

## Relatório Final

Título do projeto de pesquisa: Dimensionamento de um gerador eólico de pequenas dimensões para fonte complementar em VANTs.

Bolsista: Luiz Felipe Cestari

Orientador (a): Maurício Guimarães da Silva

Período a que se refere o relatório: Agosto de 2017 a Agosto de 2018

### Resumo

O presente trabalho consiste no estudo de um gerador eólico de pequenas dimensões como fonte complementar ou secundária em VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados). O protótipo alvo do estudo foi caracterizado em ensaios em laboratório e em túnel de vento. A partir dos dados obtidos, foi avaliada a proposta de uso do gerador como fonte complementar ou secundária, e de que maneira ele poderia atender às necessidades energéticas de um VANT de pequeno porte.

### 1. Introdução

O objeto de estudo deste trabalho é o gerador FZU-48/B. Em suas características originais, ele supre um pequeno sistema eletrônico de média potência, que demanda menos energia do que os sistemas eletrônicos de controle utilizados em VANTs. Atualmente no mercado, há geradores que são conectados diretamente ao eixo do motor do VANT e geram desde 50 W até 5 KW, o que é uma potência altíssima para a capacidade do FZU-48/B e de similares. Não obstante, o gerador estudado é uma plataforma útil para a demonstração do conceito de funcionamento.

Os aviões comerciais têm em seus sistemas de emergência a turbina RAT (*Ram Air Turbine*), ilustrada na Figura 1, que tem como objetivo suprir os sistemas principais de comunicação e controle do avião com energia. Caso o gerador principal e as baterias falhem, ela funciona com uma hélice ligada a um gerador elétrico. Ambos ficam dentro da carenagem e, quando solicitado, a hélice é exposta ao fluxo de ar gerado pelo voo, acionando o gerador elétrico,

que supre a aeronave com a energia necessária até que ocorra o pouso no aeroporto mais próximo. Partindo dessa ideia, este trabalho estuda e propõe um gerador eólico que tenha capacidade de fornecer energia para os principais sistemas de um VANT em caso de falha das fontes de energia principais [1].



Figura 1. RAT.

## 2. Materiais e Métodos

### 2.1. Caracterização do Gerador

A primeira etapa deste trabalho foi o estudo do modelo matemático do gerador elétrico. A partir dele, foram determinados os parâmetros do FZU-48/B que seriam possíveis de obter experimentalmente através de ensaio em laboratório e em túnel de vento.

O circuito equivalente de um gerador elétrico é mostrado na Figura 2. Do lado esquerdo está o circuito de campo (*field*), do rotor, e do lado direito, o circuito de armadura (*armature*), do estator.

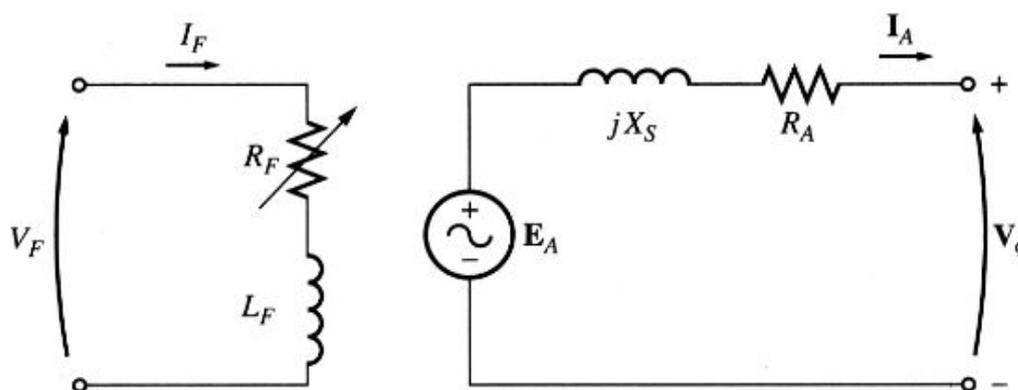


Figura 2. Esquema elétrico simplificado de um gerador [2].

A caracterização do circuito de campo se dá através do controle da corrente  $I_F$ , para uma dada rotação fixa, com o levantamento de curvas de relação entre  $I_F$  e o fluxo, e entre  $I_F$  e  $E_A$ . Infelizmente, para a FZU não é possível controlar o valor de  $I_F$  e levantar tais curvas características.

Para determinar  $X_S$  e  $R_A$  do circuito de armadura, porém, os procedimentos são simples.

O valor de  $R_A$  pode ser aferido com o uso de um ohmímetro, ou aplicando uma tensão DC aos terminais do gerador e medindo a corrente DC gerada. Como a reatância não “reage” à tensão contínua, toda a tensão será consumida pela resistência ôhmica. Portanto:

$$R_A = V_{DC} / I_{DC} \quad (1)$$

Pelo ohmímetro, o valor aferido de  $R_A$  foi igual a 57  $\Omega$ .

Aplicando-se uma tensão de 2 V aos terminais do gerador, mediu-se uma corrente de 34,2 mA, de forma que:

$$R_A = 2 / 0,0342 = 58,5 \quad (2)$$

Quanto à reatância indutiva, tem-se que, deixando os terminais do gerador em curto-circuito:

$$E_A = (jX_S + R_A) I_A \quad (3)$$

Em magnitude:

$$E_A = (X_S^2 + R_A^2)^{1/2} I_A \quad (4)$$

Portanto, se o gerador for acionado, em aberto é medido o valor da magnitude de  $E_A$  (com circuito aberto,  $V = E_A$ ), e para a mesma rotação, em curto é medido o valor da magnitude da corrente  $I_A$ . Dessa forma é possível determinar a reatância indutiva.

## 2.2. Ensaio em Laboratório

A segunda fase do trabalho foi a realização de testes de desempenho no gerador. De início, ele foi submetido a um alto fluxo de ar vindo de um compressor a 120 psi. A limitação desses testes, porém, residia no fato de a velocidade do fluxo de ar e a rotação do gerador não serem conhecidas, ambas informações importantes para caracterizar o gerador e seu desempenho.

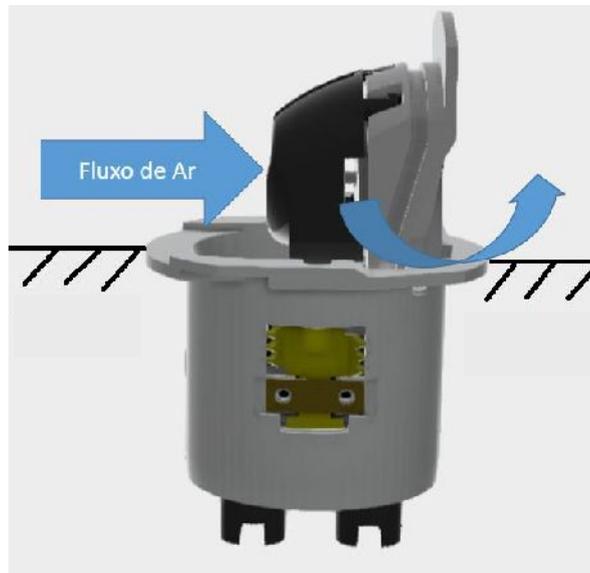


Figura 3. Ilustração do FZU-48/B.

Para sanar esse problema, foi montado um setup de testes no qual o acionamento do gerador se dava por um motor de alto desempenho com curva linear conhecida, 682 RPM/Volts, de forma que controlando-se a tensão aplicada no motor, conhecia-se a rotação do motor e, conseqüentemente, do gerador. A Tabela 1 abaixo mostra os valores obtidos.

Tabela 1. Tensão obtida no gerador quando acionado por motor elétrico.

Frequência de rotação [Hz]	Tensão [V]
22,73	4,2
34,10	6,5
45,47	8,3
56,83	10,3
68,2	12,3
79,57	14,2
90,93	16,3
102,30	18,2
113,67	20,5
125,03	22,0
136,40	24,0
147,77	25,8

Fazendo um ajuste linear dos valores mostrados na Tabela 1, chega-se à seguinte relação entre frequência e tensão gerada:

$$f = 5,7854V - 2,736 \quad (5)$$

É importante frisar que essa é uma relação estritamente matemática e experimental para o gerador em questão. A tensão gerada por um gerador depende de outros fatores que fogem do controle do experimentador, como o fluxo magnético. Por simplicidade, supõe-se que o fluxo manteve-se constante.

### 2.3. Ensaio em Túnel de Vento

Com os ensaios em laboratório concluídos, deu-se início à preparação do ensaio em túnel de vento. A Figura 4 mostra o circuito do túnel de vento do IAE, capaz de gerar correntes de ar com velocidade de até 120 m/s.

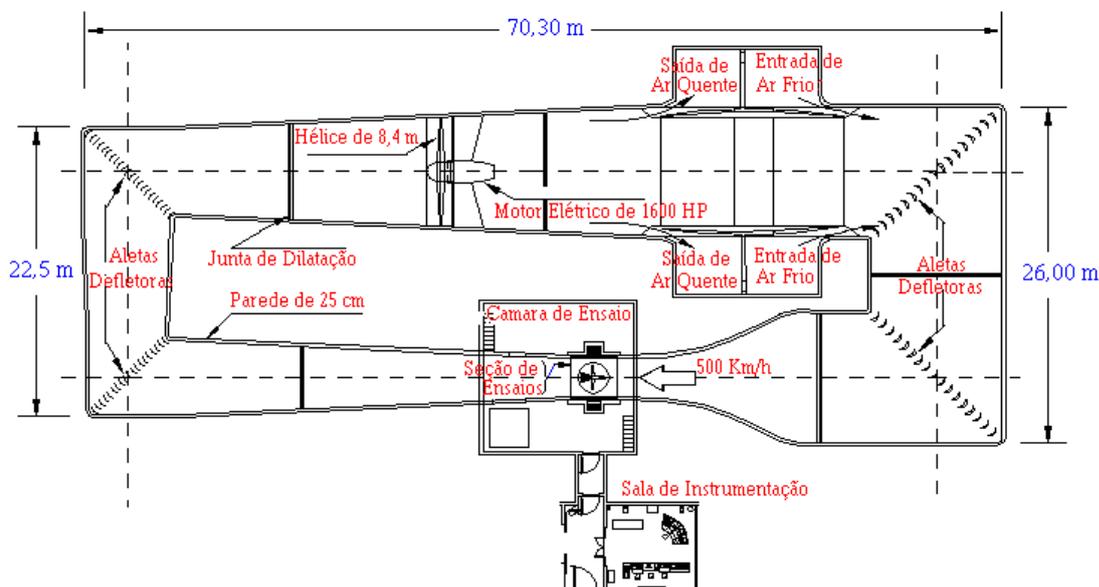


Figura 4. Circuito do Túnel de Vento TA-2 [3].

Para este ensaio, a preocupação inicial foi a de onde o FZU seria embarcado. Aventou-se a possibilidade de usar um VANT, entretanto não foi encontrado um de porte médio que fosse coerente para o estudo em questão e que pudesse ser perfurado para encaixe do gerador.

Optou-se por utilizar um *mockup* em madeira de uma bomba de fins gerais, o da BAFG-460 em escala 1:2 (Figura 5). O uso desse *mockup* mostrou-se conveniente uma vez que ele já tinha a furação adequada para fixação na haste do túnel de vento. Por outro lado, para encaixar o FZU no *mockup*, fez-se necessário realizar um furo no modelo da bomba, como ilustra a Figura 6.



Figura 5. *Mockup* da BAFG-460, 1:2, com o FZU-48/B.

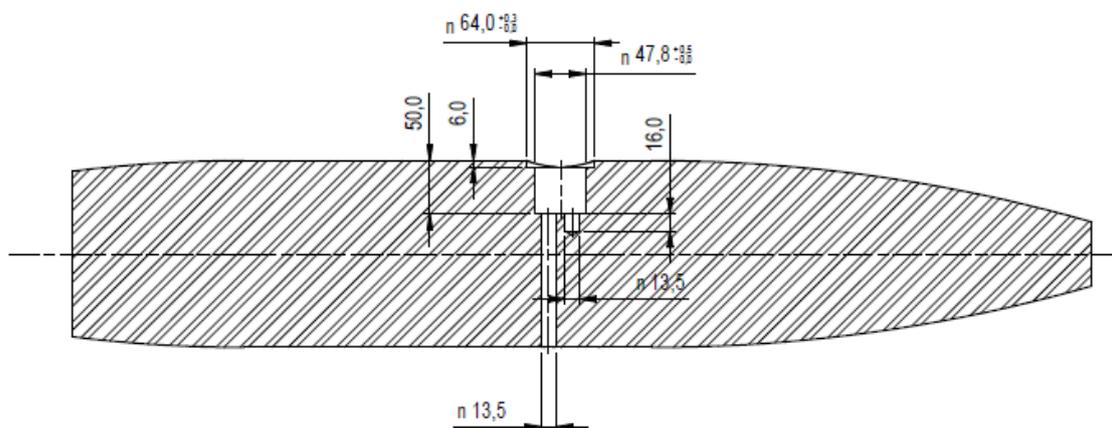


Figura 6. Desenho perfuração de fixação do FZU.

A furação foi planejada tanto para o encaixe do FZU quanto para a saída do cabo de energia, levando em consideração as perfurações que já existiam no *mockup* para a fixação deste na haste do túnel. Devido à sobrecarga de trabalho na Divisão de Mecânica (AME) do IAE, a simples furação do *mockup* poderia levar meses para ser realizada, de forma que foi necessário buscar outro lugar no DCTA onde esse serviço fosse feito. Felizmente, o Laboratório de Aeronáutica FENG, do ITA, tinha capacidade para fazer a furação e os técnicos se dispuseram para atender ao pedido.

Uma vez estando o *mockup* pronto, o ensaio foi marcado e no dia anterior à sua realização foi feito o setup do túnel. Essa etapa consistiu em calibrar a balança de medição de arrasto do túnel, posicionar o modelo montado e realizar os ajustes finais do sistema de angulação. A parte de aquisição elétrica consistiu de um osciloscópio para medição do sinal gerado pelo FZU, tendo sido instalada uma fiação para conectar o cabo de energia do FZU ao osciloscópio.

Finalizado o setup, foi realizado o ensaio. O FZU-48/B foi submetido a ventos de 30 m/s a 120 m/s, com passo de 10 m/s. Essa faixa de velocidade de vento foi repetida para cinco posições de guinada do *mockup*: a 0°, -30°, -15°, 15° e 30°. A cada velocidade, foram obtidos dados da tensão gerado pelo FZU-48/B (Figura 7) e arrasto no *mockup*.

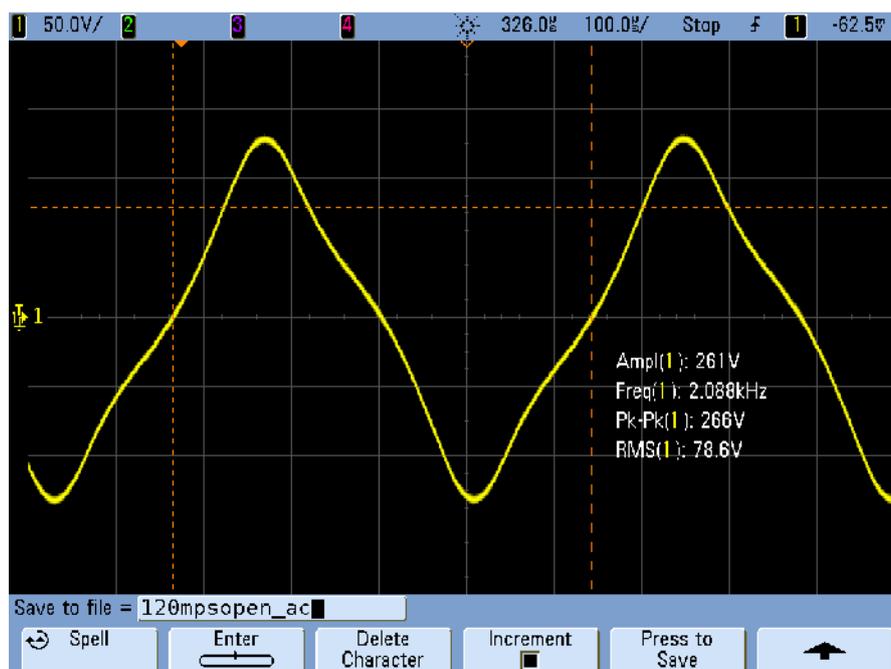


Figura 7. Tensão gerada pelo FZU-48/B submetido a vento de 120 m/s, com *mockup* em guinada de 0°.

### 3. Resultados

Das medições iniciais em laboratório, com uso do compressor de ar, foram levantados valores de tensão e corrente, conforme explicado na seção 2.1 (medições em aberto, para tensão, e em curto, para corrente). O valor da reatância é obtido lançando mão da Equação 4. A Tabela 2 mostra os resultados obtidos. Os valores de frequência de rotação vêm da relação numérica anteriormente determinada entre tensão e frequência (Equação 5).

Tabela 2. Determinação da reatância do gerador.

Tensão [V]	Corrente [mA]	Reatância [ $\Omega$ ]	Frequência [Hz]
111	60	1850	639,4
122	62	1960	703,1
133	64	2078	766,7

Como esperado, a reatância aumenta com o crescimento da frequência. A relação entre as duas é dada por

$$X = 2 \pi f L, \quad (6)$$

onde  $L$  é a indutância característica. Para os valores de reatância da tabela acima, a indutância é aproximadamente 0,45 H, valor típico de indutância em geradores de energia.

Quanto ao ensaio no túnel de vento, para cada passo de aquisição de dados, o osciloscópio coletava 1000 valores de tensão, dentro de um período de 1 ms. A Figura 8 mostra a tensão gerada pelo FZU quando o *mockup* estava posicionado com guinada de  $0^\circ$ . As barras verticais coloridas correspondem aos 1000 valores de tensão gravados pelo osciloscópio a uma dada velocidade do vento. Para velocidades de 30 a 50 m/s, o gerador não foi acionado (tensão gerada igual a zero).

A Tabela 3 mostra os valores de tensão obtidos no ensaio. É importante frisar que, devido ao posicionamento do gerador no *mockup*, além dos ângulos de guinada nos quais o *mockup* foi colocado, havia também um rolamento. Esse rolamento é indiferente para uma guinada de  $0^\circ$ . A guinadas de  $-15^\circ$  e  $-30^\circ$ , o gerador continuava exposto a fluxo de ar, porém já pôde ser percebida uma diminuição nos valores das tensões geradas. A exposição ao fluxo diminuiu consideravelmente na guinada de  $15^\circ$ , e a  $30^\circ$  o comportamento do gerador já se tornou não linear.

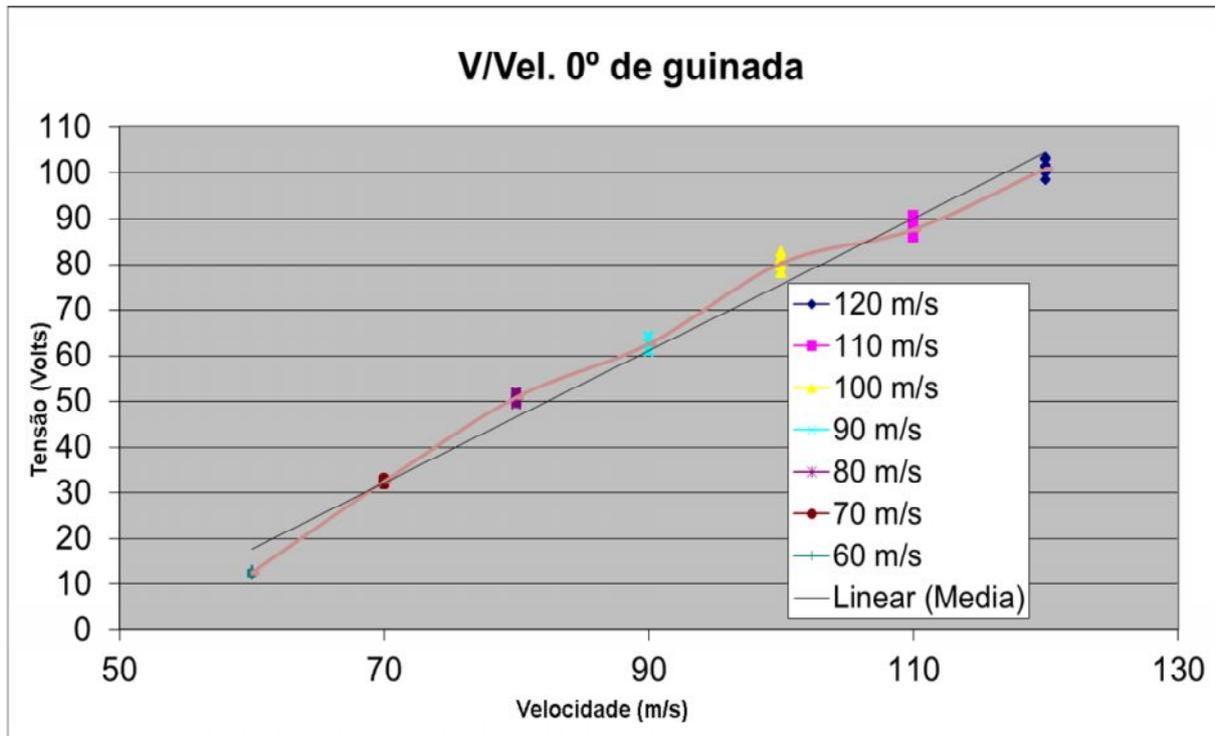


Figura 8. Tensão DC gerada pelo FZU-48/B com *mockup* em guinada de 0°.

Tabela 3. Tensão DC média, em Volts, gerada pelo FZU-48/B, a cada passo do ensaio, segundo velocidade do vento e posicionamento do *mockup*.

Velocidade (m/s) / Guinada (°)	120	110	100	90	80	70	60	50
-30	70,09	62,54	53,62	52,39	42,04	26,02	12,02	0
-15	71,42	62,44	53,77	41,82	35,47	20,58	0,00	0
0	100,97	87,64	80,25	62,59	50,94	32,52	12,58	0
15	61,99	55,78	48,15	39,53	33,04	14,70	0,00	0
30	49,13	32,90	28,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0

A Figura 9 mostra os pontos de desempenho do gerador, para cada posicionamento de guinada do *mockup*.

Quanto ao arrasto, para cada passo do ensaio, foram levantados três pontos para medição do coeficiente de arrasto. O resultado é mostrado na Figura 10. Com a FZU fechada, o coeficiente de arrasto médio foi de 0,432. Com ela aberta, 0,496.

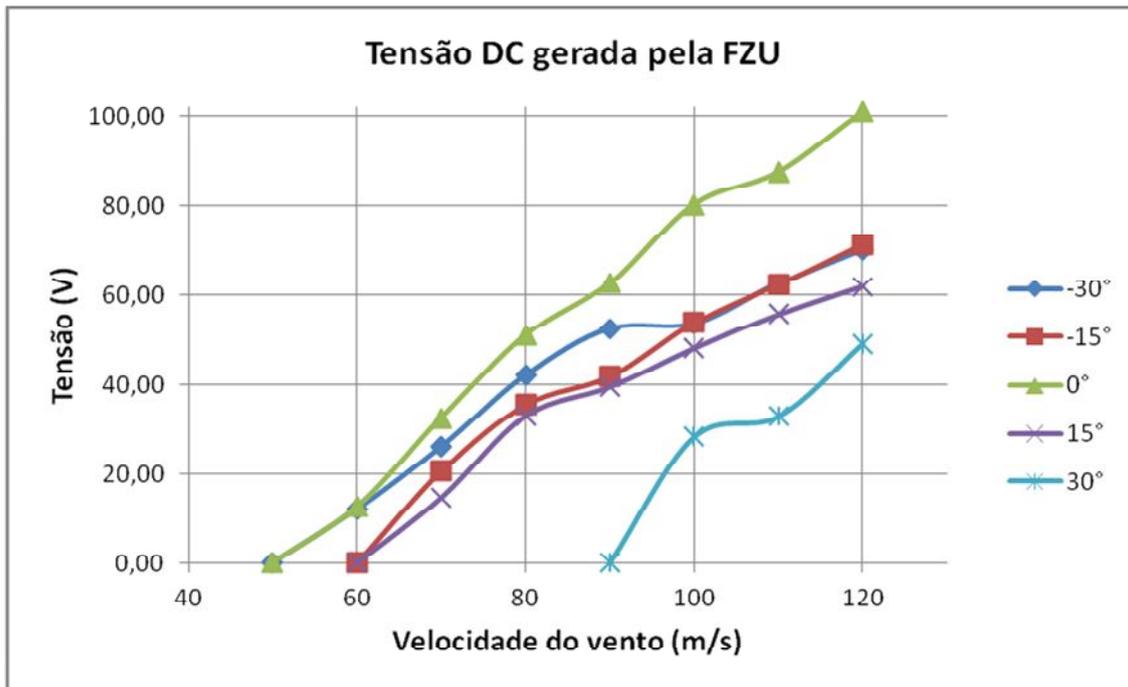


Figura 9. Comparação do desempenho do gerador para diferentes guinadas do *mockup*.

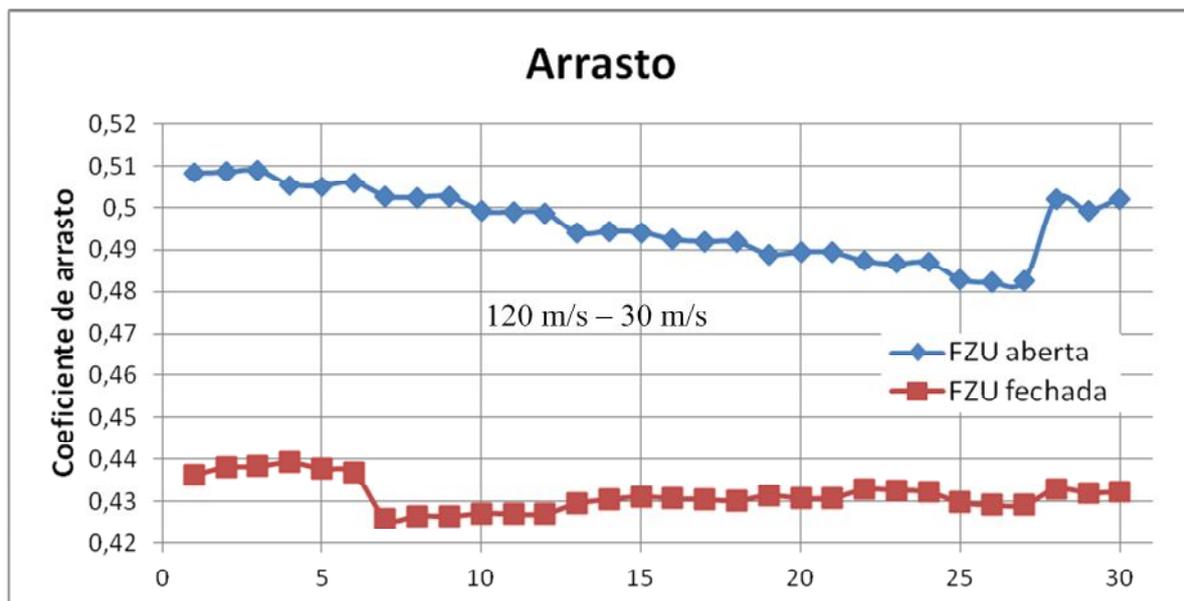


Figura 10. Coeficiente de arrasto do *mockup*.

O *mockup* foi ainda reposicionado na guinada de  $-30^\circ$ , e novamente foram medidos os valores da tensão gerada pelo FZU. Notou-se uma queda com respeito à primeira medição. Nela, a tensão máxima gerada foi de 70,09 V, conforme Tabela 3. Na repetição, a tensão chegou a 58,20 V apenas.

## 5. Conclusões

A partir dos ensaios realizados em laboratório e no túnel de vento, podem-se inferir algumas considerações sobre o emprego do FZU-48/B como fonte complementar ou secundária de energia em VANTs.

Quanto ao arrasto aerodinâmico, a abertura do FZU gerou alterações de pouca significância, isso é, que não trariam prejuízo ao desempenho aerodinâmico de um VANT. É bem verdade que foi usado um *mockup* de bomba no ensaio, entretanto suas dimensões são similares às de um VANT de pequeno porte, permitindo que seja feita essa extrapolação.

Em contrapartida, o gerador eólico é deveras dependente da velocidade do vento e de sua posição relativa à corrente de ar. Notou-se que para velocidades mais baixas (inferiores a 50 m/s), o gerador não era capaz de gerar energia. De igual forma, se o gerador não estiver posicionado de forma a aproveitar ao máximo a corrente de ar, seu desempenho será abaixo do necessário, ficando ele também refém dos movimentos da aeronave, como guinada e rolamento. Para contornar esses problemas, deve-se pensar numa nova geometria para a turbina, o que fica como sugestão para trabalhos futuros.

Outros pontos importantes dizem respeito à baixa potência gerada: apesar de alcançar valores altos de tensão, a corrente gerada pelo FZU é baixa. Essa característica limita a capacidade de o FZU agir como gerador secundário em VANT, exceto se sua finalidade for apenas a de manter ligados sistemas de emergência em caso de falha do motor. De qualquer forma, um estudo mais aprofundado nas características de construção do gerador – como bobinas e ímã – e propostas de modificação delas podem levar a um gerador pequeno que seja capaz de fornecer potências mais elevadas.

Por fim, há de se considerar que o gerador do FZU foi desenvolvido para funcionar por um tempo muito curto. Sua exposição a ventos contínuos por horas seguidas mostrou que houve um decréscimo no desempenho entre quando se fez a medição em guinada de  $-30^\circ$  pela primeira vez e quando essa medição foi repetida, indicando um desgaste físico do gerador. Sendo assim, são necessárias alterações na construção mecânica para que o gerador tenha tempo de vida útil significativo que viabilize seu emprego como fonte de energia em VANTs de pequeno porte.



## 6. Referências

[1] PIRES, J.C.P., **Estudo de Rotor para Turbina Eólica de Eixo Horizontal de Pequeno Porte com Aplicação de Modelagem e Simulação Virtual**. Porto Alegre, 2010.

[2] Chapman, S.J. **Electric Machinery Fundamentals**. 4ªed. – 2005

[3] Instituto de Aeronáutica e Espaço. **Laboratório Aerodinâmico Subsônico – TA-2**. Disponível em: <<http://www.intraiae/ala-ta2>>. Acesso em: 13 de abril de 2018.