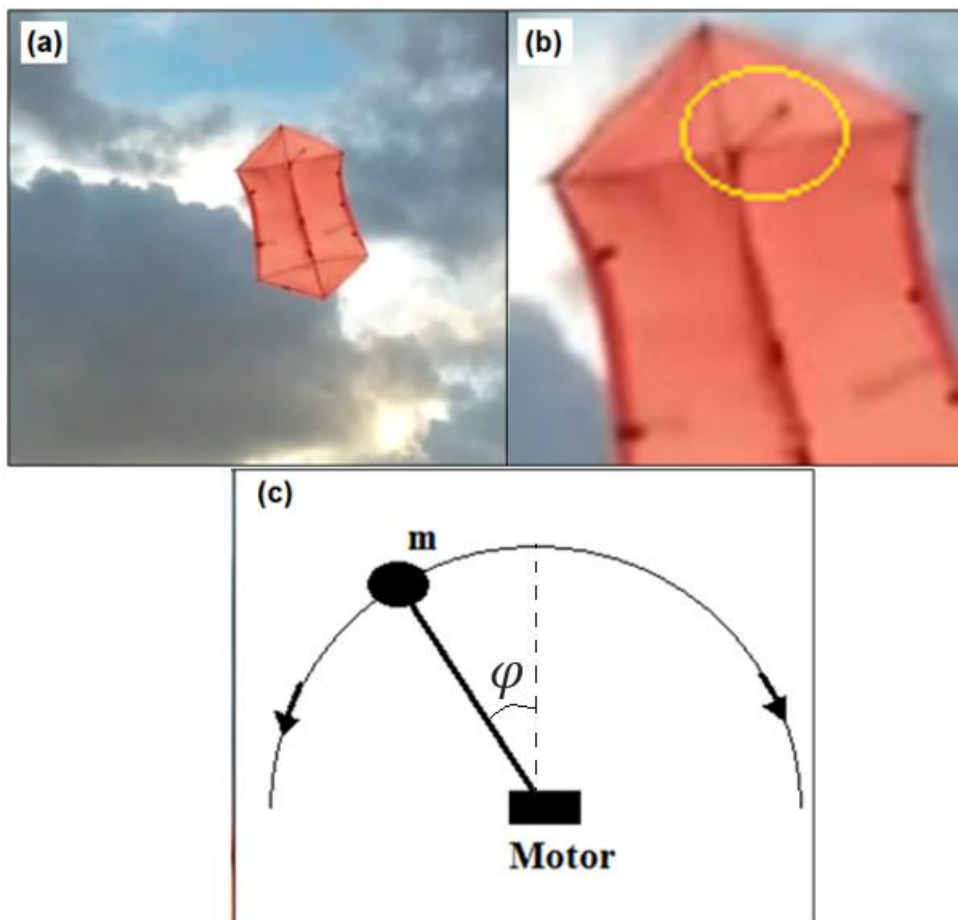
```
#include <VarSpeedServo.h>          servo.slowmove(0,5); //posição, velocidade
VarSpeedServo servo;              delay (7500);
#define pinoServo 9                servo.slowmove(90,5); //posição, velocidade
void setup()                       delay (8000);
{                                   servo.slowmove(180,5); //posição, velocidade
  servo.attach (pinoServo);        delay (7500);
  delay (30000);                   servo.slowmove(90,5); //posição, velocidade
}                                   delay (8000);
void loop()                         }
{
```

Fonte: Autoria própria.

Foram realizados diversos testes com servos motores antes de acoplá-lo na pipa. A programação possibilita comandos para que o servo gire com diferentes velocidades.

Nos testes seguintes, foram observados dois fenômenos físicos importantes para o controle da pipa, como a mudança do seu centro de massa e a conservação do momento angular, sobretudo durante o retorno da pá. O centro de massa da pipa muda de acordo o sentido da pá do servo motor, não girando ao contrário devido à conservação do momento angular, pela modificação do centro de massa decorrente da massa na extremidade. A foto na **Figura 4a** foi tirada durante um dos testes realizados e na **Figura 4b** em destaque no círculo amarelo é possível verificar a pá do controlador de voo sendo deslocada para a direita. A **Figura 4c** ilustra o esquema do motor conectado à pá e na extremidade tem uma massa concentrada e seu movimento durante o voo.

Figura 4 – (a) Pipa em voo, (b) pá do controlador de voo da pipa, e (c) esquema do movimento do motor



Fonte: Autoria própria.

Após vários testes com modelos e quantidades diferentes de baterias, a melhor configuração para o sistema foi com duas baterias, onde uma dessas pode atuar como força peso na pá do motor, conforme **Figura 5**. Nessa configuração, foi observado um movimento lateral favorável com o deslocamento dessa força peso. Isso otimizou a massa total da pipa e contribuiu na melhoria do movimento da haste móvel. Durante os testes, também foi observado que o motor estava saindo do lugar quando a pá girava, o que afetava o seu desempenho, portanto foi necessário acoplar o motor a uma base feita de tampa de garrafa pet de cor branca, o que fixou o motor, conforme **Figura 5**.

Figura 5 – Dispositivos acoplados na pipa



Fonte: Autoria própria.

A pipa conseguiu manter em voo uma massa de 95 g com seus componentes, algo inédito nos trabalhos na literatura. No geral as cargas são mantidas nos cabos (LELLIS *et al.*, 2018) e não na estrutura da pipa com está sendo apresentado para esse modelo de pipa.

Os valores da força de tração variavam de acordo com a mudança de direção do movimento da pipa, que alcançou um aumento de até 50% da força em relação a voos. Para entender e estimar o comportamento da força de tração gerada na sustentação que causou esse aumento admite-se que:

- a corda não possui arrasto;
- a corda é inelástica;
- a pipa e a corda não possuem peso desprezível;
- as forças agem de forma pontual.

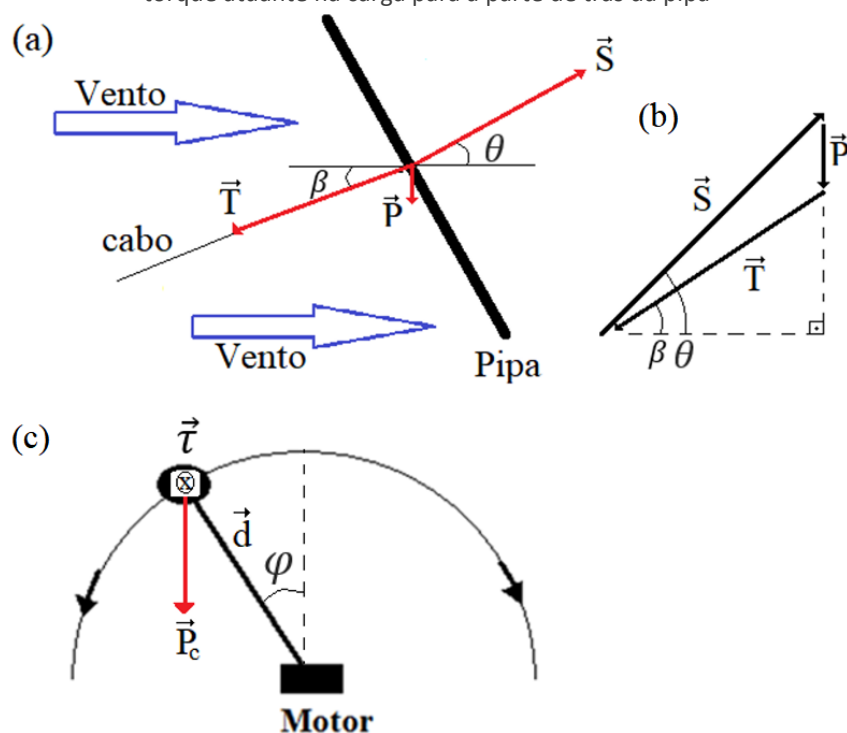
As forças que atuam na pipa inicialmente é a força aerodinâmica (\vec{S}), a força peso (\vec{P}) e a força de resistência ou tração (\vec{T}) para manter a pipa em equilíbrio no ar conforme **Figura 6a**. A força resultante é nula, o que mantém a pipa no ar. Dessa forma, de acordo com a **Figura 6b**, a componente da força de sustentação na direção y é equilibrada com as forças de tração e peso:

$$S_y - (P + T_y) = 0. \quad (1)$$

Desta forma, o módulo da força de tração é:

$$T = \frac{S \cdot \text{sen}\theta - P}{\text{sen}\beta}. \quad (2)$$

Figura 6 – (a) diagrama de forças na pipa, na parte lateral, em sustentação simples, (b) torque atuante na carga para a parte de trás da pipa



Fonte: Autoria própria.

No momento em que o controlador de voo atua, conforme **Figura 6c**, a força peso da carga (\vec{P}_c) é deslocada e aumenta até ficar perpendicular. O torque gerado pelo movimento da carga do controlador de voo é:

$$\vec{\tau} = \vec{d} \times \vec{P}_c \quad (3)$$

assim o módulo do torque é:

$$\tau = P_c \cdot d \cdot \text{sen}\varphi \quad (4)$$

onde $0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$.

O torque provoca uma tendência de precessão para trás, conforme **Figura 6c**. A direção do torque está voltada para o fundo da pipa, provocando uma redução no ângulo θ da pipa e, conseqüentemente, ocasiona aumento na força de tração do cabo. Isto significa que quanto mais diminui o valor do ângulo θ , maior passa ser a área de atuação do vento na pipa, conforme **Figura 6a**.

CONCLUSÕES

Foi realizada uma série de testes e os resultados obtidos comprovam que o protótipo é promissor quando em vento cruzado. Foram observados aumentos de até 50% na força de tração do cabo que liga o aerofólio ao solo. Esse aumento acontece devido ao torque gerado pelo movimento de carga do controlador de voo, o que faz com que a pipa tende a movimentar para trás por precessão, provocando aumento da força de sustentação e da tração no cabo.

A pipa utilizada foi de modelo tradicional, e na sustentação e trabalho do sistema de controle de voo, o modelo que melhor se comportou foi com cabresto de quadro linhas, com distância de dezenove centímetros da haste central. A pipa conseguiu manter em voo uma massa de 95 g de componentes, algo inédito na literatura. Nos trabalhos publicados anteriormente, as cargas são mantidas nos cabos e não na pipa para este modelo de pipa.

Airfoil rotational controller built with low cost materials with potential application in electric power generation

ABSTRACT

Several groups have been working on the development of airfoils (kites) capable of reaching altitudes ranging from 200 to 800 m above ground level, where the winds are more intense, have a higher incidence and with less turbulence, altitudes well above those reached by the towers conventional wind turbines, which is approximately 150 m above ground level. This work involved the development of a kite trajectory controller, consisting of a system that works mechanically and automatically in the flight process, using low-cost and/or alternative materials, capable of changing its direction of transverse movement (crosswind). Airfoil flight in crosswind allows greater conversion of wind energy and consequently a potential for conversion into electrical energy. For this, a series of tests were carried out in the field, to adjust the positions of the devices on the airfoil. Increases of up to 50% were observed in the traction force of the cable that connects the airfoil to the ground, when compared to the same conditions without movement without crosswind.

KEYWORDS: wind energy; aerodynamics; airfoils.

Controlador rotacional aerodinámico construido con materiales de bajo costo con potencial aplicación en la generación de energía eléctrica

RESUMEN

Varios grupos han estado trabajando en el desarrollo de perfiles aerodinámicos (cometas) capaces de alcanzar altitudes que oscilan entre los 200 y los 800 m sobre el nivel del suelo, donde los vientos son más intensos, tienen mayor incidencia y con menos turbulencias, altitudes muy superiores a las que alcanza las torres de aerogeneradores convencionales, que se encuentra aproximadamente a 150 m sobre el nivel del suelo. Este trabajo implicó el desarrollo de un controlador de trayectoria de cometa, consistente en un sistema que funciona mecánica y automáticamente en el proceso de vuelo, utilizando materiales de bajo costo y/o alternativos, capaz de cambiar su dirección de movimiento transversal a favor del viento (viento cruzado). El vuelo aerodinámico con viento cruzado permite una mayor conversión de energía eólica y, en consecuencia, un potencial de conversión en energía eléctrica. Para ello, se realizaron una serie de pruebas en campo, para ajustar las posiciones de los dispositivos sobre el perfil aerodinámico. Se observaron aumentos de hasta un 50% en la fuerza de tracción del cable que conecta el perfil aerodinámico al suelo, en comparación con las mismas condiciones sin movimiento y sin viento cruzado.

PALABRAS CLAVE: energía eólica; aerodinámica; perfiles aerodinámicos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao IFBA e FAPESB pelo apoio na realização desse trabalho.

REFERÊNCIAS

ABEEÓLICA. Energia eólica: os bons ventos do Brasil. **Infovento** 25. 2022

ARCHER, C. L. An introduction to meteorology for airborne wind energy. In: AHRENS, U.; DIEHL, M.; SCHMEHL, R. (Ed.). **Airborne Wind Energy**. Springer: Springer Berlin Heidelberg, 2013.

GRUPO SKYSAILS: **Soluções em energia verde**. Disponível em: <https://skysailsgroup.com/index.html>. Acesso em 14/03/2020.

LELLIS, M. D. **Airborne Wind Energy with Tethered Wings: Modeling, Analysis and Control**. Thesis (PhD) - UFSC, 2016.

LELLIS, M. D.; REGINATTO, R.; SARAIVA, R.; TROFINO, A. The Betz limit applied to Airborne Wind Energy, **Renewable Energy**, v. 127, p. 32-40, 2018.

TAIROV, S.; AGNOLETO, D. Geração de energia por pipas. **Rev. Bras. Ensino Fís.** vol. 40, n. 2, São Paulo, 2018. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172018000200419. Acesso em: 20 Nov. 2020.

TANNUS, A. **Arduino: Servomotores**, 2018. Disponível em: <http://45.4.96.19/bitstream/aee/1860/1/ARDUINO%20-%20SERVOMOTORES.pdf>. Acesso em: 02 Fev. 2021.

Recebido: 26 de maio de 2023.
Aprovado: 12 de outubro de 2023.

DOI:

Como citar: DIAS, F S; ANJOS, L S; BONFIM, I S, Controlador rotacional de aerofólio construído com materiais de baixo custo com potencial de aplicação na geração de energia elétrica, **Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada**, Ponta Grossa, v. 10, n.2, p. 54-65, dez. 2023.

Contato: Flávio Silva Dias: flavio.dias@ifba.edu.br

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

