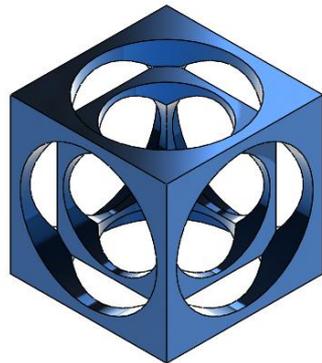


Instituto Mauá de Tecnologia - IMT



Microturbina Eólica

Fab Lab IMT / Manual do Mundo

Joseph Youssif Saab Junior

Valdir Melero Junior

São Caetano do Sul, SP

Setembro de 2018

Lista de Colaboradores do Projeto

Colaboraram no planejamento, projeto, construção, testes, registros e divulgação da Microturbina do IMT as seguintes pessoas:

IMT	Manual do Mundo
Alisson Henrique Alves de Sousa	Iberê Thenório
Ana Beatriz Grimaldi Café	Equipe de Filmagem, Apoio e Edição.
Carlos Augusto Martins	
Fábio Bordin	
Guilherme Ikeda	
Guilherme Wolf Lebrão	
Joseph Youssif Saab Junior	
Juliana Dias	
Luana Cristina Xavier Camargos	
Luiz Fernando Tibério Fernandez	
Marcio Renato da Silva	
Renata Irene da Silva	
Renato Santana	
Rodrigo Mangoni Nicola	
Sérgio Kenji Moriguchi	
Valdir Melero Junior	

Sumário

1. Introdução.....	4
2. Objetivos	5
2.1 Notas sobre direitos autorais, desempenho e riscos da operação.....	5
3. O Projeto Conceitual da Microturbina Eólica.	6
3.1 O Projeto Conceitual do Equipamento.	7
3.1.1 Propriedades do ar consideradas no projeto:.....	7
3.1.2 Parâmetros Geométricos e Dinâmicos da microturbina.	7
3.1.3 Produção de Potência Mecânica no Eixo	8
3.1.4 A Seleção do Aerofólio	8
4. O Projeto Preliminar.....	10
4.1 O Projeto Aerodinâmico e de Desempenho das Pás do Rotor.....	11
4.2 Verificação Estrutural Simples, de Segurança.....	13
4.3 O Cubo do Rotor (hub).	15
4.4 A Haste de Fixação do Conjunto e a Nacelle.....	18
4.5 O Projeto Elétrico.	21
4.6.1 Descrição dos componentes.....	22
4.6.2 Seleção e dimensionamento dos componentes elétricos.....	23
5. A Construção	27
5.1 As Pás do Rotor	27
5.2 O sistema elétrico.....	34
6. Os Testes.	35
7. Índice de arquivos.	36
8. Bibliografia	37

1. Introdução

A energia eólica é a energia renovável que mais cresce no Brasil atualmente. A adoção de tecnologia para a geração de eletricidade limpa permite a continuidade do crescimento de um País sem a pressão ambiental imensa associada às usinas termelétricas, especialmente aquelas que operam com óleo e carvão (Lucon & Goldemberg, 2007).

A adoção da Energia Eólica em maior escala depende também da sua aceitação popular, pois, como todas as formas de geração de energia, ela também apresenta problemas (Saab Jr., 2016). As turbinas eólicas podem apresentar poluição visual, sonora e afetar a mortalidade de pássaros e morcegos. No entanto, é entendimento global que suas desvantagens são muito menores do que o impacto do aquecimento global antropogênico, decorrente da queima de carvão e de óleo em usinas termelétricas que funcionam com base no Ciclo de Rankine.

O presente projeto do IMT é um projeto aberto, disponibilizado dentro do espírito que norteia a rede mundial de Fab Labs vinculados ao MIT e poderá ser modificado e melhorado livremente.

O projeto do rotor da microturbina eólica tem um diâmetro de 0,9 m, que é da ordem de 1% do diâmetro de uma turbina eólica típica, de grande porte, usada na geração de eletricidade para o *grid* nacional. Porém, sua conversão de energia não mantém a proporcionalidade do diâmetro, uma vez que nesse tipo de energia o rendimento em pequena escala é bastante reduzido¹ e a velocidade do vento, que é o fator mais relevante, fica reduzida quando o rotor é fixado perto do solo ou de uma superfície (telhado).

O presente projeto foi pautado pelo equilíbrio entre o baixo custo e a funcionalidade para demonstração da energia eólica, sendo capaz, em condições ideais, de gerar mais de 100 W de potência mecânica no eixo.

¹ O Coeficiente de Potência, da ordem máxima de 0,5927 para grandes equipamentos, fica limitado a valores bem menores para rotores de pequeno diâmetro.

2. Objetivos

O objetivo principal deste projeto didático é ensinar sobre a natureza da fonte de energia renovável eólica, obtendo compreensão e apoio para seu uso cada vez mais amplo. Assim como outras fontes renováveis, a energia eólica distribuída ou *off-grid* (aquela gerada para consumo local e que não alimenta diretamente o sistema interligado nacional) necessita de meios para armazenagem intermediária (baterias), devido ao frequente descompasso temporal, ao longo do dia, entre a disponibilidade da fonte natural e a demanda de energia elétrica.

Este pequeno projeto de geração distribuída também pode ser usado de forma prática em embarcações e regiões remotas e carentes de outras formas de energia, para o carregamento de baterias, recarga de celulares e o acendimento de lâmpadas LED de baixo consumo e alta eficiência.

O projeto inicial foi concebido com uma haste de suporte fixa, eliminando a complexidade de contatos móveis entre a bateria e o gerador, no entanto, o usuário poderá adaptar prontamente o projeto a uma haste giratória. Na configuração fixa, a microturbina eólica deverá ser fixada na direção preponderante do vento e na posição mais alta que o terreno permitir

O objetivo deste breve relatório é apresentar o projeto conceitual, os cálculos de desenvolvimento, os materiais, métodos de construção e ferramentas empregados na microturbina eólica do IMT.

Dúvidas e sugestões podem ser encaminhadas para o e-mail fablab@maua.br. Compartilhe conosco também o resultado do seu trabalho enviando fotos e descrições das melhorias e resultados alcançados.

2.1 Notas sobre direitos autorais, desempenho e riscos da operação do equipamento

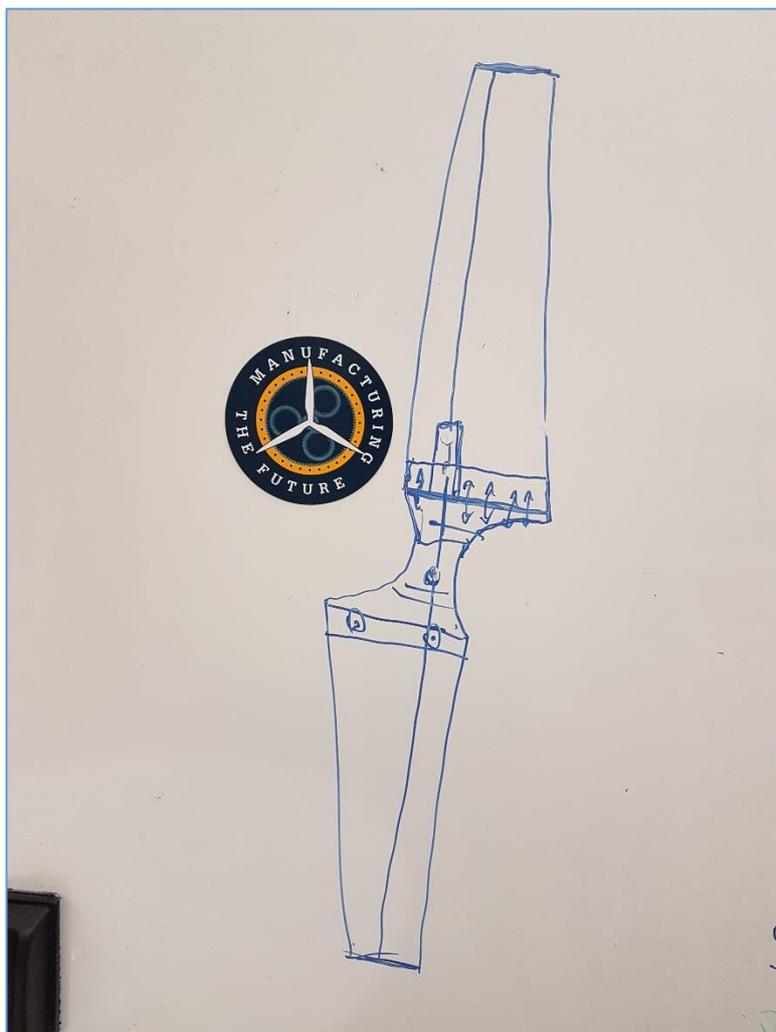
Este projeto aberto não pode ser usado comercialmente, mas pode ser modificado livremente para uso pessoal. O projeto aerodinâmico das pás foi realizado no ambiente de desenvolvimento de código aberto QBlade (Marten, 2010) (Marten & Wendler, 2013) (Marten, 2014) (Marten, 2016), que pode ser baixado gratuitamente para readaptações e melhorias no projeto. No entanto, o IMT, os autores do QBlade ou os autores não oferecem qualquer tipo de garantia de desempenho explícita ou implícita juntamente com esse projeto, já que os resultados vão depender da qualidade de construção individual e dos acessórios e materiais empregados, além do vento local, entre outros fatores.

A velocidade de vento de projeto é de 10 m/s e o usuário deverá certificar-se, por conta própria que a microturbina não passe de 1.200 rpm, que é a rotação perto do limite estrutural da fixação das pás. O usuário deve ter em mente que a segurança, sua e de terceiros vêm em primeiro lugar e este equipamento apresenta potencial de danos sérios em caso de descuido ou manufatura inadequada. A responsabilidade sobre a segurança do usuário e de terceiros será exclusivamente de cada construtor que adotar o projeto.

Todos os arquivos relacionados ao projeto (desenhos, planilhas, arquivos de desempenho) serão disponibilizados no site do Fab Lab do IMT e também pelo Manual do Mundo®. Seu uso implica que o usuário leu, compreendeu, validou seu uso para suas necessidades e assume plena responsabilidade pelas consequências a si próprio e a terceiros de sua montagem e uso.

3. O Projeto Conceitual da Microturbina Eólica.

A maioria dos projetos conceituais em engenharia nasce a partir de um esboço livre.



3.1 O Projeto Conceitual do Equipamento.

3.1.1 Propriedades do ar consideradas no projeto:

Propriedades do Ar	
Temperatura:	25 °C
Massa Específica:	1,08 Kg/m ³
Viscosidade dinâmica:	1,78E-05 Pa.s
R _{ar} :	289,6 J/Kg.K

3.1.2 Parâmetros Geométricos e Dinâmicos da microturbina.

Parâmetros Geométricos Básicos		
Velocidade de Vento Disponível:	10	m/s
Diâmetro do Rotor (total):	0,9	m
Diâmetro do Cubo:	0,1	m
Comprimento ou raio das pás:	0,4	m
Corda máxima (raiz):	0,1	m
Corda mínima (ponta):	0,05	m
Distribuição de corda:	linear	

Parâmetros Dinâmicos Básicos	
TSR ² Esperado:	4 (escala)
Velocidade Tangencial esperada:	40 m/s
Velocidade angular esperada:	88,9 rad/s
Rotação esperada:	849 rpm
Rotação esperada:	14 rps

Faixa de números de Reynolds Esperada:	L	V _{inf}	V _{tang}	V _{result}	Reynolds	Mach
Com base no diâmetro:	0,9	10	0	10,00	546.067	0,03
Com base na corda do aerofólio no menor raio:	0,1	10	8,9	13,38	81.179	0,04
Com base na corda do aerofólio no maior raio:	0,05	10	35,6	36,94	112.050	0,11
	m	m/s	m/s	m/s	adimens.	adimens.

Considerando a velocidade local³ resultante no rotor máxima esperada da ordem de 37 m/s (Mach ≈ 0,1), o escoamento foi considerado incompressível.

² TSR = *Tip Speed Ratio*, é a relação entre a velocidade tangencial da ponta da pá e a velocidade do vento incidente.

³ Atenção: Esta não é a velocidade do vento incidente, mas a velocidade resultante da interação vetorial entre a velocidade tangencial na ponta do rotor e a velocidade do vento. Jamais submeta o projeto a ventos dessa magnitude.

3.1.3 Produção de Potência Mecânica no Eixo

Potência = Pressão dinâmica * Área do rotor * Velocidade do Vento * Coeficiente de Potência.

$$Pot = \frac{1}{2} \rho V^2 * \left(\frac{\pi * D^2}{4} \right) * V * C_p$$

O Coeficiente de Potência é análogo a um rendimento aerodinâmico. Seu valor teórico máximo para rotores sem carenamento é de 0,5926, conhecido como limite de Betz (Hansen, 2008). Considerando o diâmetro arbitrado de 0,9 m para o equipamento e a velocidade do vento da ordem de 10 m/s, as potências mecânicas disponíveis no eixo da turbina podem ser estimadas fazendo o C_p variar de 0,01 até o valor máximo teórico, conforme o quadro abaixo:

Cp	Potência Disponível (W)
0,01	3
0,10	34
0,20	69
0,25	86
0,30	103
0,40	137
0,50	172
0,59	204

A faixa amarela foi fixada como objetivo inicial de desempenho do equipamento, entre 69 e 137 W. O pequeno diâmetro do rotor impede que se obtenham coeficientes de potência elevados, sendo a faixa escolhida a mais realista pela experiência dos projetistas.

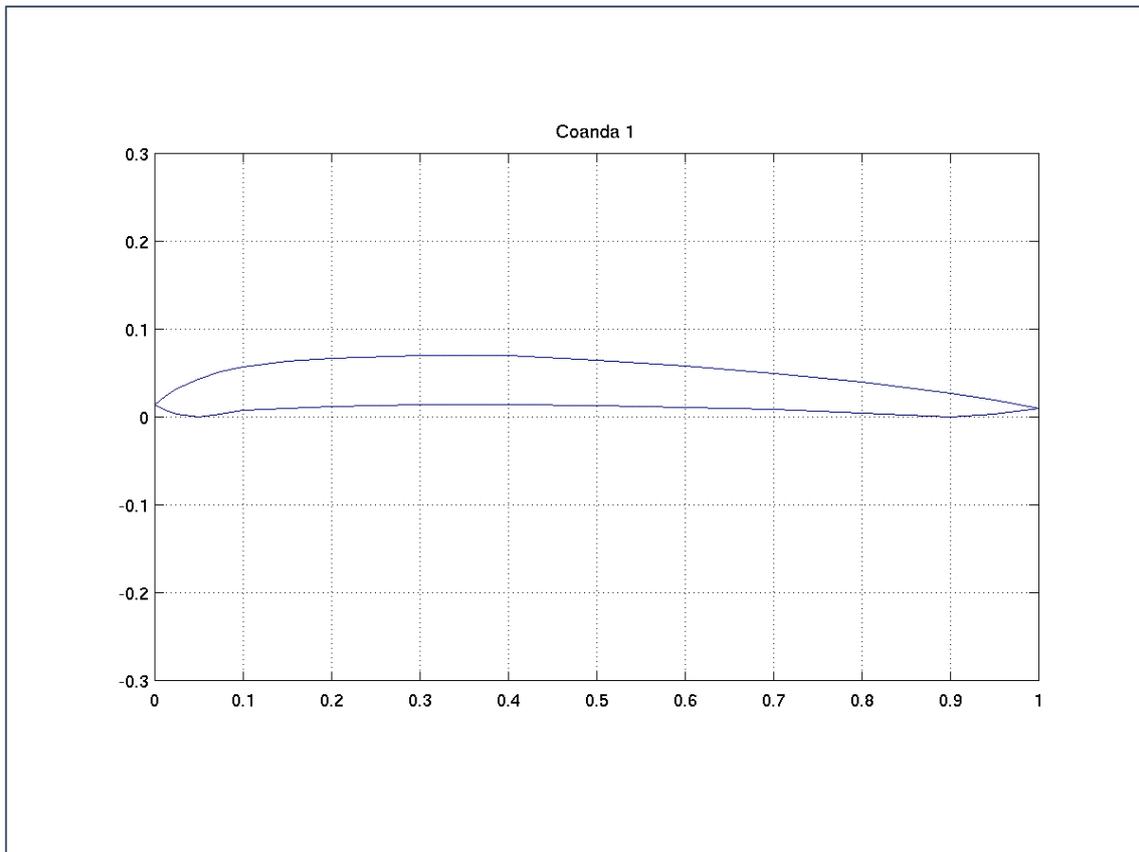
3.1.4 A Seleção do Aerofólio

Foram analisados diversos aerofólios para baixos números de Reynolds. Os critérios priorizados na seleção, foram:

- 1) Facilidade de construção.
- 2) Baixo custo de construção.
- 3) Boa relação entre Sustentação e Arrasto (c_l/c_d).

O aerofólio selecionado foi o Coanda 1 (<https://m-selig.ae.illinois.edu/ads.html>), com a adição de um fio de nylon de 0,3 mm funcionando como *tripper* no bordo de fuga do extradorso⁴.

⁴ Quando aplicado no intradorso, como no filme do Manual do Mundo®, o fio de nylon também melhora o desempenho aerodinâmico da pá, porém, após a filmagem foram feitas simulações adicionais e a colocação no extradorso maximiza o desempenho, atrasando o estol do aerofólio até ângulos mais elevados.



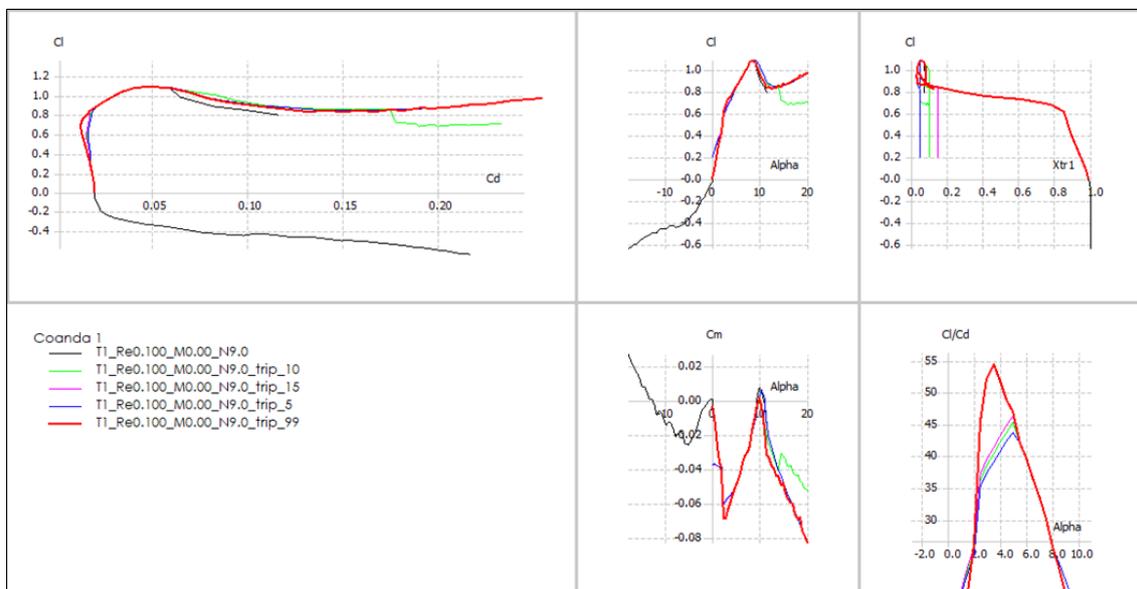
Para um número de Reynolds de 100.000, o $(cl/cd)_{máx}$ é de 54 @3,5°. O cl é de 0,73 @ 3,5°.

As coordenadas do aerofólio estão listadas abaixo.

Coordenadas (x,y)	
Coanda 1	
1,0000	0,0100
0,9500	0,0195
0,9000	0,0270
0,8000	0,0400
0,7000	0,0500
0,6000	0,0585
0,5000	0,0650
0,4000	0,0695
0,3000	0,0700
0,2000	0,0670
0,1500	0,0632
0,1000	0,0570
0,0750	0,0515
0,0500	0,0435
0,0250	0,0325
0,0125	0,0240
0,0000	0,0140
0,0125	0,0070

0,0250	0,0030
0,0500	0,0000
0,0750	0,0030
0,1000	0,0070
0,1500	0,0100
0,2000	0,0115
0,3000	0,0135
0,4000	0,0135
0,5000	0,0125
0,6000	0,0110
0,7000	0,0085
0,8000	0,0040
0,9000	0,0000
0,9500	0,0030
1,0000	0,0100

Em prol da facilidade de projeto, apenas um tipo de aerofólio foi empregado ao longo de toda a envergadura da pá. As curvas de desempenho do aerofólio podem ser observadas no arquivo fornecido (.wpa, do QBlade), reproduzido abaixo.



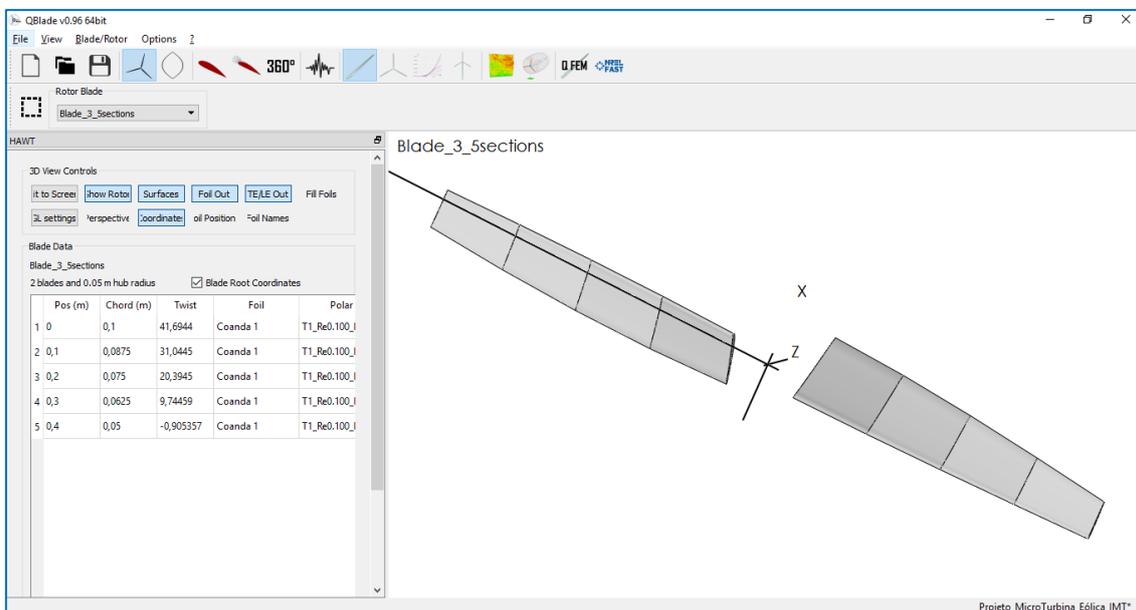
Em prol da facilidade de construção, mas em troca de menor desempenho, o executor pode optar por realizar um rotor com pás de seção retangular. Elas serão mais pesadas e de menor eficiência na conversão de energia, porém o equipamento vai funcionar também.

4. O Projeto Preliminar.

Esta seção descreve os objetivos de cada projeto e os critérios de seleções e dimensionamentos das partes. Onde aplicável, são descritos também os parâmetros de desempenho avaliados.

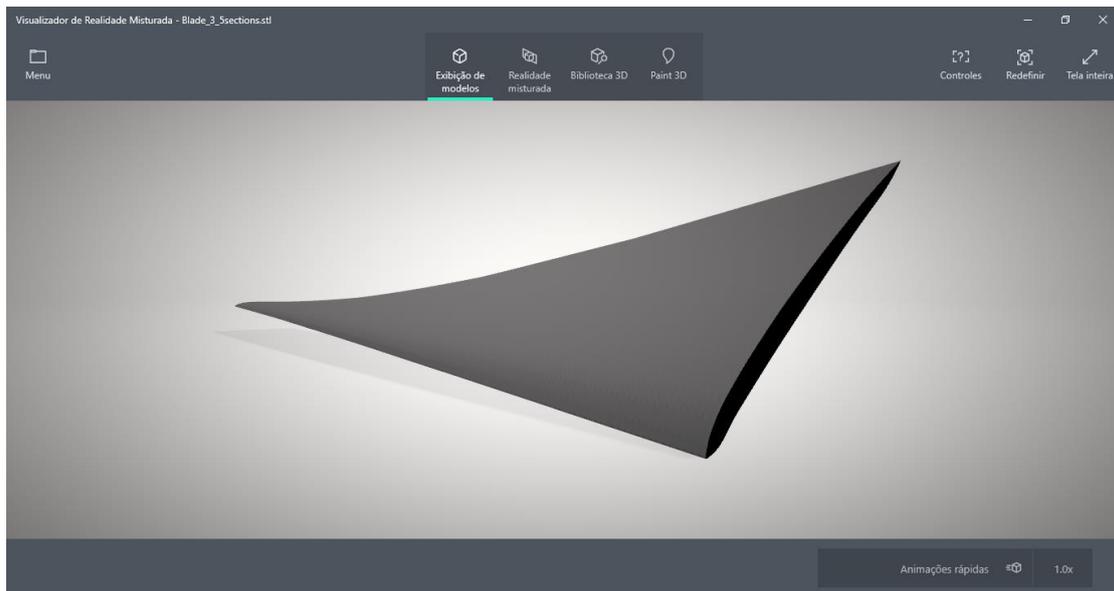
4.1 O Projeto Aerodinâmico e de Desempenho das Pás do Rotor

O projeto aerodinâmico e a verificação do desempenho do rotor foram realizados com o auxílio do código aberto QBlade, já mencionado anteriormente, gerido pela Universidade Técnica de Berlin (TU-Berlin). A figura abaixo mostra a configuração geral do rotor de duas pás e a tabela com as dimensões de cada pá (posição de cada seção de controle, corda, torção, aerofólio e diagrama polar associado a cada seção), que é reproduzida mais adiante para melhor leitura.



Os arquivos que permitem analisar o projeto ou a reprodução da pá estão disponíveis juntamente com esse projeto (vide tabela de arquivos disponíveis). Não realize as pás em material impresso (3D) antes de fazer um estudo da resistência do material e considerando o carregamento dinâmico sobre a pá.

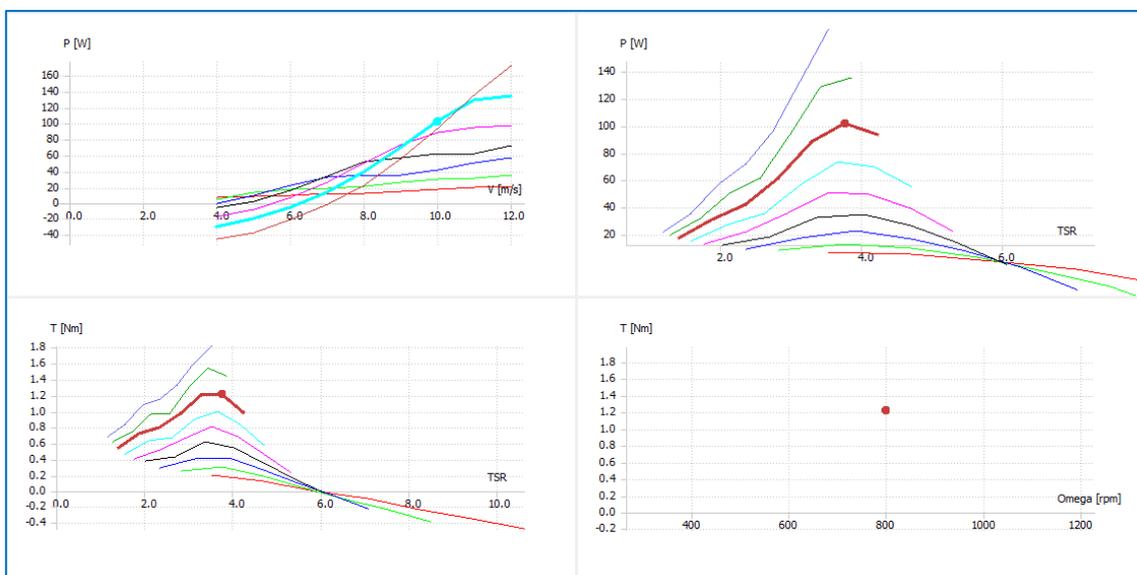
O desenho da pá da microturbina como um sólido facilita a observação da sua torção ao longo da envergadura, como pode ser visto abaixo:



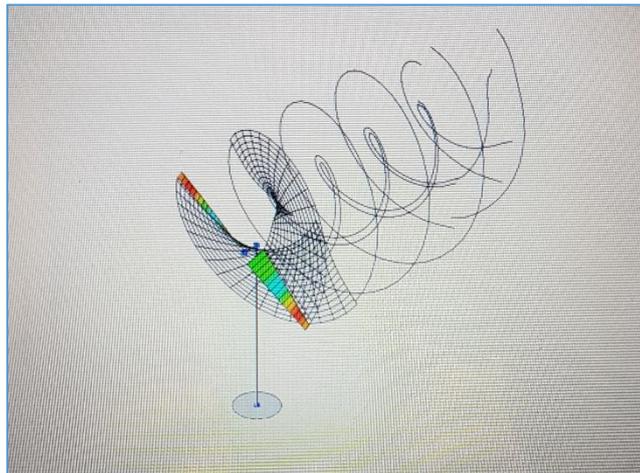
A tabela abaixo especifica a geometria da pá em 5 seções diferentes, sendo as demais seções interpoladas a partir desses dados.

Arquivo Criado com o QBlade v0.96 64bit v0.96 em 25.09.2018 às 15:52:14			
Posição Radial [m]	Comprimento da Corda [m]	Torção [deg]	Airfoil Name
5,00E-02	1,00E-01	4,17E+01	Coanda 1
1,50E-01	8,75E-02	3,10E+01	Coanda 1
2,50E-01	7,50E-02	2,04E+01	Coanda 1
3,50E-01	6,25E-02	9,74E+00	Coanda 1
4,50E-01	5,00E-02	-9,05E-01	Coanda 1

As figuras abaixo decorrentes da metodologia de análise BEM (Blade-Element Momentum) (Hansen, 2008), indicam os valores de desempenho do rotor, em condições de projeto.



O rotor é capaz de produzir 100 W de potência mecânica, no eixo, a 800 rpm, com um vento de 10 m/s. O Torque produzido é da ordem de 1.2 N.m nas mesmas condições. A operação do rotor (e a produção da esteira aerodinâmica) pode ser simulada com boa fidelidade pelo software QBlade:



O cruzamento da curva de torque disponível do rotor com o torque requerido pelo gerador (qualquer tipo escolhido pelo executante) irá determinar a rotação de equilíbrio e a conversão elétrica em cada condição de vento.

O “TSR” é um parâmetro de desempenho importante que indica a relação entre a velocidade tangencial na ponta do rotor (depende da rotação) e a velocidade do vento. Note que para parâmetros de TSR acima de 4, a curva de torque do rotor começa a cair. Isso é decorrente o fato de que a pá foi projetada para produzir estol (perda de capacidade de sustentação da pá), impedindo o aumento de rotação excessiva com eventual falha da estrutura⁵. Para conhecer o risco de falha estrutural catastrófica decorrente da rotação descontrolada de uma turbina eólica de grande escala, veja <https://youtu.be/CqEccgR0q-o>. Apesar desta turbina eólica ser de escala bastante reduzida, não subestime os riscos, seja prudente.

4.2 Verificação Estrutural Simples, de Segurança.

Para efeito de assegurar minimamente a integridade estrutural do rotor, uma verificação estrutural simples foi realizada para validar a seleção do plástico PVC como material de construção das pás, uma vez que ele possui elevada disponibilidade, baixo custo e facilidade de conformação. As placas necessárias como base para a fabricação das pás podem ser obtidas a partir de trechos de tubo de PVC com aproximadamente 500 mm de comprimento, cortadas longitudinalmente (na direção do eixo do tubo) e devidamente planificadas com aquecimento em estufa ou soprador térmico, antes da conformação da pá.

A preocupação estrutural básica que motivou essa verificação era saber se o material suportaria a aceleração centrífuga⁶.

⁵ Sem essa característica, o rotor seria capaz de produzir mais de 140 W de potência, a 800 rpm e vento de 10 m/s.

⁶ A força centrífuga é uma pseudo-força inercial que decorre do giro do rotor.

Dados básicos da geometria da pá:

Forma da pá:	trapezoidal	
Comprimento da pá:	0,4	m
Base maior:	0,1	m
Base menor:	0,05	m
Raio de giro máximo da pá:	0,45	m
Área da seção transversal da pá na raiz:	0,0004	m ²
Área da pá	0,03375	m ²
Espessura aprox. da pá:	0,004	M
Volume aprox. da pá:	0,000135	m ³
Material:	PVC	
Massa Específica:	1400	kg/m ³
Massa da pá:	0,189	Kg

Considerando a tensão admissível do PVC extrudado para escoamento como sendo 1,79 MPA, os coeficientes de segurança foram calculados para cada rotação da turbina. Foi empregado o menor valor da faixa de valores disponível na MatWeb⁷ (1,79 – 57.4), em função do fato do material ser aquecido durante o processo de conformação o que pode reduzir suas propriedades mecânicas.

Força centrífuga em função da rotação:					
Rotação	Aceleração	Força:	Tensão de tração na raiz da pá:	Tensão admissível à tração do PVC:	
rpm	m/s ²	N	MPA	MPA	Coef. Seg.
100	49,35	9,33	0,02	34	1.458
200	197,39	37,31	0,09	34	365
300	444,13	83,94	0,21	34	162
400	789,57	149,23	0,37	34	91
500	1.233,70	233,17	0,58	34	58
600	1.776,53	335,76	0,84	34	41
700	2.418,05	457,01	1,14	34	30
800	3.158,27	596,91	1,49	34	23
900	3.997,19	755,47	1,89	34	18
1000	4.934,80	932,68	2,33	34	15
1100	5.971,11	1.128,54	2,82	35	12
1200	7.106,12	1.343,06	3,36	36	11
1300	8.339,82	1.576,23	3,94	37	9
1400	9.672,21	1.828,05	4,57	38	8
1500	11.103,30	2.098,52	5,25	39	7
1600	12.633,09	2.387,65	5,97	40	7

⁷http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=bb6e739c553d4a34b199f0185e92f6f7

1700	14.261,58	2.695,44	6,74	41	6
1800	15.988,76	3.021,88	7,55	42	6
1900	17.814,64	3.366,97	8,42	43	5
2000	19.739,21	3.730,71	9,33	44	5
2100	21.762,48	4.113,11	10,28	45	4
2200	23.884,44	4.514,16	11,29	46	4

Na rotação de projeto de 800 rpm a turbina terá coeficiente de segurança de 23. Não se deve permitir sua rotação acima de 1.200 rpm (coeficiente de segurança mínimo de 11, devido às cargas de flexo-torção e dinâmicas não computadas e à falta de conhecimento das propriedades estendidas do PVC empregado). Quanto mais simples os materiais e os processos construtivos adotados pelo executor, menor deve ser a rotação permitida ao rotor (inclusive com o uso de métodos ativos de frenagem, se for o caso) e maior o coeficiente de segurança recomendado.

4.3 O Cubo do Rotor (hub).

O cubo do rotor tem várias funções importantes, tais como fixar as pás com o ângulo adequado de torção e transmitir o torque do rotor ao gerador, tudo isso consumindo o mínimo da potência mecânica produzida pelo rotor. Para que o atrito seja pequeno, o cubo deve ser associado a um mancal de transmissão.

Um cubo é formado de várias partes: eixo, hastes de fixação das pás, placas de fixação das pás, acoplamento com o mancal e spinner.

Dois tipos de cubos de rotor foram projetados para a microturbina eólica do Fab Lab do IMT, priorizando o baixo custo e a disponibilidade dos materiais em qualquer lugar: um empregando um mancal de disco rígido e o outro empregando um mancal de bicicleta. Algumas fotos são mostradas abaixo e os desenhos de fabricação são fornecidos com o projeto.

Mancal de disco rígido (HD) que pode ser usado (maior, mais antigo) e os não recomendados (menores, mais novos).



No caso de uso de mancal de disco-rígido, recomenda-se o balanceamento mais cuidadoso do rotor, para aumentar a vida útil do mancal.

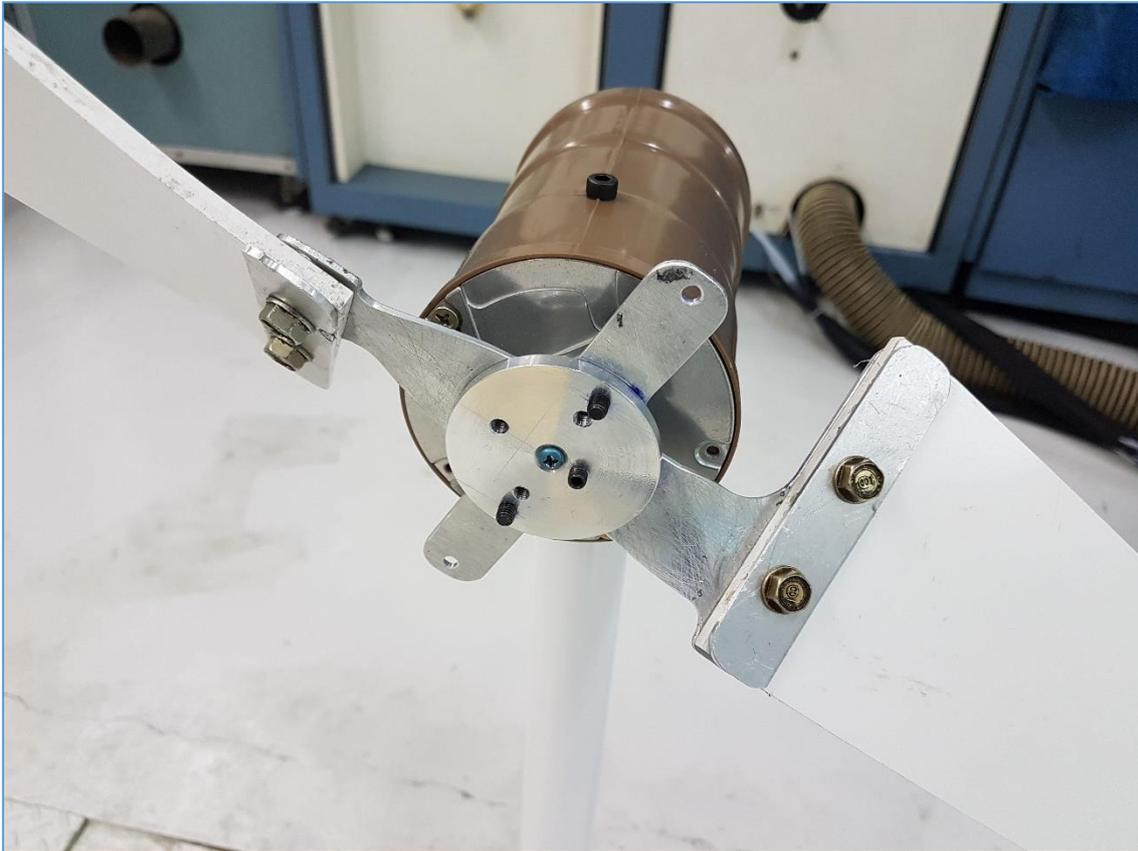
A placa do cubo do rotor para uso com mancal de disco-rígido pode ser recortada em chapa de alumínio de 3 mm de espessura:



Abaixo o acoplamento que foi usinado para unir o eixo do gerador com o mancal de disco rígido.



Abaixo o cubo finalizado e instalado na nacelle, sem o spinner.



O mancal de bicicleta, abaixo, é mais recomendado para montagens com maior durabilidade, porém, assegure-se de obter um mancal alinhado, que não gire fora do eixo.



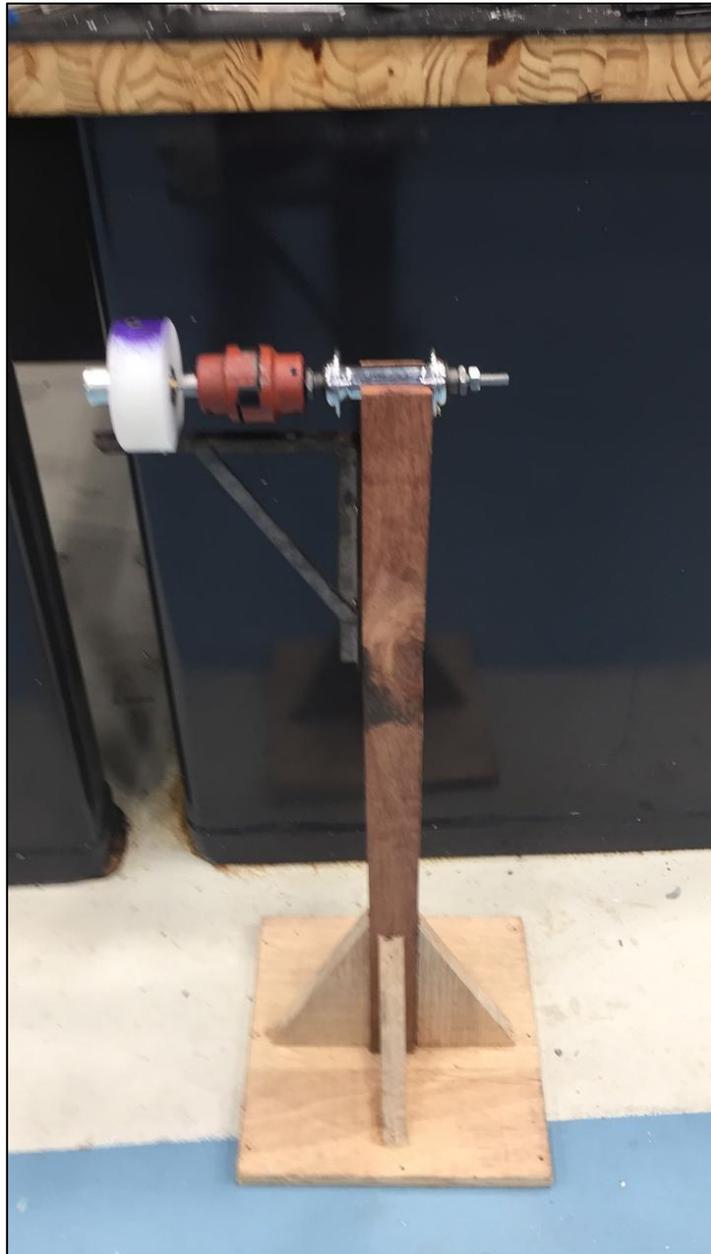
O eixo do cubo usinado, abaixo, é apropriado para uso com o mancal de bicicleta.



4.4 A Haste de Fixação do Conjunto e a Nacelle⁸.

Apesar do pequeno diâmetro do rotor, a haste de fixação do conjunto deve ser robusta pois as cargas eólicas e de vibração podem ser significativas. Dois projetos diferentes foram realizados para ilustrar as possibilidades ao executor. O mais simples é de madeira e tem uma mão-francesa para apoiar o conjunto de peças que suporta o rotor e o gerador (mancais). É importante que a altura mínima do suporte seja pelo menos uma vez e meia o raio da pá, que é de 450 mm.

⁸ A Nacelle é o envoltório que cobre o mancal do cubo e o suporte para o gerador elétrico.



O projeto alternativo é feito de tubo metálico de aço de 1 ½ polegadas, com no mínimo 750 mm de altura, soldado sobre uma chapa quadrada de 1/8" de espessura, com lado de 250 mm. A chapa possui quatro furos de 6,5 mm nas suas extremidades para fixação. Neste caso, a nacelle foi feita em conexão de PCV marrom tipo "T" de 2", original.



Um projeto mais sofisticado de haste pode ser adaptado pelo executante, para permitir que o rotor fique sempre voltado ao vento e tenha uma taxa de conversão anual de eletricidade mais elevada. Esse tipo de projeto demanda a instalação de um segundo mancal, para permitir o giro relativo entre a haste e a nacelle. Neste caso a nacelle deve ter um prolongamento para abrigar um leme (como um leme de cata-vento) que será usado para posicionar passivamente a turbina sempre de frente para o vento incidente. Além disso, o executante deverá dotar o equipamento de um sistema que permita manter o contato elétrico entre o gerador e o circuito independentemente da direção do eixo da turbina.

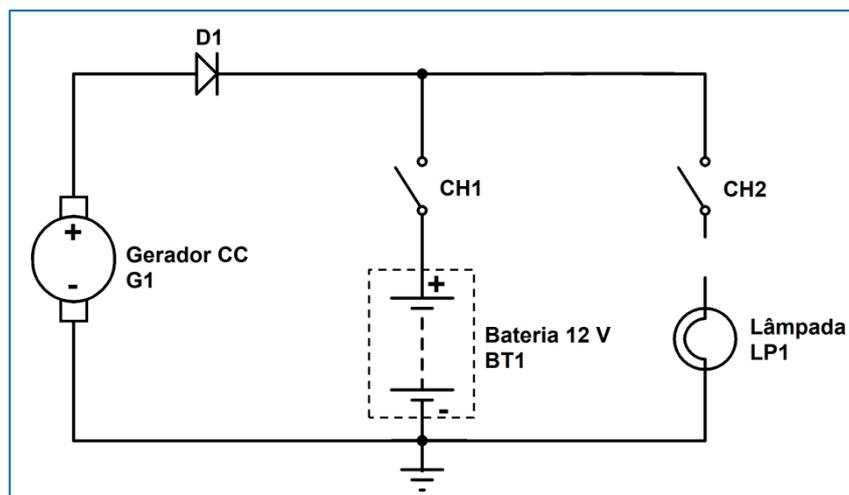
No caso da haste de direção fixa previsto neste projeto simples, o executante deverá instalar o equipamento na direção do vento predominante na sua região.

A lista de materiais para produzir a haste de sustentação de madeira, mais simples de ser fabricada, está descrita abaixo.

Componente	Quantidade	Especificação (mm)
Base de madeira	1	750x250x250
Suporte para prateleira	1	200x200
Suporte do gerador (moto-reductor)	1	Ø80x30, nylon, plástico ou madeira (pode ser feito em impressora 3D).
Gerador (moto-reductor de robótica)	1	Marca Akiyama, tensão de trabalho entre 5 V e 15 V, referência: 6V @ 320 rpm.
Acoplamento elástico	1	Uniflex E10
Eixo de roda dianteira de bicicleta	1	Ø10x120
Cubo do rotor	1	Ø55x70
Fuso para fixação das pás	1	M8
Placa de fixação das pás	2	100x22x2
Placa superior para fixação das pás	2	100x20x2
Spinner	1	Impresso (3D) em PLA
Porcas para fixação das pás no Cubo e Placas	4	M8
Parafuso M5 sem cabeça para fixar o motor no seu mancal	1	M5x10
Parafusos para fixar o mancal do motor ao suporte de prateleira	2	Cabeça Chata Philips 3,5x30
Parafusos para fixar o eixo de bicicleta na base de madeira	4	Cabeça Chata Philips 3,5x30

4.5 O Projeto Elétrico.

Considerando como função do sistema elétrico promover a transformação da energia mecânica gerada no eixo do rotor em energia elétrica de modo a ser empregada, por exemplo, para acender lâmpadas, utilizou-se como configuração o circuito ilustrado no esquema elétrico a seguir.



4.6.1 Descrição dos componentes

A seguir são apresentados os componentes da configuração em questão, juntamente com as suas funções:

- Gerador CC $G1$ - motor corrente contínua operando como gerador, o qual pode ser obtido a partir de, por exemplo, equipamentos eletroeletrônicos, como: brinquedos, leitores de disco magnético, atuadores automotivos, dentre outros;
- Diodo $D1$ – normaliza o sentido da corrente no circuito, de modo que $G1$ opere somente como gerador, na condição da tensão gerada ser maior que a tensão nos terminais da bateria $BT1$. A ausência de tal diodo possibilitaria que a bateria atuasse sobre o motor, acionando o mesmo, o que seria indesejável no sistema em questão;
- Bateria $BT1$ – acumula energia elétrica proveniente do gerador $G1$, possibilitando o acendimento da lâmpada $LP1$ na condição de rotor parado ou com baixa velocidade;
- Lâmpada $LP1$ – lâmpada de alto rendimento para tensão contínua de 12 V. Pode ser obtida a partir de lâmpadas a LEDs, ou construída com LEDs de alto brilho;
- Chaves $CH1$ e $CH2$ – possibilitam a manobra das cargas (bateria e lâmpada), como mostrado no quadro a seguir.

Condição das chaves		Bateria BT1	Lâmpada LP1
CH1	CH2		
Aberta	Aberta	Desconectada do circuito	Desconectada do circuito
Aberta	Fechada	Desconectada do circuito	Acesa se $V_g > 11,7 \text{ V}$
Fechada	Aberta	Carregando se $V_g > 0,7 + V_{bat}$	Desconectada do circuito
Fechada	Fechada	Carregando se $V_g > 0,7 + V_{bat}$ e acendendo a lâmpada LP1 se $V_{bat} \geq 11 \text{ V}$	Acesa se $V_{bat} \geq 11 \text{ V}$

V_g = tensão elétrica entre os terminais + e - do gerador em V.

V_{bat} = tensão elétrica entre os terminais + e - da bateria em V.

4.6.2 Seleção e dimensionamento dos componentes elétricos

Partindo da premissa que o sistema possua composição baseada em componentes de fácil obtenção, serão apresentados a seguir os procedimentos adotados para a elaboração da parte elétrica.

4.6.2.1 Gerador CC

Por ser comumente utilizado em dispositivos eletroeletrônicos de baixa potência, foi utilizado um motor CC (corrente contínua) como gerador, ilustrado a seguir.

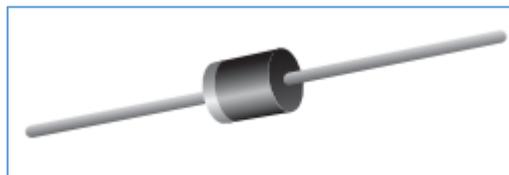


Especificação: fabricante Akiyama, tensão de trabalho entre 5 V e 15 V, referência em 6V @ 320 rpm.

Dado obtido em ensaio para o atual projeto: 13,4 V com corrente de 33,7 mA na rotação de 800 rpm.

4.6.2.2 Diodo

O diodo empregado não possui características especiais, ou seja, pode ser de ação lenta e não necessita de grandes isolações para tensão reversa. A figura abaixo ilustra o diodo selecionado, comumente encontrado em dispositivos eletrônicos e lojas do ramo, ou em configuração compatível.



Especificação: 6KA24, silício, dissipação máxima 6,5 W.

Compatíveis: SR506, SF56, SB540A, IN5406, dentre outros.

4.6.2.3 Bateria

Como bateria, pode-se utilizar acumuladores tipo chumbo-ácido normalmente empregados em alarmes residenciais, *nobreaks*, motocicletas, dentre outros, com tensão de operação 13,7 V (comercializadas como baterias de 12 V). A seguir são ilustradas duas possibilidades, sendo a primeira uma bateria tipicamente empregada em alarme residencial e a segunda em motocicleta de 125 cilindradas com partida elétrica.



4.6.2.4 Chaves

Pode-se utilizar qualquer tipo de interruptor simples (uma seção) para baixa corrente, como os apresentados nas figuras a seguir, respectivamente: chave alavanca (utilizada no projeto), chave gangorra retangular, chave gangorra redonda, interruptor residencial externo, interruptor residencial de embutir, dentre outros.

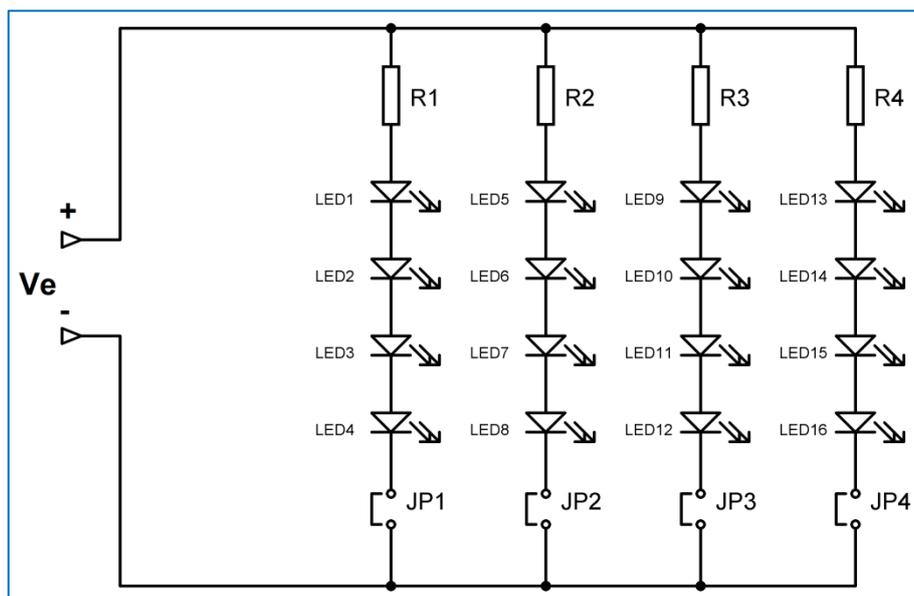




4.6.2.5 Lâmpada

Pode-se empregar neste sistema qualquer lâmpada que opere na faixa de 12 V, em potência compatível com a do gerador.

Para o projeto em questão, a lâmpada foi desenvolvida a partir de leds de luz branca alto brilho, cujo arranjo resultou na obtenção de alta luminosidade, operando entre 10 V e 14 V, com potência de aproximadamente 3 W em 11 V. O circuito do arranjo é apresentado a seguir.



Quanto à nomenclatura utilizada, a saber:

- V_e : tensão de alimentação, operando na faixa 10~14 V;
- $R1$ a $R4$: resistores limitadores de corrente, cujo dimensionamento será apresentado abaixo;
- $LED1$ a $LED16$: LEDs de alto brilho branco, diâmetro de 5 mm, com tensão 2,7 V @ 10 mA, para a potência nominal.
- $JP1$ a $JP4$: jumpers opcionais, para ajuste da luminosidade em $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ ou máxima.

Dimensionamento do resistor R_i ($R1$ a $R4$): admitindo as características do LED acima especificado, determina-se:

$$V_{R1} = V_e - 4 \cdot V_{LED} = 12 - 4 \cdot 2,7 = 1,2 \text{ V}$$

$$I_{R1} = I_{LED}$$

$$R1 = \frac{V_{R1}}{I_{R1}} = \frac{1,2}{10\text{mA}} = 120 \Omega$$

$$P_{R1} = V_{R1} \cdot I_{R1} = 12 \text{ mW}$$

Por se tratar de circuito simétrico, então $R1=R2=R3=R4 = 120 \Omega \times 1/8 \text{ W}$ (comercial).

A corrente fornecida pela fonte V_e (gerador) é calculada por

$$I_e = 4 \cdot I_{LED} = 40 \text{ mA}$$

Resultando na potência máxima consumida pela lâmpada de

$$P_{LP1} = V_e \cdot I_e = 480 \text{ mW}$$

4.6.2.6 Custo da lâmpada desenvolvida

A tabela abaixo contempla os custos médios dos componentes, adquiridos em baixa quantidade, sem os condutores ou plataforma para montagem.

Item	Qde	Valor		Local
		Unitário	Total	
Motor como gerador CC	1	R\$ 59,00	R\$ 59,00	www.robocore.com.br
Led alto brilho 5mm branco	16	R\$ 0,61	R\$ 9,76	www.soldafria.com.br
Resistor 120R x 1/8	4	R\$ 0,05	R\$ 0,20	www.soldafria.com.br
Chave alavanca	2	R\$ 4,85	R\$ 9,70	www.soldafria.com.br
Diodo retificador 5 A	1	R\$ 0,82	R\$ 0,82	www.soldafria.com.br
Mini jumper sem aba	4	R\$ 0,09	R\$ 0,36	www.soldafria.com.br
Barra De Pinos 1x40 Vias 11,2mm 180 Graus	1	R\$ 0,48	R\$ 0,48	www.soldafria.com.br
			R\$ 80,32	

5. A Construção

As instruções de construção, excetuando-se as pás e cubo, são apenas sugestões que podem ser alteradas para a utilização de sucata, materiais reciclados e materiais disponíveis, de forma a reduzir o custo do projeto.

Um filme protagonizado pelo Iberê Thenório que ilustra a sequência de construção, as operações realizadas, materiais empregados e alternativas está disponível no Youtube®, no canal do Manual do Mundo®, para facilitar o entendimento de cada passo. Em função do “vídeo manual” disponível para auxiliar na montagem, apenas uma descrição adicional do processo de fabricação das pás é fornecida abaixo.

5.1 As Pás do Rotor

Fabrique e ajuste com cuidado as pás pois essa é a parte mais crítica e importante do projeto. Pequenas alterações de qualidade no processo de fabricação das pás resultam em grandes aumentos de eficiência na conversão de energia.

As pás do rotor são cortadas a partir de um desenho planificado (Blade_3_5sections_plan), em uma chapa de PVC de 5 mm de espessura. Pode-se usar um tubo de PVC cortado e planificado com soprador quente. A chapa de PVC para corte da pá deve ter 100 mm x 500 mm, pelo menos. A maior largura da pá (raiz) é de 100 mm e sua menor largura (ponta) é de 50 mm. As seções (raiz e ponta) devem ser alinhadas a 25% da corda. O traçado é um trapézio, ao qual adiciona-se 20 mm na base para efeito da fixação da pá, totalizando, portanto, 420 mm de raio.

O processo de conformação da pá tem várias etapas. Porém, executantes sem experiência poderão fazer somente as etapas mais simples, sem passar pela conformação do aerofólio que é a etapa mais trabalhosa e consome cerca de 1 hora de trabalho manual por pá. Lembre-se que, em qualquer caso, medidas devem ser tomadas para que não se extrapole a rotação de 1.200 rpm no rotor.

Os passos de conformação ideal de cada pá estão descritos abaixo:

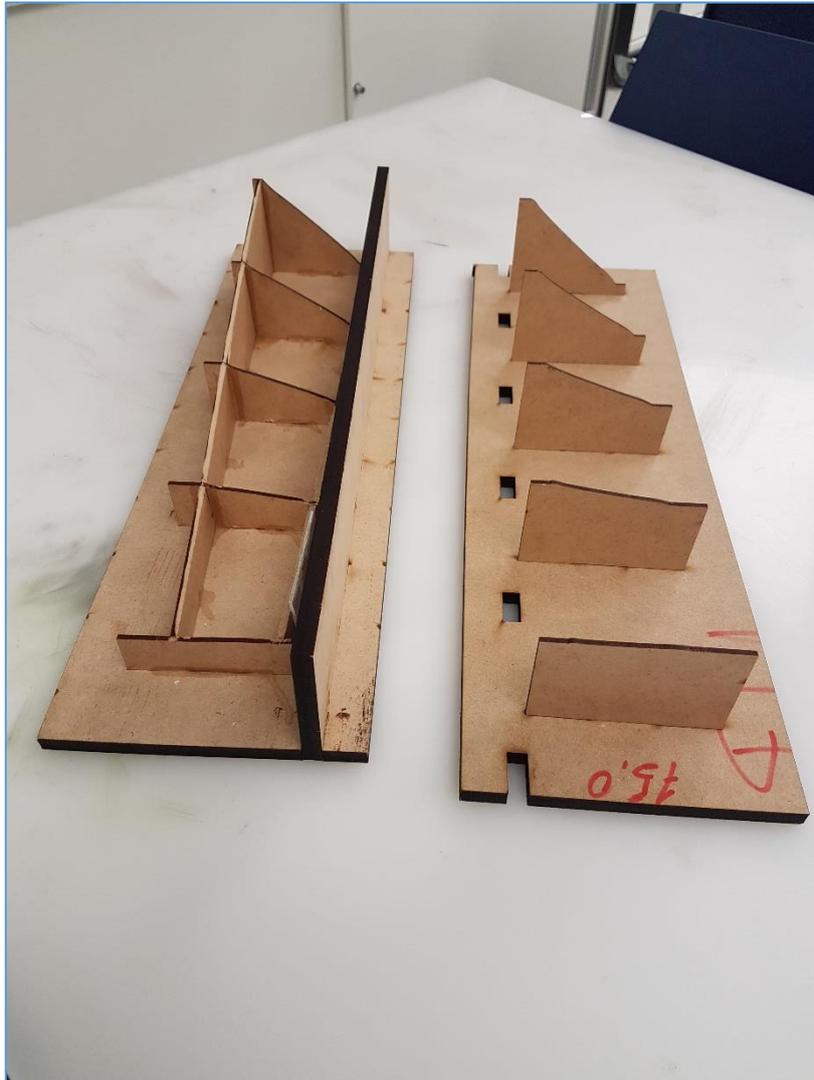
Passo	Descrição
1	Preparação da chapa de PVC de 5 mm
2	Desenho da pá a ser recortada, sobre a chapa e recorte da chapa.
3	Marcação da linha de 25% da corda
4	Construção do gabarito de torção.
5	Aquecimento e aplicação da torção geométrica
6	Colagem dos aerofólios de referência na raiz e na ponta da pá.
7	Colagem de uma madeira balsa leve, de 1 a 2 mm de espessura no intradorso do bordo de ataque, para conformação perfeita da curvatura do aerofólio.
8	Construção do gabarito geométrico 3D.

9	Trabalho de lixamento manual ou com lixadeira de cinta, para conformação aerodinâmica de todas as seções entre a raiz e a pá.
10	Lixamento fino para acabamento da superfície, deixando-a lisa nos dois lados (intradorso e extradorso).
11	Aplicação do fio de nylon no bordo de fuga, no extradorso do aerofólio, perto do bordo de fuga.
12	Balanceamento estático da pá (necessário).
13	Balanceamento dinâmico da pá (recomendado para aumentar a segurança e durabilidade do equipamento).

A figura abaixo ilustra, da esquerda para a direita, os passos de 2, 3, 5, 6 e 9 do processo de fabricação das pás.



O gabarito de torção, passo 4, pode ser visto abaixo, assim como alguns passos da conformação:

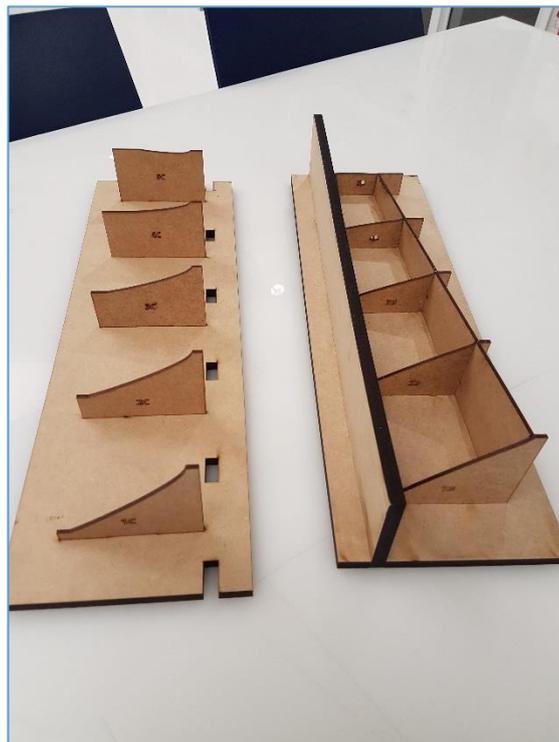




O sétimo passo está ilustrado abaixo e tem a função de completar uma pequena espessura faltante na chapa de PVC para deixar o bordo de ataque com o perfil correto, perto da raiz da pá.

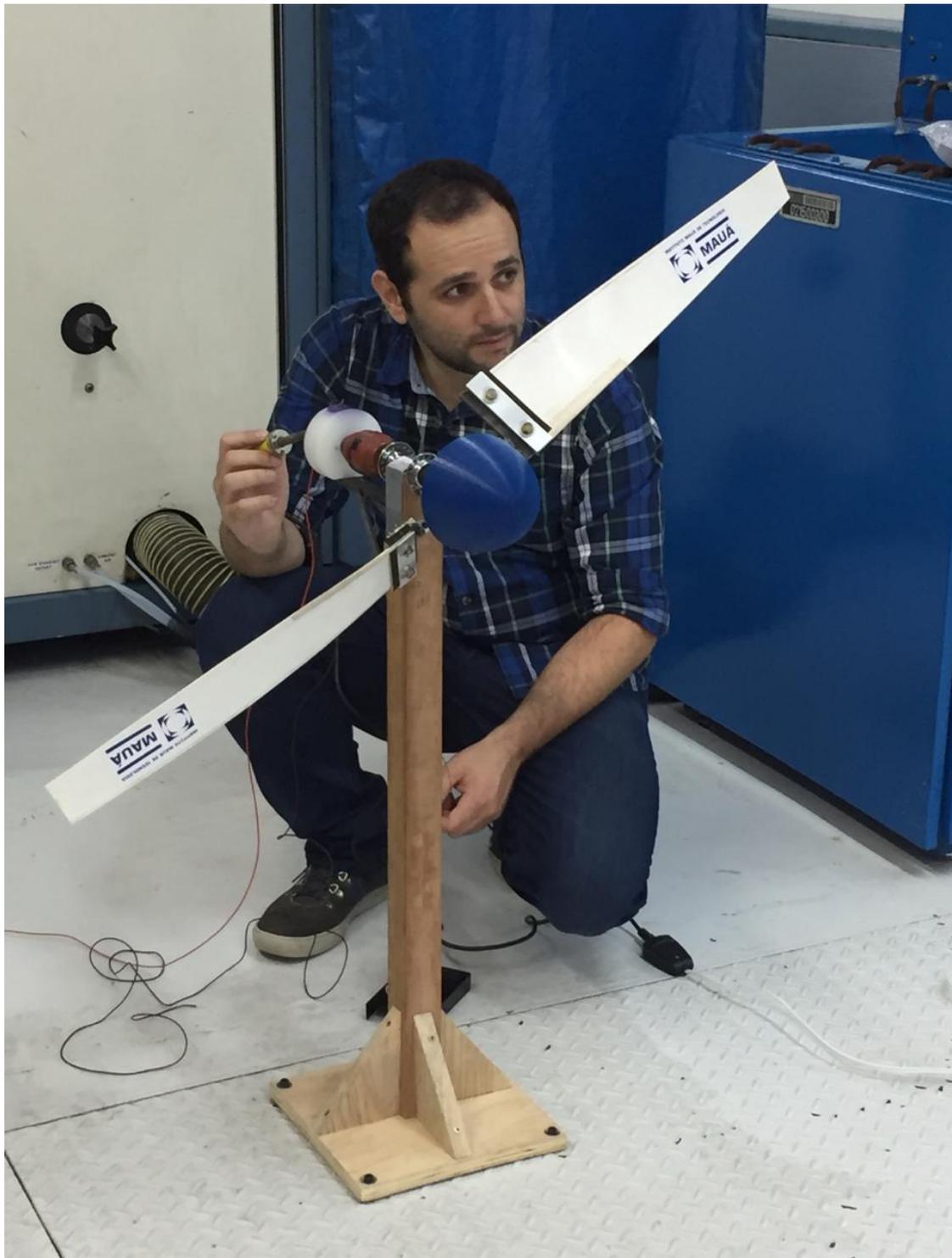


O gabarito geométrico, passo 8, pode ser visto abaixo. Note o formato do aerofólio com a torção apropriada em cada seção do gabarito.





A figura abaixo apresenta o projeto finalizado e pronto para ser testado na frente de um ventilador industrial, pelo Iberê Thenório.



5.2 O sistema elétrico

Abaixo segue uma sugestão de montagem para o conjunto elétrico.



6. Os Testes.

Certifique-se de que o rotor esteja bem balanceado estaticamente e, se possível, dinamicamente⁹. As situações abaixo são condições mínimas para um teste do equipamento, em velocidades baixas (com vento < 6 m/s):

- ➔ A massa das duas pás deve ser bem próxima, com diferença máxima de 0,1 g.
- ➔ Ajuste corretamente a posição e torção das mesmas no cubo. A posição da raiz é 41.7° com relação ao plano de rotação. As pás são presas no suporte com seu lado “de baixo” (intradorso) voltado para a frente do observador que olha da frente da turbina.
- ➔ Não acople o gerador e faça vários testes para ver se as pás do rotor ficam na posição em que você o solta (horizontal, + 45°, - 45°), sem se mover, ou seja, apresentam equilíbrio indiferente. Enquanto uma das pás se deslocar sozinha para a posição inferior, o rotor não estará estaticamente balanceado.

Se você não realizar o balanceamento dinâmico do rotor, limite o uso da sua microturbina eólica a ventos de até 6 m/s.

A foto abaixo mostra o processo de fixação do rotor de um modelo, antes dos testes. A velocidade do vento é incrementada vagarosamente de 1 a 6 m/s no teste. Velocidades maiores são permitidas apenas para rotores balanceados dinamicamente.



⁹ Atualmente há aplicativos para celular que funcionam como acelerômetros e auxiliam na tarefa do balanceamento dinâmico de um rotor.

7. Índice de arquivos.

Item	Parte	Nome do Arquivo	Tipo de Arquivo	Observação
1	Manual Geral do Projeto	Microturbina Eólica Fab Lab IMT	PDF	
2	Pás, Rotor, Análise de Desempenho	Projeto_MicroTurbina_Eólica_IMT.wpa	QBlade®	QBlade v0.96; disponível em Sourceforge.com
3	Aerofólio	Coanda1.dat	texto	Disponível em UIUC airfoil database.
4	Projeto Preliminar	Pré_Dimensionamento_MicroTurbina Eólica_IMT.xlsx	LibreOffice, MS Office	Planilha Eletrônica
5	Pá planificada	Blade_3_5sections_plan	Objeto 3D e texto	
6	Pá com torção	Blade_3_5sections; Tabela Geometria da Pá	Objeto 3D e texto; Planilha Eletrônica	
7	Base A	Base de Madeira	PDF	
8	Base B	Base de Metal	PDF	
9	Cubo, base A	Cubo do Rotor	PDF	
10	Fuso, Base A	Fuso M8	PDF	
11	Mancal, Base A	Mancal do Motor	PDF	
12	Placa 1, Base A	Placa de fixação da pá	PDF	
13	Placa 2, Base A	Placa superior de fixação da pá	PDF	
14	Spinner	Spinner	PDF	
15	Molde 1	Gabarito de Torção		
16	Molde 2	Gabarito de Geometria final da pá		

8. Bibliografia

Hansen, M., 2008. *Aerodynamics of Wind Turbines*. Second Edition ed. London, UK: Earthscan.

Lucon, O. & Goldemberg, J., 2007. Energia e Meio Ambiente no Brasil. *Estudos Avançados*, p. 21 (59).

Marten, D., 2010. *Extension of an Aerodynamic Simulator for Wind Turbine Blade Design and Performance Analysis*, Berlin: TU Berlin.

Marten, D., 2014. *Qblade Short Manual V0.8*, Berlin: TU Berlin.

Marten, D., 2016. *QBlade v0.95 - Guidelines for Lifting Line Free Vortex Wake Simulations*, Berlin: TU Berlin.

Marten, D. & Wendler, J., 2013. *Qblade Guidelines v0.6*, Berlin: TU Berlin.

Saab Jr., J. Y., 2016. *Trailing-Edge Noise - Development and Application of a Noise Prediction Tool for the Assessment and Design of Wind Turbine Airfoils*, Sao Paulo: Doctor in Sciences Thesis.

