



Geração de energia elétrica com pipa

Stanislav Tairov¹, Daniel Agnoletto², Atílio Pinno Fetter³

¹ Universidade de Caxias do Sul (vtairov@ucs.br)

² Universidade de Caxias do Sul (daagno@hotmail.com)

³ Universidade de Caxias do Sul (atilliopf@hotmail.com)

Resumo

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 elétrica por pipas são apresentados. Foi mostrado que a máxima potência alcançada pelo modelo teórico utiliza vento cruzado.

Palavras-chave: Pipa. Gerador eólico. Vento cruzado.

Área Temática: Energia e energias renováveis.

Generation of electric energy using a kite

Generation of electric energy using a kite

Abstract

The use of kites is ancient in human history, but only since the 80s arrangements for power generation began to be considered. In this work, the physical and mathematical principles of electricity generation by kites are presented. It was shown that the maximum power is reached by the theoretical model of the kite using crosswind.

Key words: Kite. Wind generator. Crosswind.

Theme Area: Energy and renewable energy.



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. Os ganhos adicionais de potência não cobrem os custos de produção, operação e manutenção dessas turbinas. As torres não alcançam os ventos fortes e constantes das camadas altas da atmosfera, de onde poderiam extraír mais energia (AHRENS et al., 2013).

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. Ele demonstrou que a energia pode ser gerada a partir das forças aerodinâmicas de sustentação e arrasto atuando na pipa durante o voo. Os métodos propostos prometem reduzir 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 produzir mais energia por quantidade de material. 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. Além disso, pipas atingem maiores altitudes e podem extraír a energia de ventos inexplorados.

Loyd (1980) estimou a potência gerada por uma pipa com área de aproximadamente 576 m², equivalente a área das asas de um avião C-5A. O valor médio encontrado foi de 6,7 MW, quase três vezes a potência da maior turbina eólica da época. Comparação semelhante foi feita com as asas de um Airbus A380 (AHRENS et al., 2013). As asas desse Airbus medem 845 m², pesam cerca de 30 toneladas e delas pode-se extraír uma energia de 30 MW, levando em consideração o peso da corda, o peso da pipa e atribuindo uma parcela realista de perdas. Essa capacidade ultrapassa em muito os 7,5 MW da melhor turbina atual, a Enercon E-126. Para alcançar essa capacidade, são necessárias quatro dessas turbinas, que, juntas, pesam 12400 toneladas. Esse valor é 300 vezes maior do que as 39 toneladas esperadas de um sistema gerador utilizando as asas do A380.

Estudos aprofundados sobre pipas iniciaram com desenvolvimento de materiais mais resistentes e leves para a construção de cordas e asas. Ademais, os sofisticados métodos de controle e sensoriamento de pipa foram desenvolvidos recentemente. Além disso, muitas dificuldades técnicas precisam ser sanadas para implementações comerciais. A quantidade de instituições vem crescendo nos últimos anos, atraindo a atenção de investidores. Já em 2009 foi criado o *Airborne Wind Energy Consortium (AWEC)*, uma organização que visa a ajuda mútua e o compartilhamento de conhecimento. Na América do Sul, em especial no Brasil, as iniciativas nessa área ainda são incipientes. O Brasil, contudo, tem motivos para investir em novas tecnologias: segundo dados do Atlas da energia elétrica do Brasil, os 105 mil MW instalados no país em 2008 poderiam ter sido substituídos por fontes eólicas, já que temos disponíveis 143 mil MW deste recurso.

O desenvolvimento de pesquisas voltadas a geração de energia com uso de pipas justifica-se pelos seguintes fatores:

- A baixa relação peso/potência das pipas significa menores custos por Watt produzido em comparação com as turbinas atuais;
- As pipas podem operar em altitudes maiores, onde os ventos possuem mais energia e são menos sazonais;
- A crescente demanda por energia, aliada ao potencial eólico brasileiro, pode alavancar o desenvolvimento dessas tecnologias.

O objetivo deste trabalho foi apresentar uma visão geral sobre extração de energia utilizando pipas e estimar a eficácia das mesmas em vento cruzado.

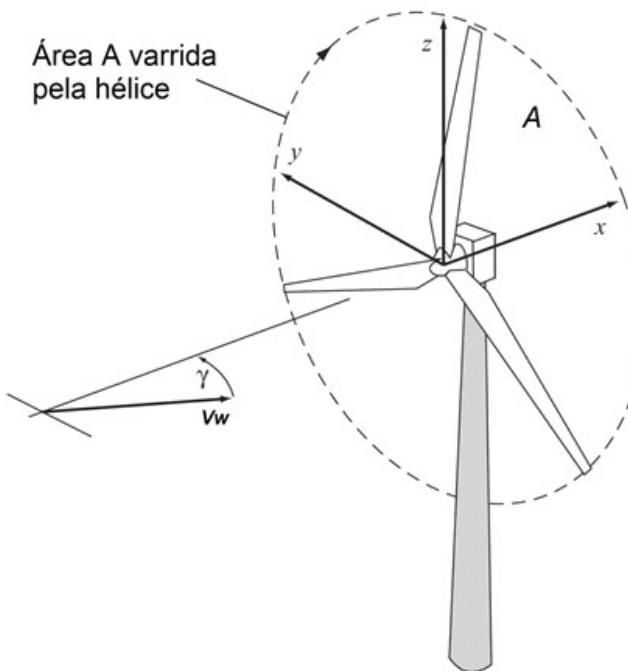


2 Turbinas eólicas e a potência do vento

O vento possui energia suficiente para suprir as necessidades 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 sociais têm restringido seu uso. Diversos grupos de pesquisa têm trabalhado em formas alternativas de geração, chamadas de “Energias levadas pelo vento” (*AWE – Airborne Wind Energy*). Eles buscam reduzir o custo da geração eólica e extraer a energia dos ventos de altitude, que são mais estáveis e fortes do que aqueles onde as turbinas atuais se encontram.

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 à extremidade de uma torre. Por outro lado, a tecnologia *AWE* vem se desenvolvendo rapidamente e em breve fará parte de nossas plantas energéticas. Os métodos de *AWE* diferem em muitos aspectos técnicos e são passíveis de comparação em termos de eficiência e de quantidade de energia que geram em relação à área que possuem, o chamado fator de extração. O fator de extração é a razão entre a potência mecânica útil e 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 entregue pelo rotor da turbina é máxima quando o plano formado por A é perpendicular a direção do vento.

Figura 1 – Turbina sob a ação de um vento V_w



A turbina possui a maior eficiência ε_t em $\gamma = 0$. O máximo valor de ε_t para uma turbina ideal é de 59,3% da potência P_w de vento que atravessa a área A da turbina. Esse valor máximo é conhecido como limite de Betz (BURTON, 2001). Isto é, $P \leq 0,593 P_{wind}$.

O fator de extração ζ_t da turbina, por sua vez, é a razão entre P e a potência do vento em uma área semelhante a área A da turbina ($\zeta_t = P/P_w$). Assim, $\zeta_t = \varepsilon_{tmax}$, quando $\gamma = 0$.

Abaixo será mostrado 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 do vento em certa área A é calculada por:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho V_w^3 A = \delta A , \quad (1)$$

$$\delta = \frac{1}{2} \rho V_w^3 , \quad (2)$$

onde δ é a densidade de potência (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. Enquanto ρ diminui em direção as camadas mais altas da atmosfera (ar mais rarefeito), a velocidade V_w aumenta. Como a parcela relacionada a velocidade contribui ao cubo, a densidade de potência δ do vento aumenta com a altitude. Isto é, qualquer sistema de extração eólica operando nessas alturas gerará mais energia do que aquele próximo ao solo. Além disso, os ventos nas grandes altitudes são mais consistentes e constantes.

Para um nível de pressão de 1000 mb (milibar), que se estende até 500 m, a velocidade do ar está em torno de 4,07 m/s para uma altitude de 102 metros. Já para uma altitude de 1432 metros, a velocidade do vento fica em torno de 8,6 m/s (AHRENS et al., 2013). A velocidade e, por conseguinte, a densidade de potência do vento, continua a aumentar com a altitude. Fica evidente que, se geradores puderem operar nessas altitudes, produzirão muito mais energia. Como a densidade de potência do vento é maior nas regiões mais altas, espera-se que os *AWEs* possuam fatores de capacidade muito superiores aos obtidos pelas turbinas. Fator de capacidade (FC) é uma medida da quantidade de energia produzida em um dado local durante o período de um ano em relação à potência nominal instalada. A atual tecnologia de turbinas eólicas é considerada como viável para fatores superiores a 0,3. A Tabela 1 apresenta o fator de capacidade para algumas regiões na altitude de operação (de 50 à 150 m) de uma turbina eólica com potência nominal de 2 MW comparado com um *AWE* do tipo “Gerador em Terra” (*GLG – Ground Level Generator*) operando no intervalo de 200 à 800 m para a mesma potência nominal. Informações são coletadas diariamente de 01.01.1996 à 31.12.2006.

As regiões cujos ventos são mais fortes possuem os maiores FCs e constituem os melhores locais para a instalação das turbinas convencionais. Segundo este critério, a cidade de Porto Alegre não é um local adequado, em virtude de $FC = 0,13$ ser demasiado baixo.

Tabela 1 – Velocidade média do vento e os FCs estimados para uma turbina de 2 MW, 90 m de diâmetro e um gerador *AWE* de 2 MW, 500 m² para alguns locais ao redor do mundo.

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

Fonte: adaptado de (FAGIANO & MILANESE, 2012)

O fator de capacidade do *AWE* e, consequentemente, o retorno econômico, são muitas vezes superiores do que a turbina. Esses dados nos mostram que geradores *AWE* são viáveis mesmo em locais tradicionalmente inadequados para turbinas. Isto é possível graças às suas grandes altitudes de funcionamento, onde ventos fortes e constantes são encontrados, e pelo



fato de muitos *AWEs* operarem em vento cruzado. Este efeito eleva sua capacidade energética em relação a uma turbina tradicional. 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. O mesmo é válido para todos os outros locais, pois não há $FC < 0,3$ em nenhum deles.

A atual tendência de desenvolvimento de sistemas *AWE*, aliada à sua capacidade em atingir grandes altitudes e operar em vento cruzado, permitirá aumentar significativamente a quantidade de energia extraída do vento. I.e., aumenta-se a contribuição de energia renovável no contexto energético mundial, minimizando o impacto causado pelas fontes fósseis.

3 Geração de energia com o uso de pipas

A utilização de pipas para a produção de energia sempre enfrentou muitas dificuldades. Com o aparecimento da energia térmica, hidroelétrica e dos combustíveis fósseis no início do século passado, as aplicações utilizando moinhos e geradores eólicos foram abandonadas. As turbinas eólicas, por outro lado, ganharam importância hoje e estão em plena operação e comercialização. O emprego de pipas, porém, não costumava ir além das aplicações envolvendo a tração de cargas. Um importante passo na geração de energia elétrica para pesquisas posteriores foi dado por Loyd (1980).

Hoje em dia existe uma grande variedade de pipas, conversores, materiais, dispositivos de acionamento, técnicas de controle e sensores, os quais baseam-se em um dos dois modos de extração de energia mecânica: **sustentação** e **arrasto**. Esses modos de extração produzem mais energia se a pipa (ou asa) voar em um sentido perpendicular a direção do vento, ou seja, em vento cruzado. Uma pipa em vento cruzado gera muito mais energia que uma pipa estática no ar. Isso contraria a intuição de que, uma vez no céu, a pipa não gera mais força (ou energia) do que aquela imposta pelo vento sobre ela.

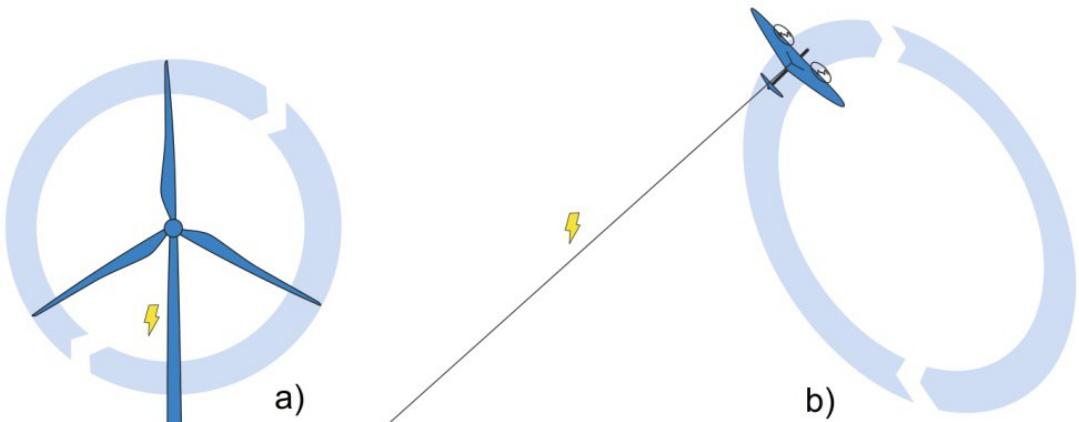
No modo de operação em arrasto, uma turbina é acoplada ao corpo da pipa. Conforme a pipa se desloca rapidamente pelo céu em uma direção de vento cruzado, o fluxo de ar passa através das pás da turbina gerando eletricidade. Esse processo é semelhante à conversão eólica tradicional, uma vez que emprega turbinas para extraír a energia cinética do ar. A grande vantagem da pipa é que não é preciso instalar uma torre, o que envolve muitos gastos com materiais. A torre é substituída pela corda nesses sistemas. Ademais, as pipas podem chegar muito mais alto e captar a energia de ventos mais fortes. Porém, essa possibilidade vem com um preço: quanto maior a distância entre a estação e a terra, maiores são as perdas, visto que a eletricidade precisa ser transmitida para o solo. Além disso, as turbinas precisam ser leves para permitir o voo da pipa, o que pode limitar sua potência.

Na Figura 2b tem-se a representação de uma asa rígida que carrega uma turbina. 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.

Quando em voo, a pipa experimenta forças oriundas da ação do vento sobre sua superfície. Essa força é transferida na forma de tensão para a corda que a segura. No segundo modo de operação, 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 da existência de um objeto móvel no solo (por exemplo, navios), tem-se um dispositivo mecânico acoplado a um gerador elétrico. O deslocamento ascendente da pipa traciona a corda que é unida com o gerador elétrico, o que é chamado de *reel-out*, veja a Figura 3. A trajetória da pipa ao subir, tem relação direta com a quantidade de energia gerada, sendo máxima quando a direção do movimento for perpendicular ao vento.

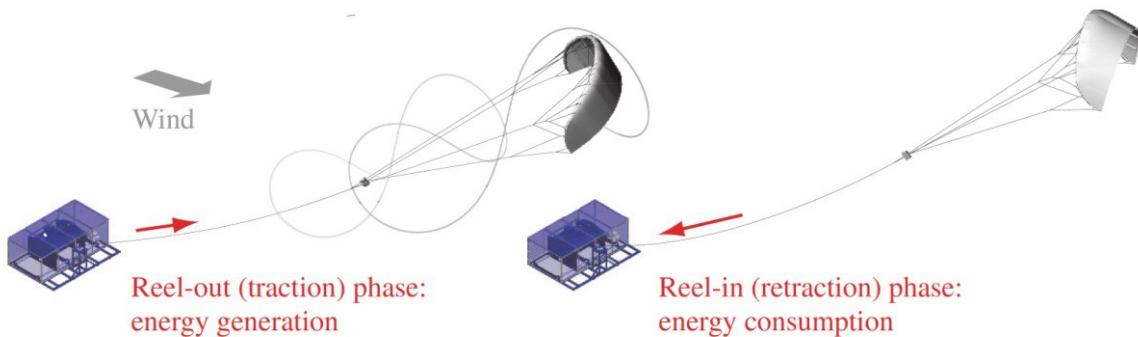
Logicamente, a corda deverá descer no momento certo para iniciar uma nova tração. O intervalo de recolhimento da pipa não gera energia, pelo contrário, consome uma parte da mesma. Esse procedimento é chamado de *reel-in*.

Figura 2: Asa substituindo uma torre eólica



Fonte: (AHRENS et al., 2013).

Figura 3: Princípio de operação em modo sustentação



Fonte: (AHRENS et al., 2013).

A energia produzida na fase de tração (*reel-out*) deve ser maior do que a consumida na fase de recuo (*reel-in*), a fim de sustentar o ciclo. Visto que a geração de energia é inconstante, a mesma precisa ser armazenada. Existem diversos métodos para recuar a pipa, os quais procuram fazê-lo com o menor consumo de energia e no menor tempo. No entanto, o principal assunto desse trabalho é avaliar apenas a energia extraída por pipas no modo sustentação.

No trabalho de Loyd (1980) foi confirmado que a potência mecânica útil máxima P_{max} , fornecida por ambos os métodos é similar e influenciada pela velocidade do vento, densidade do ar, área da pipa e pelos seus coeficientes aerodinâmicos de sustentação e arrasto, C_L e C_D respectivamente. A equação de avaliação dessa potência máxima é a seguinte:

$$P_{max} = \frac{2}{27} \rho A V_w^3 C_L \left(\frac{C_L}{C_D} \right)^2 \quad (3)$$

De acordo com (3), a potência gerada aumentará oito vezes se a velocidade do vento V_w for dobrada. Analogamente, se a razão entre os coeficientes aerodinâmicos C_L/C_D duplicar, a potência aumentará quatro vezes. Por esse motivo, asas com alto rendimento e cordas mais fortes, para ventos mais altos, são exigidas. No modo arrasto, além de suportar a força de tração, a corda utilizada para prender a pipa deve transferir a energia das turbinas. Nesse caso, a pipa precisa ter condições estruturais para carregar uma turbina em pleno voo. Já no modo

sustentação, a preocupação central é alcançar o ciclo ótimo de tração e recolhimento, assim como converter e armazenar a energia.

Uma pipa moderna com coeficiente de sustentação $C_L = 1$, coeficiente de arrasto global $C_D = 0,07$, voando sob a ação de um vento $V_w = 13$ m/s, pode fornecer, teoricamente, 40 kW/m² de densidade de potência. Essa densidade é 150 vezes superior à densidade das atuais células solares sob máxima irradiação (AHRENS et al., 2013). Se considerarmos a mesma demanda, grandes reduções na área ocupada pelas usinas podem ser alcançadas através do uso de pipas.

4 Potência de uma pipa em modo sustentação voando em vento cruzado

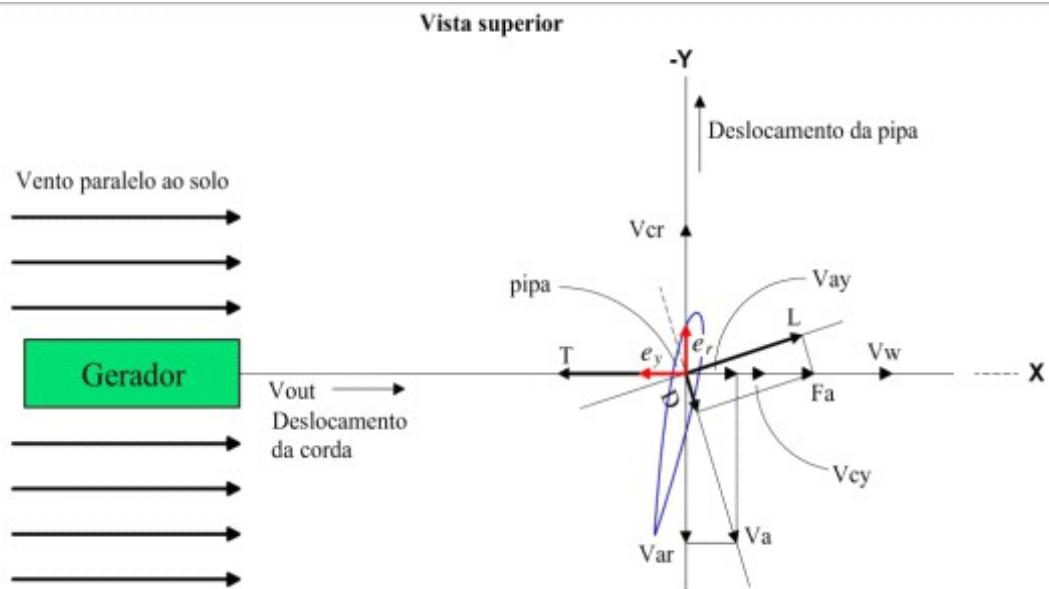
Segundo Ahrens (2013), foi mostrado que a potência máxima extraída por uma turbina eólica equivale à potência do vento que atua na área abrangida pela turbina, quando $\gamma = 0$:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A V_w^3 \cos(\gamma), \quad (4)$$

onde γ é o ângulo de inclinação da turbina em relação ao sentido do vento V_w .

O voo em vento cruzado caracteriza-se pelo deslocamento transversal da pipa em relação ao vento. A Figura 4 mostra a distribuição das forças para derivar a potência.

Figura 4: Esquema de distribuição das forças e velocidades de pipa em vento cruzado



Em (AHRENS et al., 2013) foram deduzidas as equações (5) e (6) para P_{wind} e P , que são potências geradas por um vento e uma pipa operando em vento cruzado respectivamente:

$$P_{wind}(V_{out}, V_w) = \delta C_L A \left(\frac{C_L}{C_D} \right)^2 \left(1 - \frac{V_{out}}{V_w} \right)^2 \quad (5)$$

$$P(V_{out}, V_w) = \delta C_L A \left(\frac{C_L}{C_D} \right)^2 \frac{V_{out}}{V_w} \left(1 - \frac{V_{out}}{V_w} \right)^2, \quad (6)$$

onde V_{out} é a velocidade da corda do gerador.

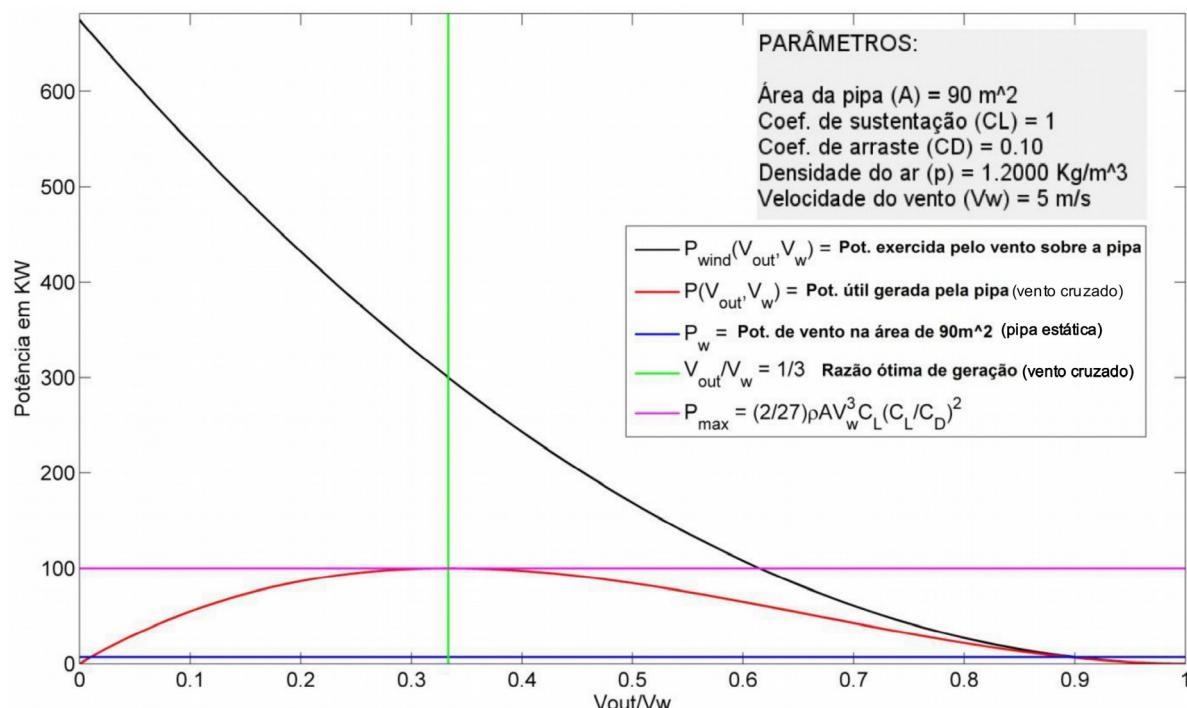


A fórmula (6) é válida para *gliding number* $E = C_L/C_D \gg 1$ que corresponde ao aerofólio real.

Os gráficos de mudança de potências P_{wind} , e P em relação de V_{out}/V_w , junto com as potências P_w e P_{max} calculadas pelas fórmulas (3) e (4), são mostrados na Figura 5.

Nota-se que no ponto ótimo de operação da pipa ($V_{out}/V_w = 1/3$), a máxima potência útil P de 100 KW é muito superior à potência P_w de 6,75 KW que gera uma turbina eólica com uma mesma área de 90 m². Isto é, a pipa retira muito mais potência do vento comparativamente a sua própria área (AHRENS et al., 2013).

Figura 5: Gráficos de energias geradas por vento, turbina eólica e pipa em modo sustentação voando em vento cruzado de áreas equivalentes



Fonte: (AGNOLETTI & TAIROV)

Em (AGNOLETTI & TAIROV) foi mostrado que para *gliding number* $E = C_L/C_D = 10$, a eficiácia teórica de uma pipa que opera em vento cruzado é 25 vezes maior do que de uma turbina eólica com a mesma área.

Referência

AHRENS, U.; DIEHL, M.; SCHMEHL, R. **Airborne wind energy**. Springer, 2013. 611 p.

AGNOLETTI, D., TAIROV, S. **Geração de energia com pipas em modo sustentação**. Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul, 2014. 59p.

BURTON, T. et al. **Wind energy handbook**. West Sussex: John Wiley & Sons, 2001. 617 p.

LOYD, M., L. Crosswind kite power. In: **Journal of Energy**, v. 4, n. 3, p. 106–111, 1980.

FAGIANO, L.; MILANESE, M. Airborne wind energy: an overview. In: **American Control Conference, Proceedings**, 2012, Montréal. p. 3132-3143.