

Geração de energia por pipas

Power generation with kites

Stanislav Tairov^{*1}, Daniel Agnoletto¹

¹Universidade de Caxias do Sul, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Caxias do Sul, RS, Brasil

Recebido em 21 de Agosto, 2017. Revisado em 30 de Outubro, 2017. Aceito em 13 de Novembro, 2017.

O uso de pipas é antigo na história humana, mas somente a partir da década de 80 os arranjos para geração de energia começaram a ser considerados. Neste trabalho, os princípios físicos e matemáticos de geração de energia por pipas são apresentados. Foi mostrado que a máxima potência alcançada pelo modelo teórico utiliza vento cruzado.

Palavras-chave: ensino de física, energia eólica, pipa.

Kites are used in the history of mankind since ancient times, but only from the 80's the arrangements for energy generation begin to be considered. In this work, the physical and mathematical principles of kite power generation are presented. It was shown that the maximum power reached by the theoretical model uses crosswind.

Keywords: physics teaching, wind energy, kite.

1. Introdução

A forma tradicional de geração de energia elétrica através do vento faz uso de turbinas eólicas. Apesar dos avanços em eficiência, confiabilidade e da redução de preço, sua disseminação ainda encontra dificuldades. Uma das razões é a alta relação peso/potência desta conversão. Quanto maior a capacidade do gerador, maiores devem ser as dimensões da torre e da hélice. Comparativamente, os ganhos adicionais de potência não cobrem os custos de produção, operação e manutenção dessas turbinas. Para agravar, suas torres não alcançam os ventos fortes e constantes das camadas mais altas da atmosfera, de onde poderiam extrair mais energia [1].

Em 1980, o engenheiro Miles Loyd publicou um trabalho contendo os princípios físicos e as construções matemáticas básicas para a produção de energia elétrica através de pipas [2]. Ele demonstrou que a energia pode ser gerada a partir das forças aerodinâmicas de sustentação e arrasto atuando na pipa durante o voo. Além disso, determinou a máxima potência teórica da extração e analisou o efeito da operação das pipas em vento cruzado. Os resultados deste trabalho, ao mesmo tempo em que norteiam, despertam o interesse de muitos pesquisadores.

As pipas propostas por Loyd prometem reduzir consideravelmente a relação peso/potência da energia eólica. Enquanto mais de 50% da energia de saída das turbinas é produzida pelos últimos 30% do comprimento de suas pás, certas configurações de geradores empregando pipas podem atuar como se fossem esta parcela mais externa,

produzindo mais energia por quantidade de material [3]. De fato, as cordas das pipas substituem a presença das torres, e, em geral, a massa de uma pipa costuma ser menor do que a massa das pás de uma turbina. Um estudo realizado em AHRENS et al. [3] estima que o peso de um sistema de geração completo tendo como base as asas de um avião Airbus A380 teria em torno de 39 toneladas e forneceria 30MW de energia. Esta capacidade ultrapassa em muito os 7,5 MW de uma turbina Enercon E-126, por exemplo. Para alcançar esta capacidade, são necessárias quatro dessas turbinas, que, juntas, pesam 12400 toneladas. A redução no peso/quantidade de material se reflete em menores custos de fabricação e conseqüentemente da energia produzida. Além disso, na maioria das vezes, as pipas podem ser transladadas e seu local de operação pode ser alterado de acordo com o regime de ventos da região. Essa flexibilidade aliada ao fato de que as pipas podem atingir maiores altitudes e extrair a energia de ventos inexplorados permite sua instalação em locais onde uma turbina eólica não seria economicamente viável [3, 4].

Apesar da capacidade energética dos ventos, investimentos em energia eólica só ganharam vulto com a crise do petróleo na década de 70. Países como os Estados Unidos, Alemanha, Suíça e outros criaram programas para o aperfeiçoamento de turbinas e desenvolveram algumas plantas eólicas [5]. Estudos aprofundados sobre pipas e outros métodos de geração, contudo, iniciaram depois, quando materiais mais resistentes e leves para a construção de cordas e asas estavam disponíveis. Além disso,

*Endereço de correspondência: vtairov@ucs.br.

os sofisticados métodos de controle e sensoriamento dessas aplicações foram desenvolvidos muito recentemente.

Vários grupos estão pesquisando e desenvolvendo dispositivos baseados em pipas com o intuito de difundir e tornar essa nova forma de geração de energia acessível. A quantidade de instituições e pesquisadores vem crescendo nos últimos anos, atraindo a atenção de investidores e formando parcerias. A Makani Power, por exemplo, é mantida com recursos da Google [6]. Já em 2009 foi criado o “Consórcio de Energia Levada pelo Vento” (*AWEC - Airborne Wind Energy Consortium*), uma organização que visa a ajuda mútua e o compartilhamento de conhecimento. Na América do Sul, e em especial no Brasil, as iniciativas nessa área ainda são incipientes. O Brasil, contudo, tem motivos para investir tanto em turbinas eólicas tradicionais quanto em novas tecnologias: atualmente vem sendo explorados apenas 10 dos 143 GW estimados pelo Atlas da energia elétrica do Brasil para altitudes de até 50m [7, 8].

Do que foi exposto acima, a geração de energia com uso de pipas justifica-se pelos seguintes fatores:

- a) A baixa relação peso potência das pipas significa menores custos por Watt produzido em comparação com as turbinas atuais;
- b) As pipas podem operar em altitudes maiores, onde os ventos possuem mais energia e são menos sazonais;
- c) O crescente envolvimento de empresas, investidores e universidades está abrindo novos mercados e oportunidades na área;
- d) A crescente demanda por energia, aliado ao potencial eólico brasileiro, pode alavancar o desenvolvimento dessas tecnologias.

2. Princípios fundamentais da geração de energia com o uso de pipas

O vento possui energia suficiente para suprir as necessidades humanas atuais. Uma parte ínfima desta energia vem sendo explorada pelas turbinas eólicas ano a ano. Embora o número de turbinas instaladas continue crescendo, entraves econômicos, ausência de ventos e impactos naturais têm restringido seu uso em muitos lugares. Diversos grupos de pesquisa têm trabalhado em formas alternativas de geração, comumente chamadas de “Energias levadas pelo vento” (*AWE - Airborne Wind Energy*). Estas alternativas buscam reduzir o custo da geração eólica e extrair a energia dos ventos de altitude, que são mais estáveis e fortes do que aqueles onde as turbinas atuais se encontram. Os métodos que empregam pipas estão ganhando destaque no contexto *AWE*, devido as suas potencialidades e ao baixo custo.

Neste trabalho, o conceito de geração de energia elétrica através de pipas será apresentado, assim como sua capacidade energética e vantagens em relação ao sistema atual. Antes disso, porém, uma breve revisão sobre os fundamentos da geração eólica convencional, da

energia e distribuição dos ventos e de aerodinâmica se faz necessária.

2.1. Turbinas Eólicas e a Potência do Vento

A turbina eólica é o dispositivo mais lembrado quando se fala em geração de energia elétrica utilizando o vento. A Figura 1 apresenta sua estrutura típica, que consiste de um conjunto gerador hélice preso a extremidade de uma torre. A tecnologia *AWE*, contudo, vem se desenvolvendo rapidamente e em breve fará parte de nossas plantas energéticas. Ainda que compartilhem certos princípios, turbinas e dispositivos *AWE* diferem em muitos aspectos técnicos. São passíveis de comparação, todavia, quando mensuradas em termos de eficiência e da quantidade de energia que geram em relação a área que possuem, o chamado fator de extração. Enquanto que a eficiência é encontrada dividindo-se a potência mecânica útil pela potência mecânica do vento que atua sobre o gerador, o fator de extração é a razão entre a potência mecânica útil com a potência de vento existente em uma área semelhante a área do gerador. Para exemplificar, voltemos a turbina da Figura 1, cuja hélice varre uma área A no espaço. O vento é descrito por um vetor velocidade V_w que possui direção e magnitude. A potência mecânica útil P_t entregue pelo rotor da turbina é máxima quando o plano formado por A é perpendicular a direção do vento, ou seja, em $\gamma = 0$ [5].

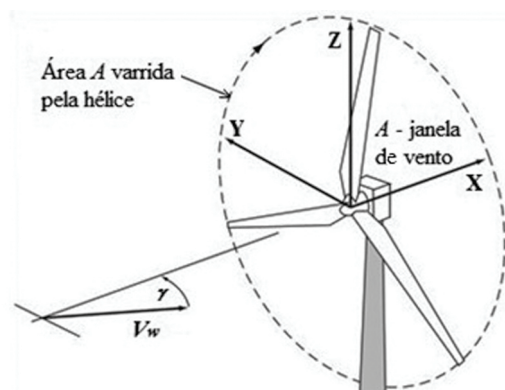


Figura 1: Turbina sob a ação de um vento V_w [5].

Em $\gamma = 0$, portanto, a turbina possui a maior eficiência ϵ_t . Este é o motivo pelo qual as mesmas são projetadas para ajustar automaticamente sua posição na direção perpendicular ao vento. O máximo valor de ϵ_t para uma turbina ideal é de 59,3% da potência disponível de vento P_{wind} que atravessa a área A da turbina. Este valor máximo é conhecido como limite de Betz, em homenagem ao cientista alemão que o deduziu [9].

Vale lembrar que essa eficiência não leva em consideração a transformação da potência mecânica útil P_t em eletricidade. O enfoque aqui é a potência mecânica do vento sobre a turbina com a parcela da mesma que é transformada em potência mecânica útil pelo gerador. A forma com que a potência útil é convertida em eletricidade depende do tipo de turbina. Nenhum método,

porém, é isento de perdas, levando a uma eficiência global ainda menor que Betz:

$$\varepsilon_t = P_t/P_{wind} \leq 0,593, \tag{1}$$

em que P_{wind} é a potência do vento sobre a turbina.

A potência P_{wind} de vento que atua sobre uma turbina de área A quando $\gamma = 0$ é a mesma potência de vento em uma área qualquer A , que é chamada de *janela de vento*.

A potência do vento em certa área A para qualquer ângulo γ é calculada por:

$$P_w = 1/2\rho V_w^3 A \cos \gamma. \tag{2}$$

E, para avaliar a eficiência de turbina, usam o fator de extração ζ_t da turbina, que é a razão entre a potência útil e a potência do vento em uma área semelhante à área A da turbina:

$$\zeta_t = P_t/P_w, \tag{3}$$

em que P_w é dado em Watts, V_w em m/s, ρ é a densidade do ar em kg/m^3 e ζ_t é adimensional.

Assim, em $P_{wind} = P_w$ tem-se a máxima eficiência e o máximo fator de extração, ou seja, $\varepsilon_{tmax} = \zeta_{tmax} = 0,593$. Essa relação é válida apenas quando a turbina estiver perpendicular à direção do vento. Esse resultado é conceitualmente importante, pois a máxima eficiência não é necessariamente igual ao máximo fator de extração para qualquer gerador. Veremos, posteriormente, que a potência máxima de uma pipa operando em vento cruzado é muito maior do que a potência P_w do vento em uma área semelhante à área dessa pipa.

A potência P_w do vento é, comumente, expressa em termos da densidade de potência δ . Assim:

$$P_w = \delta A. \tag{4}$$

$$\delta = 1/2\rho V_w^3, \tag{5}$$

em que δ é densidade de potência em W/m^2 , uma vez que P_w está em Watts.

A densidade de potência δ leva em consideração a velocidade V_w do vento e da densidade ρ do ar e trata-se

de uma quantidade que representa a potência do vento por unidade de área. Enquanto ρ diminui em direção às camadas mais altas da atmosfera (ar mais rarefeito), a velocidade V_w aumenta. Como a parcela relacionada à velocidade contribui ao cubo, a densidade de potência δ do vento aumenta com a altitude. Isto é, qualquer sistema de extração eólica operando em grandes altitudes gerará mais energia do que aquele próximo ao solo. Além disso, os ventos em grandes altitudes são mais consistentes e constantes. Isto significa que sistemas instalados nessas regiões podem fornecer energia de forma praticamente contínua.

Como a densidade de potência do vento é maior nas regiões mais altas, espera-se que os *AWEs* possuam Fatores de Capacidade (*FC*) muito superiores aos obtidos pelas turbinas. O Fator de Capacidade é uma medida da quantidade de energia produzida em dado local durante o período de um ano, em relação à potência nominal instalada, conforme Fagiano e Milanese [10]. Assim, a viabilidade econômica de projetos envolvendo energia eólica está intimamente ligada a altos valores de *FCs*. A atual tecnologia de turbinas é tida como viável para Fatores de Capacidade superiores a 0,3. A Tabela 1 apresenta os *FCs* para algumas regiões na altitude de operação (50 a 150 m) de uma turbina eólica com potência nominal de 2 MW com 90 m de diâmetro. As regiões cujos ventos são mais fortes e frequentes são as que possuem os maiores *FCs*, e, por esse motivo, são atraentes para a instalação de turbinas. Ainda na Tabela 1, o *FC* foi estimado para um *AWE* do tipo “Gerador em terra” (*GLG - Ground Level Generator*) operando no intervalo de 200 a 800 m para a mesma potência nominal de 2 MW e $A = 500 \text{ m}^2$. Nos melhores locais, o Fator de Capacidade do *AWE* é praticamente duas vezes o da turbina. Se considerarmos o mesmo custo por MW entre as duas tecnologias, o retorno econômico é mais do que o dobro [10].

Esses dados nos mostram ainda que geradores *AWE* são viáveis mesmo em locais tradicionalmente inadequados para turbinas. Em Porto Alegre, por exemplo, a instalação do gerador *AWE* considerado na Tabela 1 é atraente, pois seu fator de capacidade é de 0,52. Já a

Tabela 1: Velocidade média do vento e Fatores de Capacidade estimados¹.

Local	Velocidade média do vento		FC estimado	
	50 - 150 m	200 - 800 m	Torre eólica	<i>AWE - GLG</i>
Buenos Aires (Argentina)	5.7 m/s	9.1 m/s	0,18	0,63
Melbourne (Austrália)	5.2 m/s	8.7 m/s	0,15	0,56
Porto Alegre (Brasil)	4.9 m/s	7.5 m/s	0,13	0,52
Nenjiang (China)	2.7 m/s	5.2 m/s	0,04	0,30
Calcutá (Índia)	2.8 m/s	5.6 m/s	0,02	0,31
Misawa (Japão)	4.4 m/s	7.8 m/s	0,11	0,50
Casablanca (Marrocos)	2.4 m/s	7.0 m/s	0,03	0,45
St. Petersburg (Rússia)	4.1 m/s	8.5 m/s	0,1	0,59
Murcia (Espanha)	2.6 m/s	5.9 m/s	0,03	0,35
Nottingham (Reino Unido)	1.3 m/s	5.3 m/s	0,01	0,31
Point Barrow (Alaska, EUA)	6.6 m/s	8.8 m/s	0,25	0,59

¹Informações foram coletadas diariamente de 1º de janeiro de 1996 a 31 de dezembro de 2006 [10].

instalação de turbinas não é viável visto que $FC = 0,13$ é demasiado baixo.

A atual velocidade de desenvolvimento de sistemas *AWE*, aliada à sua capacidade para atingir grandes altitudes e operar em vento cruzado, nos permite esperar um aumento significativo na quantidade de energia extraída do vento em uma escala global nos próximos anos.

2.2. Produção de energia elétrica por meio de pipas

A utilização de pipas para a produção de energia sempre esbarrou em muitas dificuldades. As turbinas eólicas, contudo, ganharam importância com a crise do petróleo na década de 1970 e, hoje, estão em plena operação e comercialização. O emprego de pipas, porém, não costumava ir além das aplicações envolvendo a tração de cargas. Com o trabalho de Loyd [2], um importante passo foi dado nessa direção. Implementações sérias de protótipos, contudo, só apareceram na última década, quando materiais leves e resistentes o suficiente para suportar as forças atuando tanto na pipa quanto na corda foram desenvolvidos [3, 6, 11, 12, 13]. Além disso, por ser um sistema instável e sensível às variações ambientais, a pipa necessita de um controle automático sofisticado, que exige recursos de navegação e sensoriamento que só recentemente se tornaram disponíveis.

Embora exista uma grande variedade de pipas, conversores, materiais, dispositivos de acionamento, técnicas de controle, sensores, dentre outros, os geradores costumam basear-se em um de dois modos de operação: **sustentação** ou **arrasto**. Esses modos de operação produzem mais energia se a pipa (ou asa) voar em um sentido perpendicular à direção do vento, ou seja, em vento cruzado. Uma pipa em vento cruzado gera muito mais energia que uma pipa estática no ar.

No modo de operação em **arrasto**, uma turbina é acoplada ao corpo da pipa. Conforme a pipa se desloca rapidamente pelo céu em uma direção de vento cruzado, o fluxo de ar passa através das pás da turbina, gerando eletricidade. A grande vantagem da pipa é que não é preciso instalar uma torre, economizando muito em material. A torre é substituída pela corda nesses sistemas. Além disso, as pipas podem chegar muito mais alto e captar a energia de ventos mais fortes. Mas essa possibilidade tem um preço: como a eletricidade precisa ser transmitida para o solo, quanto maior a distância da estação em terra, maiores são as perdas. Além disso, as turbinas precisam ser leves para permitir o voo da pipa, o que pode limitar sua potência. O sistema asa-turbina substitui as pontas das pás de uma turbina eólica convencional que, de fato, são responsáveis pela maior parte da energia produzida pela turbina [3]. A redução de material é visível. Um protótipo desenvolvido pela *Makani Power* é mostrado na Figura 2.

Quando em voo, a pipa experimenta forças oriundas da ação do vento sobre sua superfície. Essa força é trans-

ferida na forma de tensão para a corda que a segura. No modo **sustentação**, a tensão da corda é utilizada para tracionar uma carga ou um gerador elétrico em terra. A principal diferença entre a tração de cargas e a produção de energia é que ao invés de um objeto móvel no solo (comumente navios), tem-se um dispositivo mecânico acoplado a um gerador elétrico. Um protótipo é mostrado na Figura 3 [14].

Na Figura 4, são mostrados, esquematicamente, ambos os modos de extração de energia em comparação com a uma turbina eólica imaginária.



Figura 2: Pipa da Makani em voo [6].



Figura 3: Pipa em modo sustentação [14].

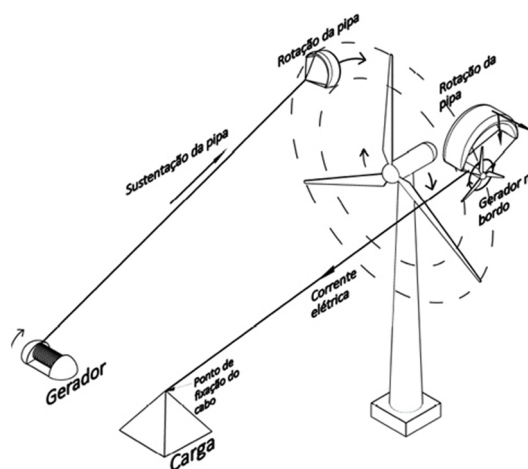


Figura 4: Pipa em modo de sustentação e em modo de arrasto substituindo uma torre eólica.

A Figura 5 representa o princípio de operação de pipa em modo de sustentação. O deslocamento ascendente da pipa traciona a corda e, esta, o gerador. Essa operação é chamada de *reel-out*. A pipa que busca o voo em vento cruzado possui, em geral, trajetória circular ou em forma de “oito”, pois essas são as que melhor se aproximam da condição ideal [15]. A trajetória em forma de “oito”, contudo, é preferida por evitar que a corda sofra torções exageradas ou se enrolem nas topologias de geradores que utilizam mais de uma corda. A trajetória da pipa enquanto sobe tem relação direta com a quantidade de energia convertida, sendo máxima quando a direção do movimento for perpendicular ao vento. Obviamente, a corda deverá ser baixada em dado momento para iniciar uma nova tração. Esse procedimento de recolher a pipa é chamado de *reel-in* e consome energia. A energia produzida na fase de tração (*reel-out*), portanto, deve ser maior do que a consumida na fase de recuo (*reel-in*) a fim de sustentar o ciclo. Existem diversos métodos para recuar a pipa, todos procuram fazê-lo com o menor consumo de energia e no menor tempo.

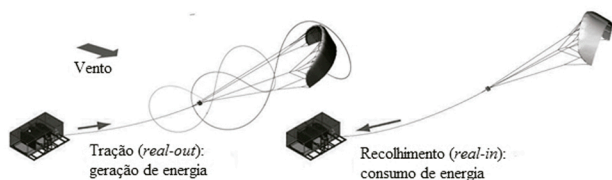


Figura 5: Princípio de operação em modo sustentação [3].

2.3. Fundamentos de aerodinâmica

Uma pipa é um dispositivo aerodinâmico cujo movimento é restringido por uma corda ou um barbante. A pipa como a asa de um avião está sob a ação de um fluxo de ar durante o voo. A velocidade relativa V_a do fluxo de ar pode ser encontrada pela seguinte equação:

$$V_a = V_w - V_c, \tag{6}$$

em que V_a , V_c e V_w são quantidades vetoriais.

A direção deste fluxo determina o sentido da força aerodinâmica F_a que coloca a pipa em movimento. A Figura 6 representa o que acontece quando um fluxo de ar com velocidade V_a passa através da seção transversal de um aerofólio posicionado a um ângulo de ataque α [16]. Por definição, a força de sustentação L age perpendicularmente ao vetor V_a , enquanto a força de arrasto D atua paralelamente a ele. As magnitudes de L e D são determinadas pelas seguintes equações:

$$L = 1/2\rho C_L A_p |V_a|^2, \tag{7}$$

$$D = 1/2\rho C_D A_p |V_a|^2, \tag{8}$$

em que L e D são as magnitudes dos vetores L e D dados em Newton (N), V_a em m/s, ρ é densidade do ar em kg/m³, A_p é a área da pipa, ou asa, em m² e C_L e C_D são adimensionais.

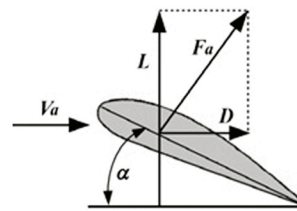


Figura 6: Forças aerodinâmicas sob a superfície de um aerofólio [16].

Observando a Figura 6 verifica-se que o papel da força L é sustentar o corpo contra seu peso mg enquanto D limita ou “freia” o corpo na direção de seu deslocamento. Ao invés de considerar seus valores absolutos, ambas as forças são mais bem representadas por coeficientes de sustentação e de arrasto, C_L e C_D , respectivamente. Esses coeficientes não são constantes e variam de acordo com o modelo de aerofólio, do ângulo de ataque α , da velocidade do fluxo de ar e de outros fatores. A razão $E = C_L/C_D$ (igual a L/D) é chamada de *gliding number* [3]. E é uma medida da força de sustentação que um aerofólio pode gerar em comparação ao seu arrasto. Quanto maior o valor de E mais eficiente é o aerofólio e mais energia irá extrair se utilizado em um gerador.

Um exemplo de aproveitamento da força aerodinâmica é o movimento das pipas de *kitesurf*, como é mostrado na Figura 7. A surfista está usando uma parte D_c da força de arrasto D que é coincidente com o vetor de velocidade da pipa V_c . As outras componentes da força aerodinâmica F_a foram compensadas por peso e resistência da surfista.



Figura 7: Diagrama de forças e velocidades que atuam em uma surfista.

2.4. Capacidade energética da pipa

A pipa, como um veículo aerodinâmico movido no ar, pode gerar energia de duas maneiras:

- puxando um gerador elétrico em terra pela corda, que se desloca a uma velocidade $V_L = V_{out}$ e possui uma força de tração T , ou
- aproveitando a força de arrasto D , que velocidade relativa V_a do ar imprime sobre um sistema formado por uma turbina acoplada a uma pipa.

Baseando-nos no trabalho de Loyd, demonstraremos que a potência mecânica útil P_p fornecida por ambos os métodos é similar e influenciada pela velocidade do vento, pela densidade do ar, pela área A_p da pipa e pelos seus coeficientes aerodinâmicos de sustentação e arrasto, C_L e C_D , respectivamente.

A potência extraída por uma pipa de área A_p , assim como para uma turbina eólica, representa somente uma parte da potência do vento:

$$P_p = \delta A_p \zeta_p^i, \tag{9}$$

em que δ é a densidade de potência do vento, determinada pela equação (5) e ζ_p^i é um fator de extração da energia do vento que depende do método de voo da pipa no espaço.

Para deduzir a potência gerada em sustentação, assume-se que:

- a força de arrasto D deve-se exclusivamente ao arrasto intrínseco da pipa;
- a corda não possui arrasto;
- a pipa e a corda não possuem peso;
- as forças agem apenas em um ponto da pipa – modelo pontual;
- a corda é perfeitamente reta e inelástica;
- controle de voo e do desenrolar da corda já esteja sendo efetuado.

2.4.1. Energia gerada pela pipa em sustentação simples

Sustentação simples é quando a pipa não possui movimento lateral e desloca-se somente no sentido do vento, ou seja, não opera em vento cruzado. A energia pode ser gerada no solo se a pipa sobe movida pela força de sustentação L e o cabo se desenrola de um tambor ligado a um gerador elétrico. As forças e velocidades na pipa em sustentação simples são mostradas na Figura 8. Assume-se que a pipa e a corda possuem velocidade de subida V_{out} constante.

A potência gerada pela pipa em sustentação simples é igual a:

$$P_p = \mathbf{T} \cdot \mathbf{V}_{out}. \tag{10}$$

Baseando no esquema de forças da Figura 8b, em que $\mathbf{T} = \mathbf{L} + \mathbf{D}$, ou $T^2 = L^2 + D^2$, obtemos:

$$T = L \sqrt{1 + \left(\frac{L}{D}\right)^2}, \tag{11}$$

Substituindo V_a com a equação (14) e b e c com as equações (12) e (13), respectivamente, obtemos:

$$\zeta_p^s = C_L \left(\frac{V_{out}}{V_W}\right) \frac{\left[\sqrt{V_W^2 - (V_{out}E/\sqrt{E^2+1})^2} - V_{out}/\sqrt{E^2+1}\right]^2 \sqrt{1+1/E^2}}{V_W^2}.$$

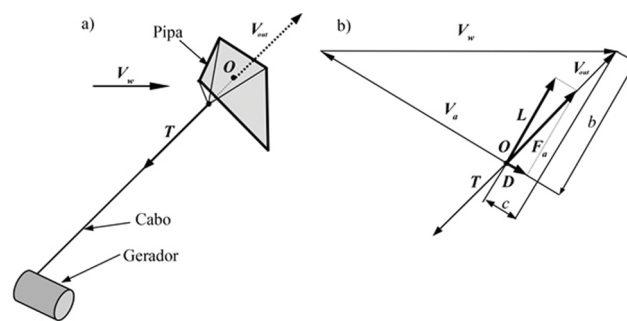


Figura 8: a) Esquema de pipa em sustentação simples, b) Diagrama de forças e velocidades em cima de uma pipa sem peso.

em que a força de sustentação e de arrasto são determinadas pelas equações (7) e (8) respectivamente. T, L e C são os módulos dos vetores correspondentes, e $L/D = C_L/C_D$. A razão C_L/C_D é conhecida como *gliding number* E [3].

Pela semelhança de triângulos de velocidades e forças, podemos escrever a seguinte razão: $b/V_{out} = L/T$, da qual, com a equação (11) resulta em:

$$b = V_{out}E / \sqrt{E^2 + 1}. \tag{12}$$

Analogicamente, a relação $c/V_L = D/T$ se torna:

$$c = V_{out} / \sqrt{E^2 + 1}. \tag{13}$$

Do esquema de triângulo de velocidades na Figura 8b:

$$V_W = \sqrt{b^2 + (V_a + c)^2}, \text{ ou } V_a = \sqrt{V_W^2 - b^2} - c. \tag{14}$$

Para a sustentação simples, o fator ζ_p^i toma ζ_p^s . Isolando ζ_p^s da equação (9) e usando a equação (10), temos:

$$\zeta_p^s = \frac{P_p}{\delta A_p} = \frac{TV_{out}}{1/2\rho V_W^3 A_p}. \tag{15}$$

Substituindo T e V_{out} na equação (15) com a equação (11) e usando a fórmula $V_{out} = V_W(V_{out}/V_W)$:

$$\zeta_p^s = \frac{L\sqrt{1+1/E^2}V_W(V_{out}/V_W)}{1/2\rho V_W^3 A_p}. \tag{16}$$

Substituindo L com a equação (6) e simplificando o termo $1/2\rho C_L$, temos:

$$\zeta_p^s = C_L \frac{V_a^2 \sqrt{1+1/E^2} (V_{out}/V_W)}{V_W^2}.$$

Após algumas transformações algébricas, e colocando em evidência os termos E e V_{out}/V_W , obtemos a fórmula final:

$$\zeta_p^s = C_L \left(\frac{V_{out}}{V_W} \right) \frac{\left[\sqrt{1+1/E^2 - (V_{out}/V_W)^2} - (V_{out}/V_W)/E \right]^2}{\sqrt{1+1/E^2}} \tag{17}$$

O fator ζ_p^s na equação (17) depende dos três parâmetros: de C_L e C_D e da razão V_{out}/V_W . Se considerarmos os valores $C_L = 1$ e $C_D = 0,1$ (correspondente ao valor moderado de E igual a 10), o valor máximo do fator ζ_{pmax}^s atinge aproximadamente 0,34 para $V_{out}/V_W \approx 0,54$. O fator ζ_p^s varia muito pouco na faixa de E entre 5 e 50. Isto é, de acordo com a equação (9), o fator ζ_p^s diminui a potência extraída pela pipa no modo de sustentação simples aproximadamente 3 vezes.

2.4.2. Potência de uma pipa em modo sustentação voando em vento cruzado

O voo em vento cruzado caracteriza-se pelo deslocamento transversal da pipa em relação ao vento. O vetor \mathbf{V}_w e o vetor velocidade longitudinal da pipa, \mathbf{V}_{cr} , são perpendiculares entre si, conforme esquema da Figura 9. Enquanto no voo tradicional (Figura 8) a pipa se mantém praticamente estática no céu, em vento cruzado, a pipa se desloca em alta velocidade na direção perpendicular ao vento. Esse método possibilita um aumento de P_p , pois a velocidade relativa \mathbf{V}_a sobre a pipa se torna muito grande, e, por conseguinte, a força aerodinâmica \mathbf{L} .

O esquema da Figura 9 será utilizado para derivar a potência extraída em modo sustentação. No modo sustentação, o gerador está no solo, exatamente como representado na Figura 9.

Para análise, vamos assumir as simplificações adicionais:

- o deslocamento da pipa é perpendicular ao vento em todos os instantes, isto é, desloca-se em vento cruzado durante toda sua trajetória;
- o comprimento da corda é infinito;
- o ângulo formado pela corda e pelo plano \mathbf{XY} (solo) é zero;
- a velocidade da corda é constante e paralela ao solo;
- o vento atua ao longo de \mathbf{X} positivo e não possui outras componentes.

Na Figura 9, são mostrados os vetores unitários \mathbf{e}_r , \mathbf{e}_p e \mathbf{e}_y do sistema de coordenadas do corpo da pipa (“roll” – rolamento, “pitch” – arfagem e “yaw” – guinada, respectivamente).

Esses vetores, mais o sistema de coordenadas universal (\mathbf{X} , \mathbf{Y} , \mathbf{Z}), serão utilizados para representar as grandezas envolvidas. O vetor \mathbf{e}_r (\mathbf{e}_{roll}) aponta no sentido longitudinal do corpo da pipa, \mathbf{e}_p (\mathbf{e}_{pitch}) no sentido transversal e, por fim, o vetor \mathbf{e}_y (\mathbf{e}_{yaw}) aponta no sentido da corda. O sistema de coordenadas cartesianas \mathbf{X} , \mathbf{Y} , \mathbf{Z} está orientado de tal forma que a força gravitacional atua ao longo de \mathbf{Z} positivo. O movimento no sentido perpendicular ao vento é fornecido graças ao controle de rolamento da pipa em torno de \mathbf{e}_r .

Na Figura 9 tem-se uma pipa voando em vento cruzado cuja força de tração T tem o mesmo módulo da força aerodinâmica $F_a = \sqrt{L^2 + D^2}$ e está paralela à direção do vento, ou seja, $\gamma = 0$. A pipa desloca-se com velocidade \mathbf{V}_{cr} na direção negativa de \mathbf{Y} enquanto o gerador desenrola sua corda com velocidade \mathbf{V}_{out} na direção de \mathbf{X} . A potência mecânica aplicada ao gerador em terra é igual à extraída pela pipa, portantoo:

$$P_p^L = T \cdot V_{out} \tag{18}$$

O vento relativo \mathbf{V}_a é encontrado através da Equação (6). Uma vez que $\mathbf{V}_L = \mathbf{V}_{out} = \mathbf{V}_{cy}$, temos:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_a &= \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{ay} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{wr} \\ V_{wy} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{cr} \\ V_{cy} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -V_{cr} \\ V_w - V_{cy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -V_{cr} \\ V_w - V_{out} \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{19}$$

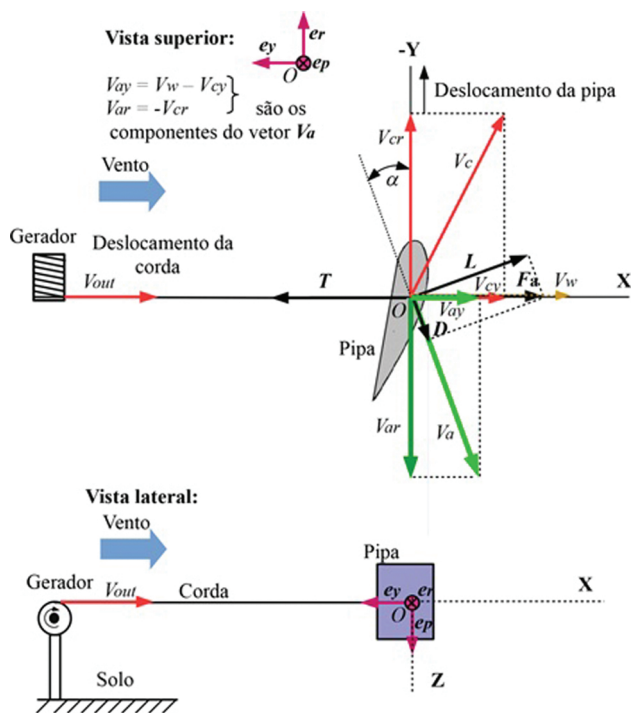


Figura 9: Esquema de uma pipa em modo sustentação voando em vento cruzado.

Por definição, a força de arrasto D atua paralelamente a V_a , enquanto a força de sustentação L atua no sentido perpendicular. A simetria entre os triângulos de força e de velocidade relativa na Figura 9 nos permite escrever que:

$$\frac{V_{ar}}{V_{ay}} = \frac{V_{cr}}{V_w - V_{out}} = \frac{L}{D} = \frac{C_L}{C_D} = E. \quad (20)$$

Substituindo V_{cr} com V_{out} na equação (19), podemos calcular $|V_a|^2$ na seguinte maneira:

$$|V_a|^2 = V_{ar}^2 + V_{ay}^2 = [(V_w - V_{out}) E]^2 + (V_w - V_{out})^2. \quad (21)$$

Considerando $E \gg 1$, que é sempre válido para aerofólio na sustentação:

$$V_a \cong (V_w - V_{out}) \frac{L}{D} = (V_w - V_{out}) \frac{C_L}{C_D} = (V_w - V_{out}) E. \quad (22)$$

Porque T e L são aproximadamente iguais para $E \gg 1$:

$$P_p^L = TV_{out} \cong LV_{out}. \quad (23)$$

Então, pelas equações (6) e (22) temos:

$$L = 1/2\rho C_L A_p (V_w - V_{out})^2 E^2. \quad (24)$$

Combinando as equações (5), (23) e (24) e simplificando na Equação (9), teremos para $\zeta_p^L = \zeta_p^L$:

$$P_p^L = \delta A_p \zeta_p^L.$$

Isolando ζ_p^L :

$$\zeta_p^L = \frac{P_p^L}{\delta A_p}.$$

Substituindo δ e P_c com as equações (5) e (23):

$$\zeta_p^L = \frac{LV_{out}}{1/2\rho V_w^3 A_p}.$$

Substituindo L com a equação (24):

$$\zeta_p^L = \frac{1/2\rho C_L A_p (V_w - V_{out})^2 E^2 V_{out}}{1/2\rho V_w^3 A_p}.$$

Após a substituição $V_{out} = V_w (V_{out}/V_w)$ e simplificação temos:

$$\zeta_p^L (V_{out}/V_w) = C_L E^2 (V_{out}/V_w) (1 - V_{out}/V_w)^2. \quad (25)$$

De acordo com as equações (9) e (25) temos:

$$P_p^L (V_{out}/V_w) = \delta A_p C_L E^2 (V_{out}/V_w) (1 - V_{out}/V_w)^2. \quad (26)$$

A equação (26) representa a potência útil extraída de um sistema gerador com pipa em modo sustentação operando em vento cruzado. O nome sustentação faz jus ao comportamento, uma vez que a maior parcela da tensão na corda se deve à força de sustentação. A potência em função da velocidade do vento e da corda já era esperada, pois P_p^L

depende de V_{out} e da tensão T que, em última instância, está vinculada às características aerodinâmicas da pipa e da velocidade relativa V_a . Vale lembrar que a equação da potência assume uma relação $E = C_L/C_D$ muito maior que a unidade. Essa condição costuma ser verdadeira, uma vez que o arrasto é indesejável e os aerofólios mais eficientes maximizam esse número.

Porém, nem toda potência do vento será entregue a esse gerador. A potência mecânica útil P_p^L alcançada é o valor de P_{wind} menos uma parcela P_{loss} referente às perdas. Assim:

$$P_p^L = P_{wind} - P_{loss}. \quad (27)$$

O limite inferior para P_{loss} , ou seja, a quantidade mínima de perdas para um AWE é o produto entre a velocidade aparente do ar V_a com a força de arrasto D , que inclui o arrasto inerente do aerofólio somado ao arrasto da corda [2]. Se $P_{loss} = V_a D$, $P_p^L \cong LV_{out}$ e $P_{wind} = TV_w \cong LV_w$ para $C_L \gg C_D$, podemos escrever para a eficiência ε_p^L de uma pipa:

$$\varepsilon_p^L = P_p^L / P_{wind} = LV_{out} / LV_w = V_{out} / V_w.$$

Substituindo P_p^L da equação (26), podemos escrever para a potência do vento:

$$P_{wind} (V_{out}, V_w) = P_p^L / \varepsilon_p^L = \delta A_p C_L E^2 (1 - V_{out}/V_w)^2. \quad (28)$$

Encontram-se representadas na Figura 10 as funções P_{wind} , P_p^L , P_w e P_{max} para uma pipa voando em vento cruzado no modo de sustentação.

Interessante notar que a potência útil máxima P_{pmax}^L de 100 KW é muito superior à potência P_w de 6,75 KW de uma área de 90 m². Isso é possível, porque a pipa retira muito mais potência do vento comparativamente à sua própria área. Ao fornecer 100 KW de potência útil, o vento perde uma potência P_{wind} de 300 KW. No ponto ótimo de operação, portanto, a eficiência desse gerador é de 1/3. Essa eficiência nos diz que 2/3 da potência do vento são perdidos devido ao arrasto e apenas 1/3 é convertido em potência útil.

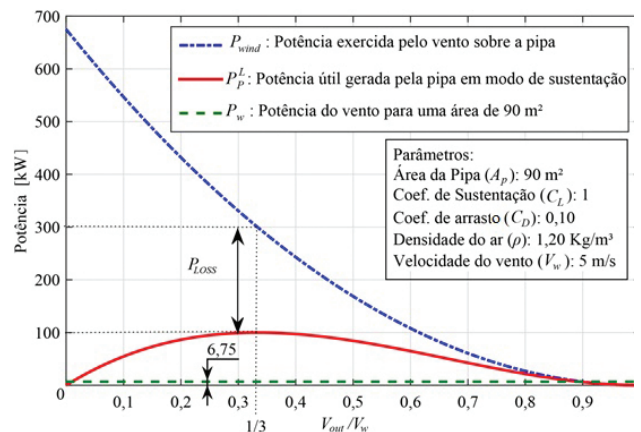


Figura 10: Gráficos de energias geradas por uma pipa em modo sustentação voando em vento cruzado.

Como a potência útil P_p^L não depende apenas da velocidade com que a corda é desenrolada, mas também da força de tração, o valor de P_{pmax}^L representa o melhor compromisso entre essas duas variáveis. Se a velocidade V_{out} for igual à velocidade do vento, ou seja, $V_{out}/V_w = 1$, então a pipa está solta e sendo levada pela massa de ar, não resistindo a esse movimento. Nessa situação, não há força agindo contra o deslocamento do vento, logo, não há produção de energia. Por outro lado, se a pipa está presa ao ponto de fixação, com velocidade $V_{out} = 0$, a força aerodinâmica é máxima, mas também não está sendo gerada energia, pois não há movimento do gerador. Assim, para operar de maneira ótima, a velocidade do vento precisa ser monitorada e o controlador da corda precisa desenrolá-la a 1/3 da velocidade do vento, ou $V_{out}/V_w = 1/3$, conforme mostra o gráfico.

A potência máxima alcançada por uma pipa em sustentação voando em vento cruzado é, portanto, o valor da função $P(V_{out}, V_w)$, avaliada para uma relação $V_{out}/V_w = 1/3$:

$$P_{pmax}^L = \delta C_L A_p \left(\frac{C_L}{C_D}\right)^2 \frac{1}{3} \left(1 - \frac{1}{3}\right)^2 = \frac{2}{27} \rho A_p V_w^3 C_L \left(\frac{C_L}{C_D}\right)^2 \tag{29}$$

De acordo com a equação (25), o valor máximo do fator de extração ζ_p^L em modo de sustentação da pipa no vento cruzado é atingido quando a relação $V_{out}/V_w = 1/3$:

$$\zeta_{pmax}^L = 4/27 E^2 \tag{30}$$

Para o valor de *gliding number* $E = 10$, i.e. $C_L = 1$ e $C_D = 0,1$, $\zeta_{pmax}^L = 14,8$.

Comparando com a pipa na sustentação simples, a extração de energia aumentou:

$$\frac{\zeta_{pmax}^L}{\zeta_{pmax}^L} = \frac{14,8}{0,34} \cong 43 \text{ vezes.}$$

Comparando com a turbina eólica ideal que tem o valor máximo de extração de energia $\zeta_{tmax} = \epsilon_{tmax} = 0,593$ igual ao limite de Betz, a eficácia teórica de uma pipa com a mesma área é $\zeta_{pmax}^L/\zeta_{tmax} = 14,8/0,593 \cong 25$ vezes maior.

Esse resultado indica que, para uma pipa de área A_p e $E = C_L/C_D = 10$, uma turbina eólica deverá ter área $25A_p$ sob a mesma densidade δ para produzir potência similar. Em um local cuja velocidade média do vento gire em torno de 5 m/s, por exemplo, uma turbina deverá ter área mínima de 2250 m² para fornecer 100 KW. Isso nos leva a um diâmetro de hélice de ≈ 54 m. Na maioria dos casos, a aplicação de tal turbina é economicamente inviável, devido à baixa velocidade do vento, ao tamanho da turbina e à quantidade de energia extraída. Todavia, levando em consideração o aumento do fator de capacidade (veja a Tabela 1), um gerador com uma pipa de 90 m² pode ser interessante nessa situação.

2.4.3. Potência de uma pipa em modo arrasto voando em vento cruzado

Como mencionamos na seção 2.2, a energia pode ser produzida pela força de arrasto que atua na pipa voando em vento cruzado. Uma turbina acoplada ao corpo da pipa usa a força de arrasto adicional para gerar energia, que é transmitida ao consumidor em terra através de um cabo preso a corda.

Desprezando as perdas na conversão da energia elétrica, a potência produzida pelas turbinas se deve ao arrasto adicional D_A . Como pôde ser visto na Figura 9, a força de arrasto atua ao longo do movimento relativo da pipa com velocidade V_a . Então, a potência gerada por uma turbina acoplada em sua estrutura é dada por:

$$P_p^A = D_A \cdot V_a \tag{31}$$

A força de arrasto somatória é igual a $D + D_A$ e a velocidade de sustentação $V_L = V_{cy} = V_{out} = 0$. Assim, a equação (22) torna-se:

$$V_a = V_w \frac{L}{(D + D_A)} \tag{32}$$

Para o modo de arrasto, a equação (9) pode ser reescrita na forma:

$$P_p^A = \delta A_p C_L \zeta_p^A \tag{33}$$

Isolando ζ_p^A e substituindo P_p^A da equação (31) e δ da equação (5), obtemos:

$$\zeta_p^A = \frac{D_A V_a}{\frac{1}{2} \rho V_w^3 A_p C_L}$$

Substituindo V_w da equação (32) e simplificando V_a :

$$\zeta_p^A = \frac{D_A}{\frac{1}{2} \rho V_a^2 A_p C_L \left(\frac{D+D_A}{L}\right)^3}$$

Substituindo L da equação (6):

$$\zeta_p^A = \frac{D_A}{L \left(\frac{D+D_A}{L}\right)^3} = \frac{D_A}{L^2 (D+D_A)^3}$$

Isolando D_A :

$$\begin{aligned} \zeta_p^A &= \frac{D_A}{\frac{1}{L^2} D^3 \left(\frac{D_A}{D} + 1\right)^3} = \frac{D_A}{\frac{D^3}{L^2} \left(\frac{D_A}{D} + 1\right)^3} \\ &= \frac{D_A}{\left(\frac{D}{L}\right)^2 D \left(\frac{D_A}{D} + 1\right)^3} = \frac{D_A}{\left(\frac{D}{L}\right)^2 D \left(\frac{D_A}{D} + 1\right)^3} \end{aligned}$$

Reajustando a posição de D :

$$\zeta_p^A = \left(\frac{L}{D}\right)^2 \frac{\frac{D_A}{D}}{\left(1 + \frac{D_A}{D}\right)^3} \tag{34}$$

O valor máximo do fator de extração é alcançado para $D = D_A$:

$$\zeta_{pmax}^A = \frac{4}{27} \left(\frac{L}{D}\right)^2 = \frac{4}{27} E^2 \tag{35}$$

Comparando as equações (30) e (35), podemos concluir que os fatores máximos de extração de energia em vento cruzado para modo de sustentação e arrasto são teoricamente iguais.

3. Considerações finais

Neste artigo foram representadas as noções teóricas de extração de energia elétrica por meio das pipas. De fato, ao compararmos a potência extraída por uma pipa em vento cruzado com aquela gerada por uma turbina convencional, o voo em vento cruzado tem um efeito “multiplicador” de área. Isto possibilita uma grande redução de custos em materiais e a produção de energia em áreas pouco atraentes do ponto de vista das turbinas convencionais. Porém, muitas dificuldades técnicas precisam ser sanadas até o fornecimento de soluções comerciais empregando pipas. As mais urgentes se referem a robustez e a segurança do sistema. Ou seja, de que forma o gerador vai se comportar durante tempestades e rajadas de vento e como reduzir os riscos as pessoas e construções em seu entorno. Essas questões ainda carecem de respostas. Vários grupos, entretanto, estão pesquisando com o intuito de resolver esses problemas e tornar o negócio economicamente viável. Em virtude da capacidade eólica brasileira, da crescente demanda por energia e a preocupação constante com as questões ambientais, o estudo e o desenvolvimento da tecnologia de geração eólica com o uso de pipas deve estar entre nossas prioridades.

Referências

- [1] F.R. Martins, R.A. Guarnieri e E.B. Pereira, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **30**, 1304 (2008).
- [2] M.L. Loyd, *Journal of Energy* **4**, 106 (1980).
- [3] U. Ahrens, M. Diehl and R. Schmehl, *Airborne Wind Energy* (Springer, Berlin, 2013), 611 p.
- [4] A.P. Picolo, A.J. Ruhler and G.A. Rampinelli, *Rev. Bras. Ensino Fís.* **36**, 4 (2014).
- [5] T. Burton, N. Jenkins, D. Sharpe and E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook* (John Wiley & Sons, West Sussex, 2011), 780 p.
- [6] <https://x.company/makani>, acessado em Agosto 2017.
- [7] http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf, acessado em Agosto 2017.
- [8] <http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2017/03/brasil-e-o-maior-gerador-de-energia-eolica-da-america-latina>, acessado em Agosto 2017.
- [9] A. Betz, *Introduction to the Theory of Flow Machines* (Pergamon Press, Oxford, 1966).
- [10] L. Fagiano, M. Milanese, *in: Proc. American Control Conference*, Montréal, p. 3132-3143 (2012).
- [11] <http://www.novatel.com/solutions/attitude/>, acessado em Agosto 2017.
- [12] A. Cherubini, A. Papini, R. Vertechy and M. Fontana, *Renewable & Sustainable Energy Reviews* **51**, 1461 (2015).
- [13] <http://www.kitegen.com/en/>, acessado em Agosto 2017.
- [14] G.M. Maneia, *Aerodynamic Study of Airfoils and Wings for Power Kites Applications*. MSc Thesis, Politecnico di Torino, 2007, 113 p.
- [15] L. Fagiano, A.U. Zraggen, M. Morari and M. Khammash, arXiv, abs/1301.1064 (2013).
- [16] E.L. Houghton and P.W. Carpenter, *Aerodynamics for Engineering Students* (Butterworth-Heinemann, Burlington 2003), 5. ed, 590 p.