

FELIPE FERNANDES LOPES
SUYARA SANTOS
VINÍCIUS FONSECA DA SILVA

TRABALHO ACADÊMICO INTEGRADOR II
PRÉ-MODELAGEM DE UM AEROGERADOR DE EIXO VERTICAL

ARCOS-MG
JUNHO/2017

FELIPE FERNANDES LOPES
SUYARA SANTOS
VINÍCIUS FONSECA DA SILVA

**TRABALHO ACADÊMICO INTEGRADOR II – PRÉ-MODELAGEM DE UM
AEROGERADOR DE EIXO VERTICAL**

Relatório apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG), referente ao Trabalho Acadêmico Integrador, como requisito parcial para aprovação em todas as disciplinas ministradas no 2º período do Curso de Engenharia Mecânica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Francisco de Sousa Junior.

ARCOS-MG
JUNHO/2017

BANCA EXAMINADORA

Relatório referente ao Trabalho Acadêmico Integrador (TAI), apresentado em ___ de _____ de 2017, avaliado pela banca examinadora constituída pelos professores:

Orientador: Prof. Dr. Francisco de Sousa Junior

(Nome do professor: _____)

(Nome do professor: _____)

AGRADECIMENTO

A Deus por ter nos dado saúde e força para superar as dificuldades.

Ao nosso Professor Orientador Dr. Francisco de Sousa Junior, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos.

Agradecemos a todos os professores por nos proporcionarem conhecimento no decorrer do trabalho.

A todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para a realização do TAI, o nosso muito obrigado.

RESUMO

O propósito deste trabalho é modelar e simular um Aerogerador de eixo vertical, utilizando o *software* AutoCad e Inventor. Nele apresentamos as diferentes turbinas, a importância que a energia eólica tem para a diversificação da matriz energética no contexto de uma produção energética renovável e por fim as aplicações das disciplinas cursadas no segundo período como ferramenta fundamental para elaboração e resolução dos cálculos apresentados no decorrer do projeto.

Palavras-chave: Aerogerador. Turbinas. Energia eólica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Geração de energia no mundo.....	13
Figura 2: Matriz elétrica brasileira - 2016.....	14
Figura 3: Moinho de vento persa.....	16
Figura 4: Pequena moenda portátil.....	17
Figura 5: Aerogerador Darrieus.....	18
Figura 6: Aerogerador do tipo Savonius.....	19
Figura 7: Aerogerador em Vermont.....	19
Figura 8: Pequeno Aerogerador dinamarquês.....	21
Figura 9: Capacidade de geração de energia eólica (MW).....	22
Figura 10: Tipos de turbina de eixo vertical.....	23
Figura 11: Componentes do aerogerador.....	24
Figura 12: Correlação entre a geração de energia eólica e as emissões de CO ₂ evitadas em 2016.....	26
Figura 13: Eixo completo.....	29
Figura 14: Pá.....	29
Figura 15: Suporte.....	30
Figura 16: Aerogerador montado.....	30
Figura 17: Gráfico das velocidades de vento.....	31
Figura 18: Representação superior da pá.....	32
Figura 19: Curvas que delimitam a pá.....	32
Figura 20: Vista isométrica da pá.....	33
Figura 21: Representação do olhal.....	34
Figura 22: Vista em corte do eixo.....	35
Figura 23: Vista seccionada da haste de suporte das pás.....	35
Figura 24: Momento de inércia da pá.....	38
Figura 25: Ângulos de incidência sobre cada pá.....	40
Figura 26: Análise de escoamento de fluido.....	41
Figura 27: Disposição dos cabos de tensão.....	42
Figura 28: Forças atuantes nos nós.....	42
Figura 29: Gráfico da tração em função do ângulo.....	46
Figura 30: Momento de inércia do rotor.....	47

Figura 31: Gráfico da potência em função da velocidade linear	49
Figura 32: Gráfico da potência em função do tempo de aceleração.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Ângulos de incidência do vento.....	40
Tabela 2: Características físicas	50
Tabela 3: Condições iniciais.....	50
Tabela 4: Dados Obtidos	50

SUMÁRIO

AGRADECIMENTO	4
RESUMO	5
LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABELAS	8
SUMÁRIO.....	9
1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS.....	12
2.1. OBJETIVO GERAL	12
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3. JUSTIFICATIVA.....	13
4. REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	16
4.1. ENERGIA EÓLICA	16
4.2. ENERGIA EÓLICA NO BRASIL	21
4.3. TIPOS DE TURBINAS EÓLICAS	22
4.4. COMPONENTES DO AEROGERADOR.....	24
4.5. FORÇAS AERODINÂMICAS	24
4.6. VANTAGENS DA ENERGIA EÓLICA.....	25
4.7. ENERGIA EÓLICA E A TECNOLOGIA.....	26
4.8. ENERGIA EÓLICA E A SOCIEDADE.....	27
4.9. ENERGIA EÓLICA E A CIÊNCIA	27
4.10. DESVANTAGENS DA ENERGIA EÓLICA	28
5. METODOLOGIA	29
5.1. MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS	29
5.2. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	36
6. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	36

6.1.	FORÇAS APLICADAS AO SISTEMA.....	36
6.2.	CALCULO DE TENSÃO NOS CABOS DE SUSTENTAÇÃO.....	41
6.3.	ANÁLISE DO MOVIMENTO DO ROTOR	47
6.4.	CÁCULO PARA DIMENSIONAMENTO DA TURBINA	51
6.5.	AJUSTES E TOLERÂNCIAS.....	51
7.	CONCLUSÕES.....	54
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
	ANEXOS	57

1. INTRODUÇÃO

A utilização da energia em função dos ventos não surgiu recentemente. Desde a antiguidade que se percebeu a força do vento. O vento era aproveitado nos barcos que se movimentavam impulsionados por este através de velas, para diminuir as forças feitas nos remos. Com o passar do tempo, passou-se a utilizar a força dos ventos para a moagem dos grãos e, logo depois, no final do século IX que começaram a utilizar a energia eólica como fonte de geração de energia elétrica.

O vento – atmosfera em movimento – é considerado fonte renovável de energia. Atualmente, a energia do vento é aproveitada para produção de eletricidade. Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com o uso de turbinas eólicas. Os aerogeradores são colocados em regiões ventosas, geralmente em áreas de maior altitude.

As principais turbinas eólicas na atualidade são Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal e Turbinas Eólicas de Eixo Vertical. Os elementos de um aerogerador de eixo vertical são basicamente: Pá, Eixo do rotor, cabos de amarração, caixa de engrenagens, gerador e torre de sustentação.

Esse projeto consiste na construção de um Aerogerador de eixo vertical e na simulação 3D (modelagem) do mesmo, utilizando o software Inventor. Também são apresentados os cálculos relacionados no projeto do aerogerador de eixo vertical.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem por finalidade desenvolver a expressão gráfica e desenho técnico, utilizando os softwares AutoCAD e Inventor, que auxiliaram na construção do projeto do Aerogerador de eixo vertical e na simulação 3D (modelagem).

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar um aerogerador de eixo vertical;
- Modelação do aerogerador no *software* Inventor;
- Simulação do movimento no *software* Inventor.

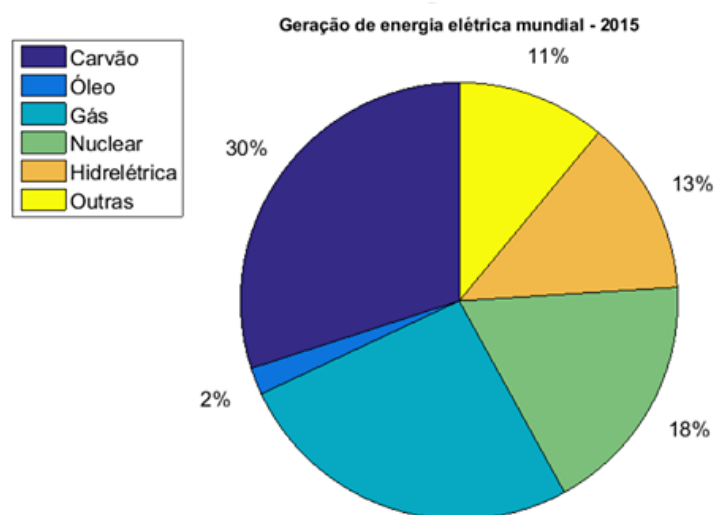
3. JUSTIFICATIVA

Com o crescimento e desenvolvimento da população a demanda por eletricidade tem aumentado ano após ano e preocupações com o possível esgotamento das fontes tradicionais e com os impactos ambientais, sejam eles causados pela queima de combustíveis fósseis ou por resíduos radioativos tem feito com que as fontes alternativas ganhem cada vez mais destaque. Entre as fontes alternativas a geração eólica tem ganhado muito destaque e vários estudos estão sendo feitos por se tratar de energia limpa, renovável e com alta competitividade. (TABARES, et al, 2014)

Grandes investimentos estão sendo feitos por países como a Alemanha, onde qualquer cidadão pode gerar e comercializar energia elétrica com as concessionárias, sem grande burocracia. As fontes eólicas e solares têm ganhado especial enfoque, com destaque para as fontes eólicas que na Alemanha “nos primeiros 4 meses de 2014 geraram 20,5 TW/h de energia com uma carga instalada de 33,668 GW, segundo dados do instituto *Fruanhofer* contidos no documento *Electricity production from solar and Wind in Germany in 2014*”. (CARVALHO, TRABASSO, 2014)

A produção energética, predominante ao redor do mundo, é oriunda de matrizes não renováveis, proveniente da queima do carvão/petróleo/gás em termoelétricas e energia nuclear, segundo dados da IEA – International Energy Agency. (Figura 1).

Figura 1: Geração de energia no mundo



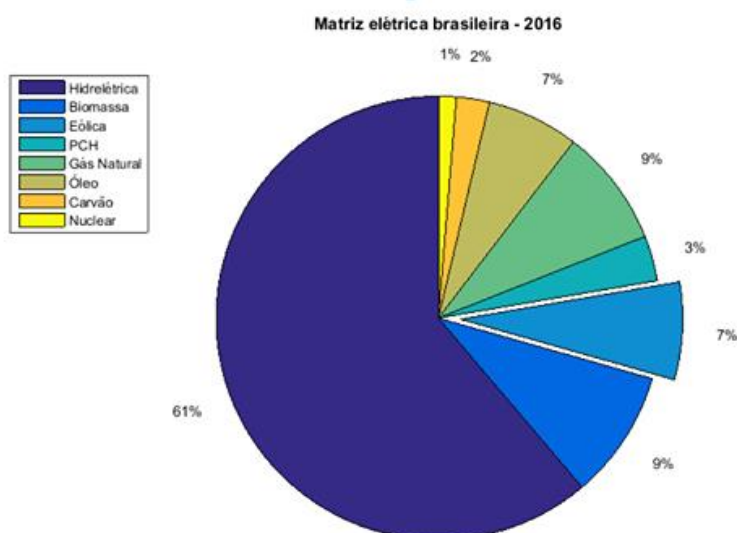
Fonte: Próprios autores

¹ Outras: incluem geotérmica, solar, eólica, maré, bicombustíveis, resíduos e calor.

Segundo a EPE (Empresa de Pesquisa Energética) a projeção de crescimento do consumo energético no país deve crescer a uma taxa anual de 4,01% até 2020, contudo o consumo energético no ano de 2016 foi de 463.646 GW/h e se espera que em 2020 o consumo chegue a 542.940 GW/h (MME, 2016). Com a diminuição crescente da possibilidade de construção de hidroelétricas de grande porte, a participação de termoeletricas deve aumentar consideravelmente na matriz energética nacional, o que ocasionará um aumento nos custos de produção energética, que serão repassados para o consumidor.

Tendo tal cenário em vista, é notória a necessidade de uma diversificação da matriz energética nacional, que é predominantemente hidráulica. (Figura 2).

Figura 2: Matriz elétrica brasileira - 2016



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética.

O mercado de energia eólica de grande porte ocupa uma posição de destaque dentre as chamadas fontes alternativas de geração de energia, vem recebendo grande estímulo do governo brasileiro. De 2001 até 2013, o setor eólico recebeu investimentos de US\$ 14 bilhões, montante equivalente ao investido na hidroelétrica de Belo Monte (11.233 MW). (GIANNINI et al, 2013)

O mercado de energia eólica de grande porte está cada dia mais consolidado. Contudo o segmento de pequeno porte (definida no Brasil pela Resolução Normativa ANEEL nº 482 de 17 de abril de 2012, como sendo instalações com até 1MW de

capacidade instalada) ainda dá seus primeiros passos, em contraponto a países como a China e EUA que já possuem 450 e 144 mil unidades instaladas respectivamente. A “*World Wind Energy Association*” estima atingir uma capacidade instalada de 750 MW até o ano de 2020 em todo o mundo. (GIANNINI et al, 2013)

Países europeus têm incentivado cada vez mais a injeção de energia elétrica na rede proveniente de aerogeradores de pequeno porte. É uma atividade estimulada pelos órgãos governamentais como parte das metas de redução de emissão de gases poluentes. Os consumidores europeus têm adquirido uma crescente participação na geração de energia, proporcionando uma geração energética descentralizada; semi-autonomia energética das residências; segurança energética; diminuição dos impactos ambientais; redução dos gases de efeito estufa; ampliação da economia verde; entre outros. (GIANNINI et al, 2013)

O potencial eólico brasileiro para a geração energética de pequeno porte não é conhecido em sua totalidade nem explorado. O foco das pesquisas é voltado para a geração de grande porte, demonstrado no Atlas do Potencial Eólico Brasileiro e suas contrapartes estaduais identificaram importantes sítios onde a geração eólica de grande porte pode ser explorada. Porém estas pesquisas devem ser analisadas com uma devida cautela se direcionadas a geração de pequeno porte.

O Brasil, se comparado como o resto do mundo, está na vanguarda da geração de energia renovável, graças aos investimentos em hidroelétricas e no etanol. Após a Resolução da ANEEL nº 282/2012 de classificar a fonte eólica como opção de geração descentralizada tem motivado a identificação do potencial de mercado dos aerogeradores de pequeno porte. O Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (Cepel) está realizando pesquisa que contemplará a análise de mercado, análise de viabilidade, visão dos agentes e elementos para o debate. (PEREIRA, et al, 2015)

4. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Caracterizado como atmosfera em movimento, o vento tem sua origem na interação da energia solar e a rotação planetária. Todos os planetas do sistema solar, envoltos por gases, expõem formas de circulação atmosférica apresentando ventos de superfície. Tal interação solar planetário é permanente tendo sua duração na escala de bilhões de anos. O vento tem um grande potencial energético, sendo assim considerado fonte de energia renovável. (AMARANTE et al, 2001)

4.1. ENERGIA EÓLICA

A força dos ventos é utilizada a milhares de anos, deste que se percebeu que ela poderia movimentar certos corpos, utilizando da força aerodinâmica de arrasto sobre placas ou velas, para produzir trabalho, seja na moagem de grãos, elevação de água ou para movimentar barcos.

Os primeiros moinhos de vento eram bastante rudimentares(Figura 3), tendo eixo vertical, devido talvez, a sua facilidade de desenvolvimento e acoplado em edificações, esse tipo de mecanismo tinha como função a moagem de grãos ou elevação de água.

Figura 3: Moinho de vento persa



Fonte: <http://www.look4ward.co.uk/wp-content/uploads/2017/01/The-1000-year-old-windmills-of-Nashtifan.jpg> (visualizado em 15 de julho de 2017)

Segundo BATISTA (2013) os chineses utilizavam moinhos de rotor vertical com velas nas pás para aproveitar a força de arrasto que o vento exercia sobre as velas, com o intuito de elevar água para irrigar os campos de arroz.

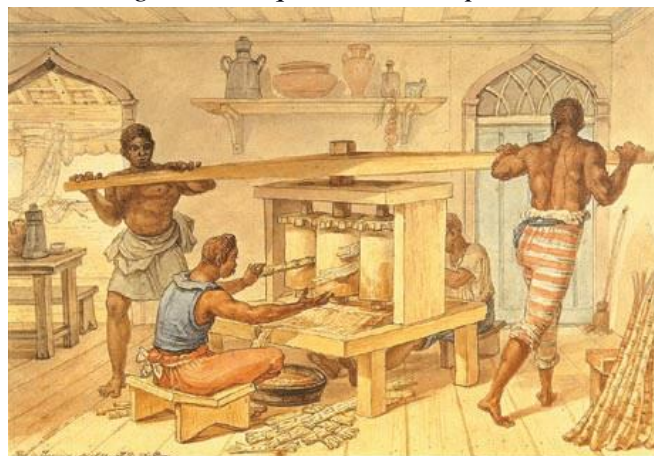
Máquinas eólicas acionadas por força de sustentação, possivelmente, foram introduzidas e disseminadas na Europa pelas Cruzadas no século XI. Contudo é fato que no século XIV, na Holanda, a evolução técnica e de capacidade em potência dessas máquinas eólicas já era amplamente utilizado. (AMARANTE et al, 2010, apud ELDRIDGE, 1980)

Na Holanda, do século XIV, estas máquinas já apresentavam grande evolução tecnológica, capacidade de potência e eram amplamente difundidas como fonte geradora de energia. Nos séculos seguintes houve uma grande expansão na sua utilização, sendo utilizadas na fabricação de papel, na produção de óleos vegetais e até em projetos de drenagem.

Avalia-se que o período escravocrata na colonização da América teve um papel inibidor na migração desta tecnologia para a América (Figura 4).

“Com expansão do uso da máquina a vapor, no século XIX, os moinhos de vento europeus entraram gradualmente em desuso.” (AMARANTE et al, 2010)

Figura 4: Pequena moenda portátil



Fonte: Litografia de Jean-Baptiste Debret (1768-1948)

“No final do século XIX, com o desenvolvimento de sistemas de transformação e distribuição da eletricidade, a energia eólica convertida anteriormente em energia mecânica [...] passou a ser convertida em energia elétrica.” (BATISTA, 2013 apud FREITAS, 2008).

O ressurgimento da aplicação das máquinas eólicas em larga escala deu-se nos EUA, no século XIX, após a abolição da escravatura. Disseminando cata ventos de múltiplas pás para bombeamento d'água em áreas áridas daquele país. Essas máquinas eólicas chegaram a ser produzidas industrialmente em escala de centenas de milhares de

unidade/ano o que possibilitou preços acessíveis e o acesso de grande parte da população a essa tecnologia. (AMARANTE et al. 2001)

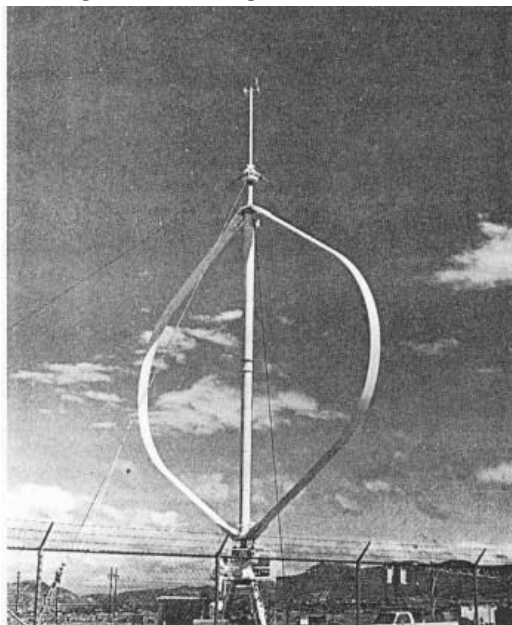
Na Escócia, em 1887, o professor James Blyth, do Colégio de Anderson, Glasgow, desenvolveu o primeiro moinho de vento utilizado para a produção de energia elétrica, numa torre de 10 m de altura montado no jardim de sua casa em Marykirk. A energia gerada carregava acumuladores que serviam para iluminar sua casa de campo. Apesar do evidente sucesso na geração de energia elétrica o invento de Byth não evoluiu, por ser economicamente inviável. (MME, 2014).

Outro moinho de vento projetado e construído para geração de energia foi em Cleveland, Ohio (USA), entre os anos de 1887 e 1888, por Charles F. Brush. Contava com um rotor de 17m de diâmetro, 144 lâminas, sobre uma torre de 18 m de altura para gerar uma potência 12 kW. (MME – Ministério de Minas e Energia, 2014).

Entre os anos de 1891 e 1918, na Dinamarca, foram instalados 100 aerogeradores de rotor horizontal com potência entre 30 kW e 35 kW. (BATISTA, 2013 apud MANWELL 2002)

No ano de 1926, G. J. M. Darrieus desenvolveu e patenteou seus estudos sobre aerogeradores de eixo vertical que faz uso das forças de sustentação exercidas nas pás para propulsão do rotor. Os aerogeradores com essa configuração são nomeados como aerogeradores tipo Darrieus (Figura 5).

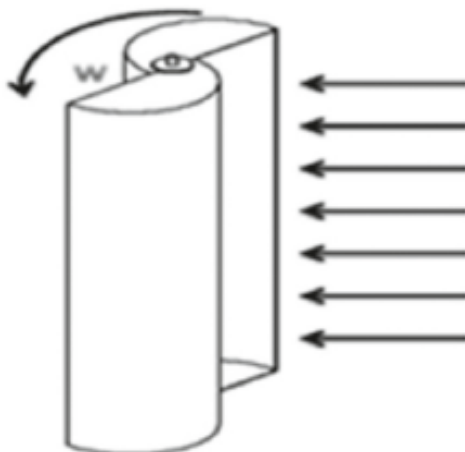
Figura 5: AerogeradorDarrieus



Fonte: <http://www.turbinesinfo.com/wp-content/uploads/2011/07/Darrieus-Wind-Turbine.jpg>
(visualizado em 02 de julho de 2017)

No ano de 1929, S.J. Savonius desenvolve e patenteia seus estudos sobre aerogeradores de eixo vertical. Este aerogerador aproveita as forças de arrasto exercidas nas pás (Figura 6) geralmente côncavas, para propulsão do rotor. Os aerogeradores com essa configuração são nomeados como de aerogeradores tipo Savonius.

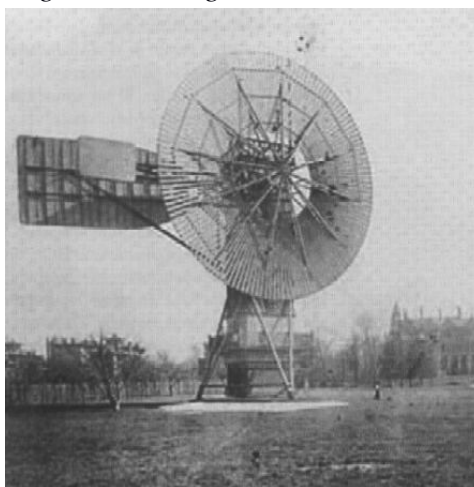
Figura 6: Aerogerador do tipo Savonius



Fonte: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052015000300009 (Visualizado em 15 de Junho de 2017)

O primeiro aerogerador de grande potência foi desenvolvido em 1944, onde gerava acima de 1 MW e ficava no estado de Vermont nos Estados Unidos (Figura 7), e abastecia algo em torno de 1.000 casas. Porém o projeto foi descontinuado devido a problemas de manutenção em tempo de Segunda Guerra Mundial.

Figura 7: Aerogerador em Vermont



Fonte: Ministério de Minas e Energia

A utilização do cata vento de múltiplas pás norte-americano foi disseminado por diversos continentes, inclusive do Brasil. Na década de 1980 encontrava-se instalada quase uma dezena de fabricantes em todo o país. Estima-se que forma produzidos 6 milhões de cata ventos de múltiplas pás em todo o mundo. (AMARANTE et al, 2010 apud ELDRIDGE, 1980)

Para a geração de energia elétrica, nos Estados Unidos, passou-se a utilizar pequenos aerogeradores para carregar baterias, o que facilitou o acesso à energia elétrica dos habitantes do meio rural. Segundo Amarante, et al (2001) “Entre 1930 e 1960, dezenas de milhares desses aerogeradores foram produzidos e instalados nos Estados Unidos, bem como exportados para diversos países.” Ao longo das décadas de 1950 e 1960 a produção desses aerogeradores foi gradualmente desativada, à medida que as redes elétricas passaram a atender o meio rural.

Ao longo do século XX, como visto, foi caracterizado por importantes trabalhos e estudos teóricos e práticos relacionados à conversão de energia eólica em energia elétrica, mas segundo Batista (2013) “sempre acompanhados com pouco interesse por parte da indústria, visto que, as fontes não renováveis eram economicamente e financeiramente mais atrativas”. A crise energética de 1973, que originou num aumento dos preços dos combustíveis fósseis e o crescente medo de sua extinção fizeram com que, ressurgisse o interesse e desenvolvimento de meios renováveis de obtenção energia elétrica, sejam elas eólicas, solares, geotérmicas, biomassas e etc.

A geração de energia elétrica mais próxima aos locais de consumo se torna cada vez mais importante, uma vez que surge a necessidade de uma distribuição mais eficiente, inteligente e que atenda às necessidades sempre crescentes. Os aerogeradores de eixo verticais apresentam uma série de vantagens se comparados aos de eixo horizontais; ocupa menor espaço, menor quantidade de componentes, logo, menor custo de manutenção e de produção, ruídos quase inaudíveis, instalação mais próxima ao solo, baixa vibração e não necessitam de alinhamento com o vento. (BATISTA, 2013)

Segundo Rahmeier (2015), os dinamarqueses investiram em aerogeradores de pequeno porte para geração de energia elétrica, na década de 70. Pequenas e médias empresas que fabricavam maquinário agrícola começaram a desenvolver rotores eólicos de pequeno porte. Esses aerogeradores representavam uma pequena parcela da produção energética daquele país, contudo alguns fazendeiros começaram a formar cooperativas

com o intuito de adquirir esses equipamentos com menor preço, construir plantas maiores, operar em plantas comunitárias e obter uma regulamentação legal de seu governo (Figura 8).

Figura 8: Pequeno Aerogerador dinamarquês



Fonte: Rahmeier, 2015 p. 20

Segundo o Instituto de Desenvolvimento Sustentável de Energias Renováveis, a primeira turbina eólica comercial ligada à rede elétrica pública foi instalada na Dinamarca, no ano de 1976.

Tal pioneirismo deve ser encarado como um bom exemplo de como iniciar, desenvolver e ampliar uma atividade de conversão energética em pequena escala.

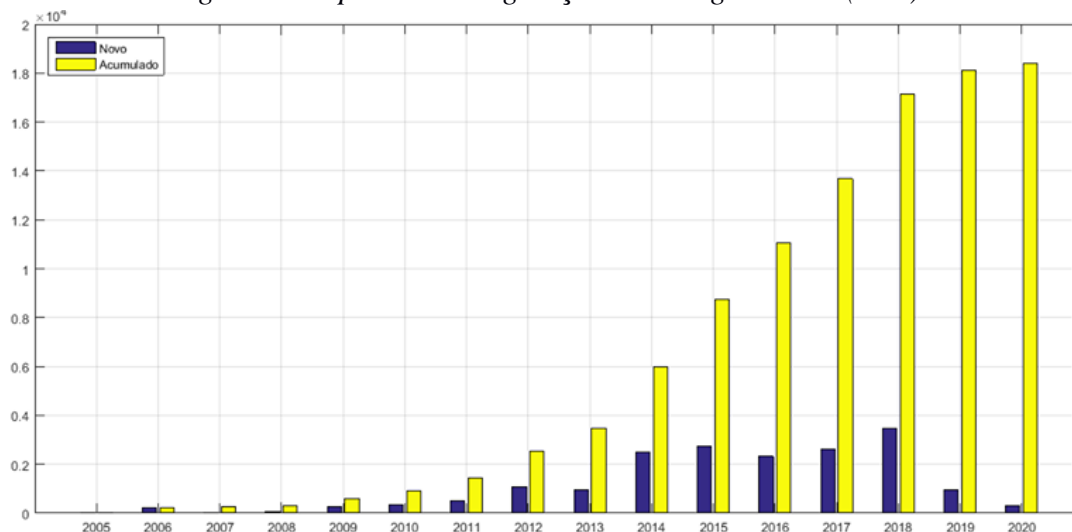
4.2. ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

A geração de energia elétrica através da força dos ventos vem se expandindo de forma acelerada ao longo das últimas duas décadas, atingindo a escala de gigawatts gerados. Um dos limitadores para um crescimento, ainda maior, dos empreendimentos eólicos no Brasil é a falta de dados consistentes e confiáveis, sendo grande parte destes dados mascarados por influências aerodinâmicas de obstáculos, rugosidade e relevo. (FERREIRA JÚNIOR, 2016)

Avanços recentes da capacidade computacional, de simulações baseadas nas leis físicas de interação entre as diversas variáveis meteorológicas, juntamente com os já consolidados bancos de dados meteorológicos e registros anemométricos, torna possível superar barreiras e conhecer o real potencial eólico brasileiro. (AMARANTE, 2001)

O potencial eólico brasileiro, para exploração energética, tem sido objeto de estudo desde a década de 1970 e vem revelando um potencial a ser explorado muito grande. A exploração da energia eólica passou a ter relevância no Brasil no ano de 2006, quando o país atingiu a marca de 235,4 MW de potência instalada e deste então tem crescido (ABEEólica, 2016) (Figura 9).

Figura 9: Capacidade de geração de energia eólica (MW)



Fonte: ABEEólica, 2017

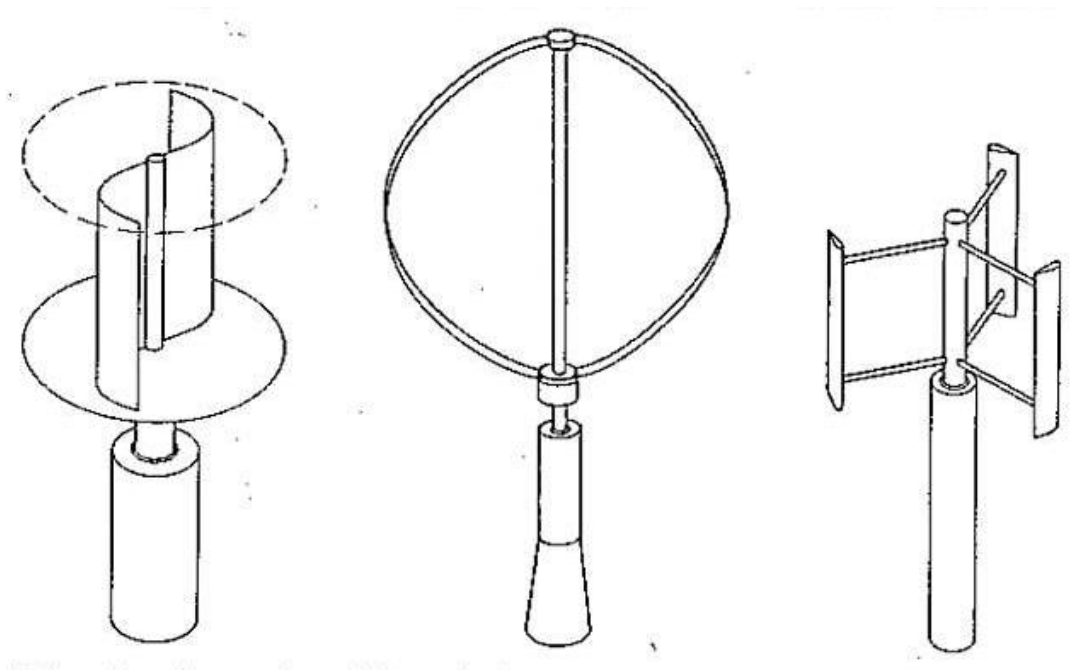
4.3. TIPOS DE TURBINAS EÓLICAS

Quando se começou a fazer o uso da energia eólica, surgiram turbinas de vários tipos, tais como as de eixo horizontal e eixo vertical, com apenas uma pá, com duas e três pás, gerador de indução, gerador síncrono, dentre outras. Com o passar do tempo, foi estabelecido o projeto de turbinas eólicas com as seguintes características: eixo de rotação horizontal, três pás, alinhamento ativo, gerador de indução e estrutura não-flexível.

As principais turbinas eólicas na atualidade são Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal e Turbinas Eólicas de Eixo Vertical. As Turbinas Eólicas de Eixo Vertical são geralmente mais caras que as de eixo horizontal, possuem grande torque a baixa rotação e não se alinham ao vento para um melhor posicionamento, gerando desempenhos inferiores se comparado ao de eixo horizontal. A principal vantagem deste tipo de turbina se dá pela maior facilidade de construção e a possibilidade de seus componentes

mecânicos ficarem no nível do solo, o que simplifica a montagem e possíveis manutenções. (Figura 10)

Figura 10: Tipos de turbina de eixo vertical



Fonte: http://www.iwr.de/wind/tech/bilder/vert_rot.jpg (acesso em 15 de Junho de 2017)

O modelo Savonius foi criado pelo engenheiro finlandês Sigurd J. Savonius em 1922, contendo duas pás em formato de meio cilindro dispostas lado a lado, em posições contrárias e ligadas a um eixo vertical. Essas turbinas são movidas por forças de arrasto causadas pelo ar, girando o eixo central. As turbinas Savonius costumam possuir baixos rendimentos se comparada às outras turbinas.

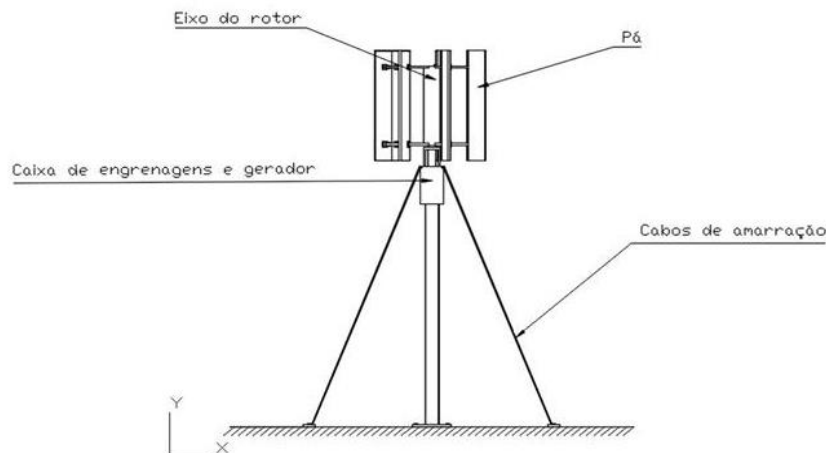
O modelo Darrieus foi desenvolvido pelo francês G. J. M. Darrieus em 1931, sendo formado por duas ou três pás, de perfis aerodinâmicos. A turbina é usada para a geração de energia elétrica e apresenta o maior rendimento entre as turbinas de eixo vertical. Seu funcionamento se dá através das forças de sustentação gerando um alto torque de partida. Esse modelo apresenta variações do perfil que utilizam as pás nas posições verticais.

As Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal são as mais utilizadas e as que conseguem melhores rendimentos. Possuem até três pás e quando possuem mais, são chamadas de aerogeradores de múltiplas pás. O torque no rotor desse tipo de aerogerador é gerado pelas forças de sustentação do ar.

4.4. COMPONENTES DO AEROGERADOR

Os componentes de um aerogerador de eixo vertical são basicamente: Pá, Eixo do rotor, cabos de amarração, caixa de engrenagens, gerador e torre de sustentação. (Figura 11)

Figura 11: Componentes do aerogerador



Fonte: Próprios autores

As pás e o eixo são componentes do rotor. Responsáveis por absorver a parte da energia cinética que passa através da área varrida pelo rotor e transformá-la em energia mecânica. Já caixa de engrenagens transmite ou eleva a rotação do rotor para um gerador elétrico. Usualmente a transmissão tende a elevar a rotação, aumentando assim a potência do gerador que converte essa rotação em eletricidade. A torre de sustentação suporta o peso de todo o sistema.

4.5. FORÇAS AERODINÂMICAS

Ao obstruir o movimento do vento o rotor sofre ação de forças que atuam na direção do escoamento (força de arrasto) e de forças que atuam perpendicularmente ao escoamento (força de sustentação).

A força aerodinâmica de arrasto é uma força que “empurra” as pás, fazendo com que elas girem em torno do rotor. Aerogeradores que aproveitam essa força em seus rotores apresentam uma desvantagem, pois a velocidade do sistema não será maior que a velocidade do vento, fazendo com que sua eficiência seja limitada. (ROCHA, 2008)

Nas asas de um avião, ao decolar, ocorre à atuação de uma força para cima, que tem sentido oposto à força peso. Isso ocorre devido ao formato da asa que tem comprimento diferente na parte superior e na parte inferior, possibilitando que o fluido percorra tais comprimentos com velocidades diferentes. A física explica que o aumento da velocidade do fluido na parte mais longa do perfil (aerofólio) ocasiona em um aumento de pressão dinâmica e uma diminuição da pressão estática, assim resultando uma força. A diferença entre as pressões estáticas é responsável por dar origem a uma força perpendicular ao escoamento do fluido chamada de força de sustentação, ocasionando a elevação do avião, mas no caso das pás de um aerogerador, por terem seu movimento confinado às forças de sustentação ocasionam sua rotação. Os aerogeradores que trabalham sob efeito da força de sustentação conseguem atingir velocidades superiores que as do vento, liberando assim maior potência. (ROCHA, 2008) (IF - UFRGS) (FERREIRA JUNIOR, 2016)

4.6. VANTAGENS DA ENERGIA EÓLICA

A utilização da energia eólica comporta numerosas vantagens face às energias tradicionais e mesmo em comparação com outros tipos de energias renováveis, em função do seu maior desenvolvimento.

O impacto negativo causado pelas grandes aerogeradores é mínimo em relação aos causados pelas indústrias, mineradoras de carvão, hidrelétricas, etc, a saber:

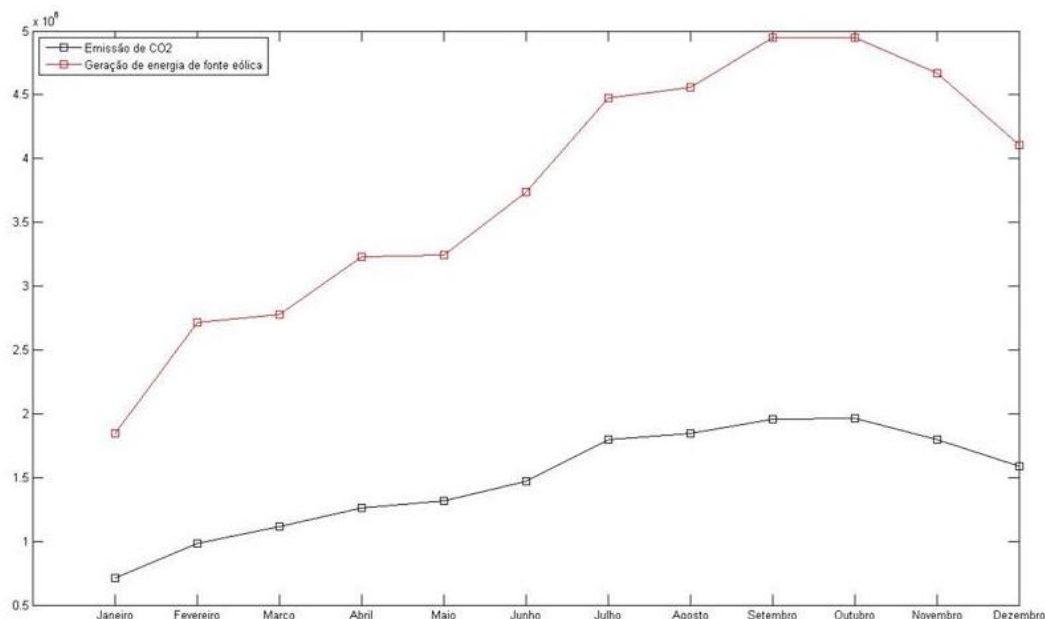
- As usinas eólicas não promovem queima de combustível fóssil, nem geram subprodutos que contaminam o ar, o solo e ou a água;
- Em média cada MW instalado gera 15 postos de trabalho. Atualmente o Brasil tem 10 GW instalado;
- Melhor custo benefício na tarifa de energia;
- É inesgotável;
- Parques eólicos não emitem gases de efeito estufa.

Sendo uma fonte energética com baixíssimo impacto de implantação, a geração eólica não emite CO₂ em sua operação, fazendo dela uma ótima opção para substituir as fontes que emitem gases de efeito estufa. No ano de 2016 foi evitado um total de 17,81

milhões de toneladas de CO₂ em emissões para a atmosfera, o que equivale à emissão anual de cerca de 12 milhões de automóveis.

O gráfico (Figura 12) a seguir demonstra a correlação entre a geração de energia eólica e a quantidade de emissões de CO₂ evitada no ano de 2016.

Figura 12: Correlação entre a geração de energia eólica e as emissões de CO₂ evitadas em 2016



Fonte: ABEEólica

4.7. ENERGIA EÓLICA E A TECNOLOGIA

Atualmente o desenvolvimento tecnológico descobriu outras formas de uso para a força eólica. A mais conhecida e explorada está voltada para a geração energia elétrica. Torna-se cada vez mais viável utilizar turbinas movidas pelo vento para gerar energia elétrica. Isto é possível através de aerogeradores.

Aerogeradores são geradores elétricos associados ao eixo de cata-ventos que convertem a força cinética contida no vento em energia elétrica. A quantidade de energia produzida vai depender de alguns fatores, entre eles a velocidade do vento no local e a capacidade do sistema montado.

4.8. ENERGIA EÓLICA E A SOCIEDADE

A energia eólica é muitas vezes não compreendida pelas populações, principalmente pelas populações mais próximas dos parques eólicos, mas a energia eólica possui inúmeras vantagens para a sociedade em geral, desde a redução da dependência dos combustíveis fósseis até a criação de empregos, a saber:

- Fonte de energia inesgotável;
- Pouca manutenção;
- Com a tendência de redução nos custos de produção de energia eólica, e com o aumento da escala de produção, deve se tornar uma das fontes de energia mais baratas;
- Criação de emprego;
- Geração de investimento em zonas desfavorecidas;
- Benefícios financeiros (arrendamentos).

4.9. ENERGIA EÓLICA E A CIÊNCIA

O vento possui um grande potencial energético, sendo um bom presságio para os defensores das fontes limpas de energia. A matriz eólica, como a solar, suscita esperanças na luta contra o aquecimento global.

O pesquisador do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), Ênio Bueno, especialista em energia eólica, pondera que o estudo leva em conta apenas o potencial de aproveitamento dos ventos para geração de energia. “Seria preciso considerar também a viabilidade técnica em cada local e a viabilidade financeira”, aponta. “Isso reduz muito a previsão dos pesquisadores.” Estudo dos técnicos do Inpe, mostra que os ventos brasileiros podem atender mais de 60% do consumo nacional de energia de forma competitiva. Com o barateamento progressivo da tecnologia, o percentual deve aumentar. Segundo a ABEEólica(2015) “6,8% da energia consumida no país é gerada por ventos, o que é como se toda a população do sul do país tivesse sido abastecida com energia eólica”.

4.10. DESVANTAGENS DA ENERGIA EÓLICA

Apesar das aparentes vantagens no uso de energia eólica para a produção de energia elétrica, este tipo de aproveitamento energético eólico apresenta também desvantagens e impactos significativos principalmente no uso de grandes aerogeradores, parques e usinas eólicas.

Esta fonte de energética causa alguns impactos no ambiente, devido a uma série de fatores, como o de ocuparem grandes extensões territoriais, com imensos aerogeradores instalados.

Em um parque eólico as turbinas precisam resguardar determinadas distâncias uma das outras de modo a não ocorrer problemas causados no escoamento do vento. Mas, vale acrescentar que já existem sugestões para reaproveitamento deste imenso espaço. Como por exemplo, o uso para atividade agrícola.

Uma reclamação é quanto aos ruídos emitidos pelas turbinas em um parque eólico. Devido a isto, não podem ser instalados muito próximos às áreas residenciais. O som é audível e atinge decibéis que podem perturbar, causando poluição sonora. É causado pelo movimento das hélices em contato com o fluxo de ar e pelos mecanismos dos aerogeradores. As habitações mais próximas deverão estar no mínimo a 200 metros de distância das turbinas.

As imensas hélices provocam certas sombras e reflexos que não são bem-vindos em áreas residenciais. Além disso, as estruturas interferem na estética das paisagens naturais.

Em sítios ou parques eólicos ocorrem grande mortandade de aves. Estes animais não conseguem visualizar as pás em movimento. Em seu vôo eles acabam colidindo nas turbinas e morrendo.

Quando há por perto receptores e transmissores de ondas de rádio, TV e micro-ondas, as hélices refletem parte da radiação eletromagnética. Desta forma a onda refletida atrapalha o sinal destes dispositivos.

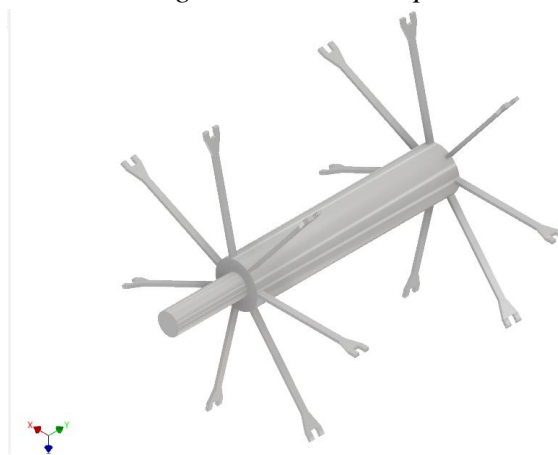
5. METODOLOGIA

5.1. MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS

Ao longo do desenvolvimento do trabalho foram utilizadas somente as dimensões nominais, a fim de facilitar os cálculos e a confecção da modelagem. Contudo no item 6.5 estão todos os ajustes e tolerâncias adotados para o projeto.

Para a modelagem 3D no *software* Inventor optou-se por dividir o aerogerador em três partes, o eixo e as hastes em uma peça só para evitar problemas na montagem (Figura 13), a pá (Figura 14), e o suporte (Figura 15), que inclui a torre, os cabos e a blindagem do gerador. A montagem completa do aerogerador pode ser vista na figura 16.

Figura 13: Eixo completo



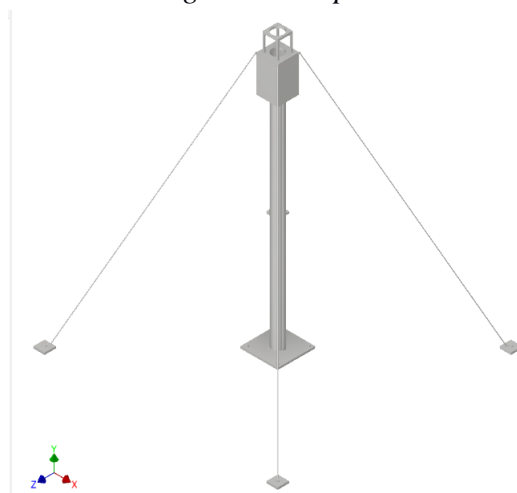
Fonte: Próprios autores

Figura 14: Pá



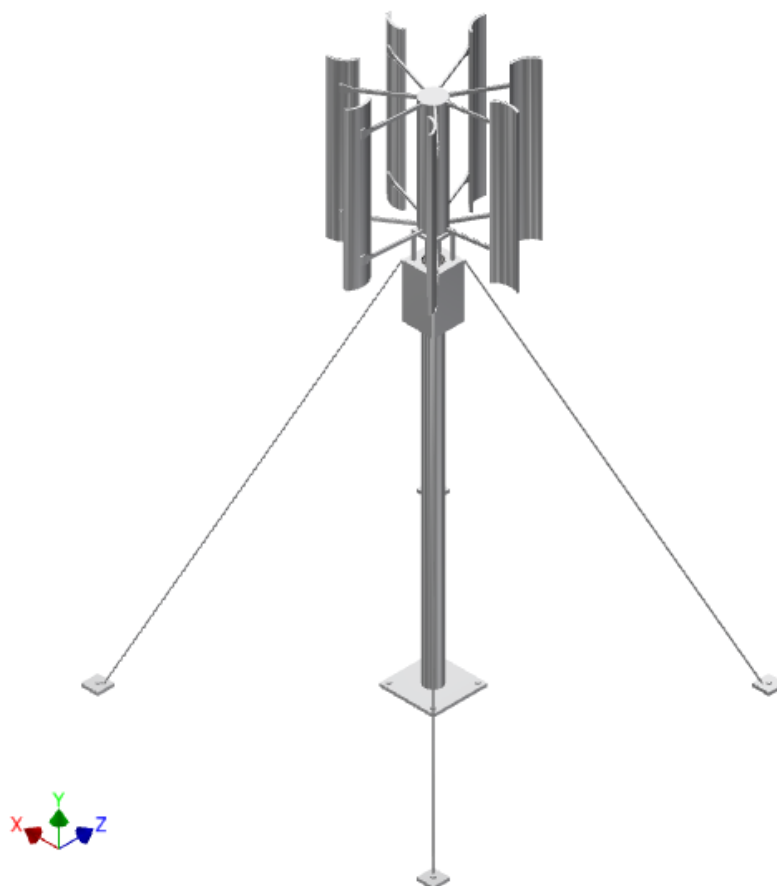
Fonte: Próprios autores

Figura 15: Suporte



Fonte: Próprios autores

Figura 16: Aerogerador montado

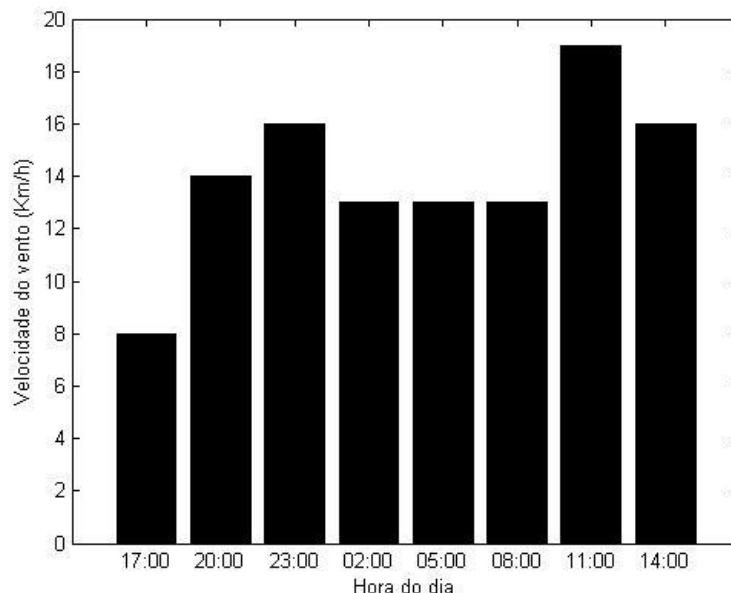


Fonte: Próprios autores

Para determinar a velocidade do vento adotada para simulação foram utilizados dados meteorológicos tratados estatisticamente para proporcionar resultados mais realísticos tendo como base os dados de velocidade de vento indicados para a cidade de

Arcos – MG no dia 18/05/2017 às 16:00 horas (Figura 17). As direções não foram consideradas porque os modelos de aerogerador vertical não são influenciados pela direção do vento.

Figura 17: Gráfico das velocidades de vento



Fonte: Próprios autores

A partir dos dados acima que representam a velocidade dos ventos a cada três horas foi possível calcular a velocidade média ao longo do dia. (Equação completa vide Anexo 1).

$$V_m = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n} = 3,9 \text{ m/s} \quad (1)$$

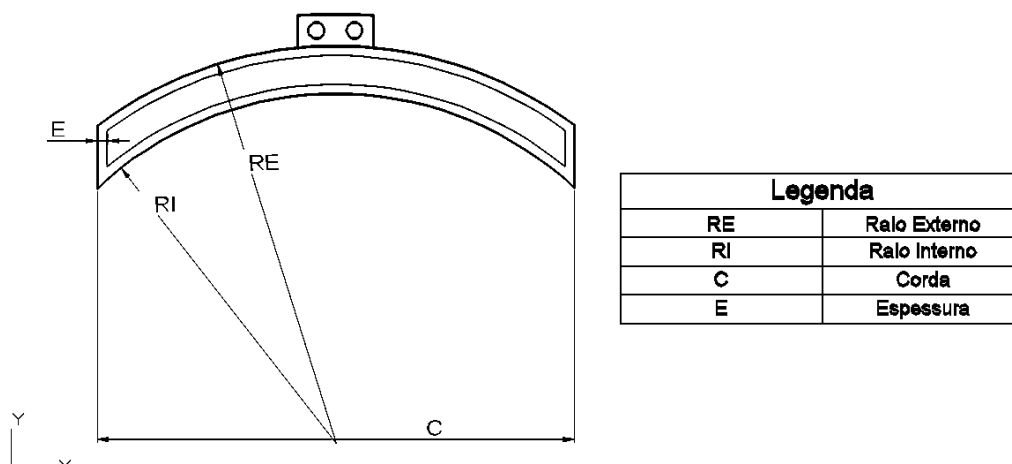
Para que o aerogerador seja funcional é necessário se fazer uma série de cálculos e análises, nas quais será utilizado o valor de velocidade do vento obtido. Faz-se necessária uma análise das forças que agem no sistema. Para este projeto não serão detalhadas e calculadas as forças dissipativas que atuam no sistema por uma questão de falta de conhecimento das ferramentas necessárias para tal, mas há o conhecimento de que elas existem e influenciam no funcionamento do aerogerador.

A principal força dissipativa que atua no sistema é à força de atrito, proveniente do contato com os rolamentos e com o gerador ou sistema de transmissão utilizado. Para que o rotor gire com velocidades de vento menores e por conseguinte torne o aerogerador mais eficiente é preciso reduzir a ação da força de atrito que retarda

o movimento do rotor. Como ela é uma força de reação que está diretamente ligada ao peso do corpo, uma forma de amenizar sua ação é reduzir a massa do rotor, mas primeiro é preciso determiná-la, processo que é descrito a seguir:

Primeiramente é necessário definir o volume do rotor. Para facilitar os cálculos será dividido por peças, a começar pelo volume das pás, que possuem um raio interno de 110 mm e externo de 125 mm e de corda 150 mm (Figura 18). Inicialmente foram definidas como sendo sólidas, mas para reduzir a massa total do rotor foram alteradas para ocas, com 3 mm de espessura. Para obter o volume da pá é necessário determinar a área da superfície superior.

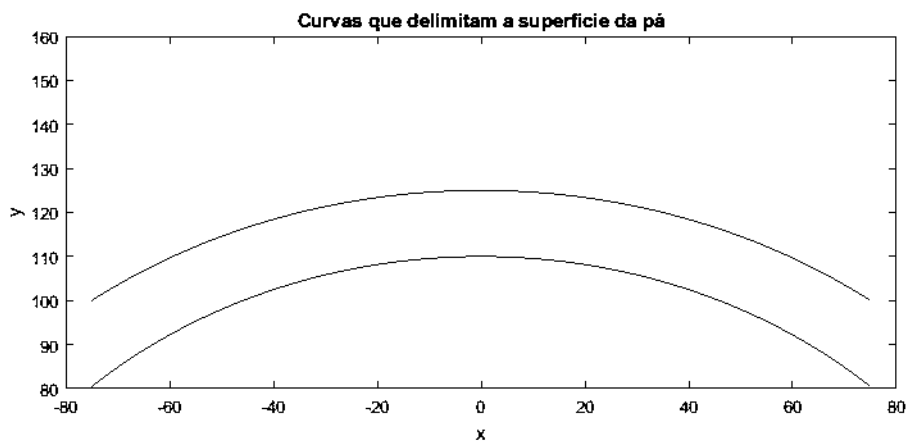
Figura 18: Representação superior da pá



Fonte: Próprios autores.

Para tal foi utilizado o conceito de integral definida para cálculo de área entre duas curvas. (Figura 19)

Figura 19: Curvas que delimitam a pá



Fonte: Próprios autores

A área da região limitada pelas curvas $y = f(x)$, $y = g(x)$ e pelas retas $x = a$, $x = b$, onde f e g são contínuas e $f(x) \geq g(x)$ para todo x em $[a, b]$, é dado pela função (2). (STEWART, 2013)

$$A = \int_a^b [f(x) - g(x)]dx \quad (2)$$

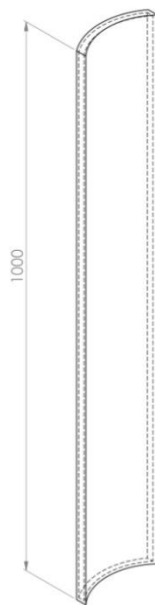
A partir dos raios das duas curvas é possível determinar a equação das circunferências e a distância entre as retas que às limitam representam os limites de integração que fazem com que a área da superfície da pá seja dada pela função (3).

$$A = \int_{-75}^{75} \sqrt{125^2 - x^2} - \sqrt{110^2 - x^2} dx \quad (3)$$

O desenvolvimento da integral e o algoritmo desenvolvido para cálculo de área entre duas circunferências limitadas por duas retas se encontram nos Anexos 8 e 10.

Utilizando o *software* Matlab a área da superfície da pá foi determinada em $2,44 \times 10^{-3} m^2$, como sua altura corresponde a 1 m (1000 mm) (Figura 20).

Figura 20: Vista isométrica da pá



Fonte: Próprios autores

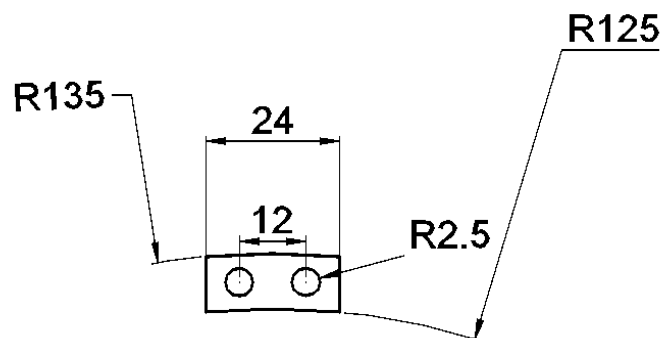
Temos que seu volume externo é de $2,44 \times 10^{-3} m^3$. Para calcular o volume interno a ser subtraído desse valor é necessário refazer os cálculos reduzindo a espessura de 3mm em cada dimensão, usando a função (4):

$$A = \int_{-72}^{72} \sqrt{122^2 - x^2} - \sqrt{113^2 - x^2} dx \quad (4)$$

Com resolução análoga à anterior e com altura de 0,994 m, resultando em $1,39 \times 10^{-3} m^3$, o volume total da pá é dado pelo volume externo subtraído o volume interno, com um total de $1,05 \times 10^{-3} m^3$. Porém, esse volume não leva em consideração os olhais nas pás que se prendem nos braços do eixo do rotor. Os olhais têm formato similar ao das pás diferindo apenas em escala e na presença de dois furos para fixação, dessa forma sua área e volume podem ser calculados de forma análoga às pás.

Cada pá possui dois olhais (Figura 21) para encaixe no eixo, cada olhal tem 24mm de comprimento entre duas circunferências de 135mm e 125mm de raio respectivamente, e em cada olhal há dois furos de 2,5mm de raio para inserção de parafusos ou pinos.

Figura 21: Representação do olhal



Fonte – Próprios autores.

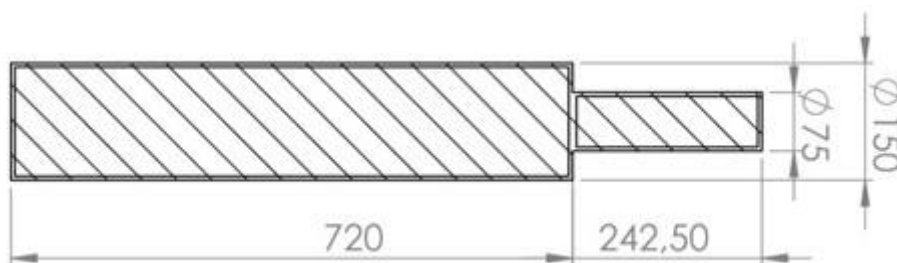
Para determinar o volume do olhal foi utilizado um método similar ao usado com as pás, descrito pela equação 5:

$$A = \int_{-12}^{12} \sqrt{135^2 - x^2} - \sqrt{125^2 - x^2} dx \quad (5)$$

Dessa forma se obteve a área da superfície do olhal como sendo $2,01 \times 10^{-4} m^2$. Tendo uma altura de 20 mm se determinou seu volume: $4.02 \times 10^{-6} m^3$.

Após obter o volume das pás e dos olhais resta calcular o volume dos eixos principal e inferior (Figura 22), além dos braços que sustentam as pás. O volume dos eixos (Figura 23) é facilmente obtido através das fórmulas de volume de cilindros, sendo que o eixo principal tem 150 mm de diâmetro e 720 mm de comprimento e o eixo inferior 75 mm de diâmetro e 242.5 mm de comprimento, ambos são ocos com 5 mm de espessura. Essas dimensões foram definidas para reduzir a massa do rotor e assim facilitar seu movimento. O valor do volume para os dois eixos foi de $9 \times 10^{-3} m^3$.

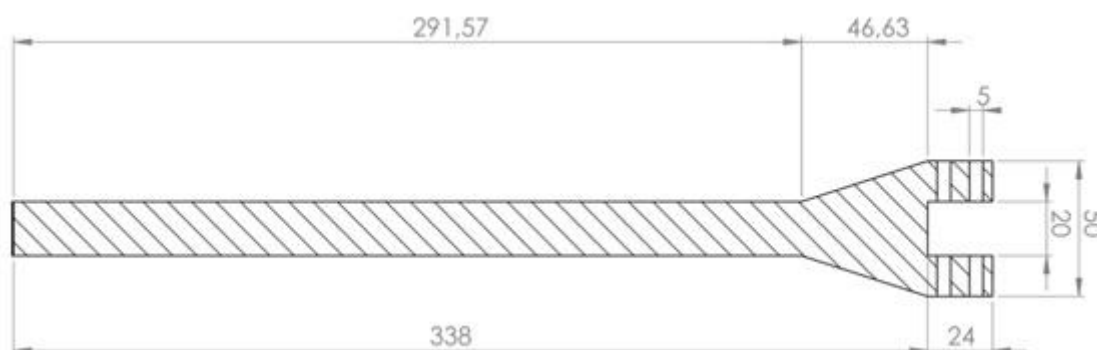
Figura 22: Vista em corte do eixo



Fonte: Próprios autores

Para obter o volume da haste (Figura 23) são necessárias três etapas, (1) calcular o volume do braço que liga o encaixe ao eixo, (2) o volume dos olhais, que são similares aos suportes, (3) e o volume da ligação entre o braço e os olhais. Os procedimentos foram feitos no *software* MATLAB e estão descritos nos anexos 14 e 15.

Figura 23: Vista seccionada da haste de suporte das pás



Fonte: Próprios autores

Resultando num total de $8,099 \times 10^{-5} m^3$

Após determinar o volume de cada uma das partes separadamente, foi obtido o volume total do rotor através da soma dos volumes das 7 pás, dos 14 braços e suportes, e dos eixos, resultando em $0.0106678 m^3$.

O material de construção escolhido para a construção do rotor foi definido como sendo alumínio 6061 devido à leveza e a durabilidade, este material apresenta uma densidade de $2700 kg/m^3$.

A partir do volume do rotor e da densidade do material é obtida a massa do rotor, equivalente a 28.803 kg, sendo que com o eixo central e as pás maciças a massa total seria aproximadamente 100kg.

Considerando a aceleração da gravidade como $9.81 m/s^2$ pode-se definir o peso do rotor 282.559 N que será dividido igualmente entre os dois rolamentos que sustentam o rotor. Foi optado por utilizar dois rolamentos para proporcionar estabilidade vertical e reduzir a vibração do rotor, dispensando assim cabos estabilizadores no topo do mesmo.

A obtenção do volume e da massa do rotor pelo método que foi utilizado foi de suma importância na modelagem do mesmo, por possibilitar identificar os erros de construção e de importação, por exemplo, ao importar a montagem do rotor do Inventor para o SolidWorks houve uma alteração no volume e na massa que só pode ser notada devido à comparação com os dados que foram definidos previamente.

5.2. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

1. Matlab 7.12.0 (R2011a)
2. Autodesk Inventor 2017
3. Solidworks 2017

6. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

6.1. FORÇAS APLICADAS AO SISTEMA

Para quantificar a força resultante da ação do vento no topo do aerogerador foi necessário calcular a força incidente sobre cada pá e depois somar todas as forças. Para isso utilizou-se uma equação desenvolvida com a orientação do professor Reginaldo:

Equação de torque: (NUSSENZVEIG, 2002)

$$\tau = I \cdot \alpha \quad (6)$$

Onde I é o momento de inércia e α é a aceleração angular.

$$\tau = F \cdot r \cdot \sin \theta \quad (7)$$

Onde F é a força aplicada, r é o raio e θ é o ângulo de incidência da força.

Substituindo (6) em (7) temos:

$$F \cdot r \cdot \sin \theta = I \cdot \alpha$$

Como o interesse é obter a força resultante se manipula a equação, colocando F em evidência:

$$F = I \cdot \alpha \cdot \frac{1}{r \cdot \sin \theta}$$

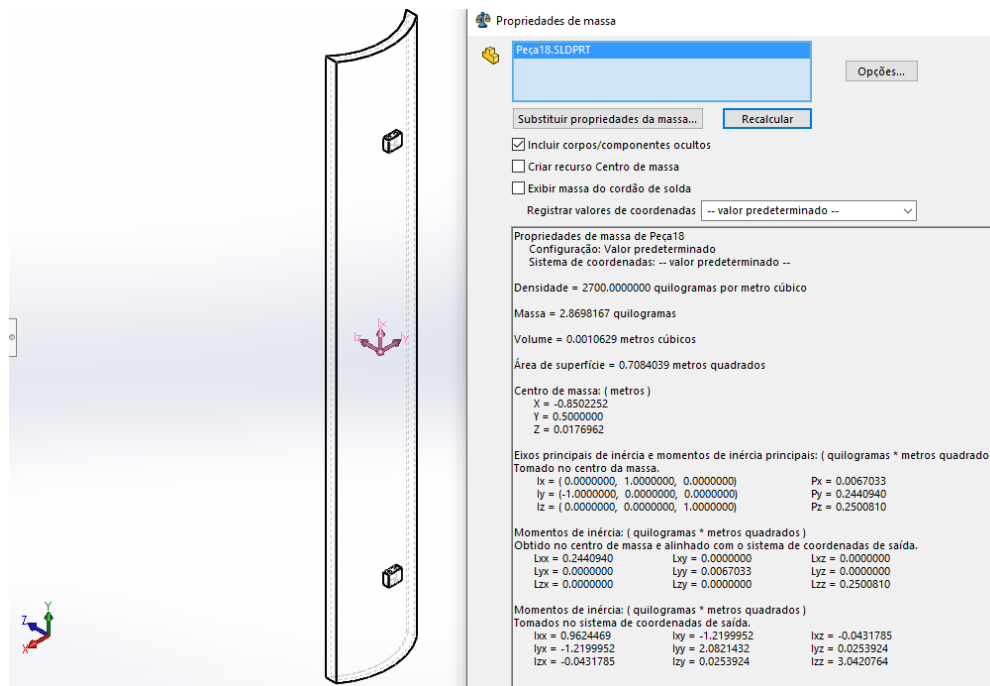
Assim a Força resultante F_r é dada pelo somatório das forças incidentes sobre cada pá:

$$F_R = \sum \left[I \cdot \alpha \cdot \frac{1}{r \cdot \sin \theta} \right] \quad (8)$$

Onde I é o momento de inércia da pá, que é igual para todas, α é a aceleração angular, e θ é o ângulo formado entre a pá e a direção do vento.

O momento de inércia foi obtido computacionalmente através do *software* SOLIDWORKS (Figura 24).

Figura 24: Momento de inércia da pá



Fonte: Próprios autores

Para o relatório de propriedades de massa completo vide anexo17.

Momentos de inércia: (quilogramas · metros quadrados)

Tomados no sistema de coordenadas de saída.

$$I = \begin{bmatrix} 0,962 & -1,220 & -0,043 \\ -1,220 & 2,082 & 0,025 \\ -0,043 & 0,025 & 3,042 \end{bmatrix}$$

Os elementos da diagonal da matriz representam os momentos de inércia em relação à rotação em torno de cada eixo.

$$I_X = 0.962 \quad I_Y = 2,082 \quad I_Z = 3,042$$

Como só haverá rotação em torno do eixo do rotor (localizado no eixo y) somente um dos momentos de inércia é relevante ao cálculo de forças.

$$I_Y = 2,082 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Para a aceleração angular são necessárias algumas observações. Como este projeto não busca proporcionar todos os dados necessários para a construção de um aerogerador, mas sim criar um modelo tridimensional computacionalmente e simular seu funcionamento, algumas simplificações foram feitas. Foi definido que a velocidade do vento seria considerada constante, que as forças dissipativas não seriam consideradas dadas as complicações que poderiam representar, além de adotar que o rotor irá adquirir uma velocidade tangencial constante e igual à velocidade do vento. Mesmo sabendo que essas simplificações impedem que os resultados sejam realísticos elas se fazem necessárias no contexto do desenvolvimento do projeto.

A velocidade do vento e a velocidade linear final do rotor utilizada para análise de forças foi considerada a máxima que pode incidir no sistema, aproximadamente 21m/s, determinada pela escala Beaufort. A partir disso, e dos conhecimentos de movimento circular. É possível determinar a aceleração angular que se dá do momento inicial até o sistema alcançar sua velocidade final.

A velocidade angular final é obtida pela equação (NUSSENZVEIG, 2002):

$$V = \omega \cdot r$$

onde V é a velocidade linear, ω é a velocidade angular e r é o raio. O raio do rotor é 0,5m. Portanto:

$$21 = \omega \cdot 0,5 \quad \therefore \quad \omega = \frac{21}{0,5} = 42 \text{ rad/s}$$

A aceleração angular é dada por: (NUSSENZVEIG, 2002)

$$\omega = \omega_0 + \alpha \cdot t$$

Onde ω é a velocidade angular, α é a aceleração angular e t é o tempo.

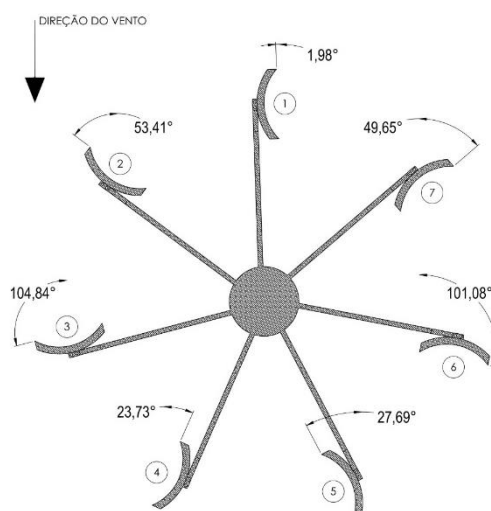
$$42 = 0 + \alpha \cdot t$$

Inicialmente será considerado o tempo de 20 segundos (definido arbitrariamente) como o tempo que o rotor leva para atingir sua velocidade angular final partindo do repouso.

$$42 = 20 \cdot \alpha \therefore \alpha = \frac{42}{20} = 2,1 \text{ rad/s}^2$$

Para completar os dados necessários para calcular a força nas pás restam somente os ângulos de incidência sobre cada pá. Para tal se definiu a condição inicial do sistema descrita pela (Figura 25).

Figura 25: Ângulos de incidência sobre cada pá



Fonte: Próprios autores

Definidas as condições iniciais foi desenvolvido um algoritmo para calcular a força exercida sobre cada pá e a força resultante (Anexo 18). Os resultados são descritos na Tabela 1:

Tabela 1: Ângulos de incidência do vento

Pá	1	2	3	4	5	6	7
Ângulo	1,98°	53,41°	104,84°	23,73°	27,64°	101,08°	49,65°
Força exercida na pá (N)	253,107	10,891	9,047	21,731	18,850	8,911	11,475

Fonte: Próprios autores

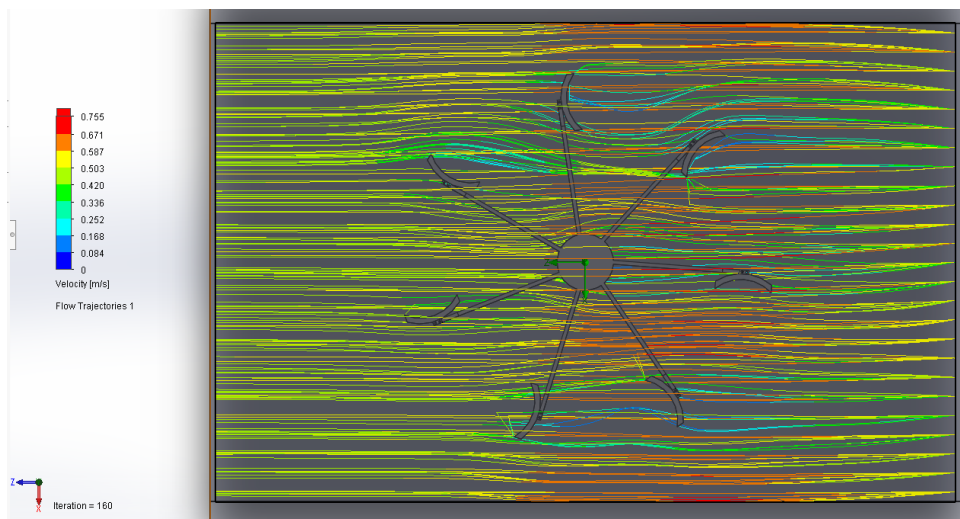
$$F_R = \sum \left[I \cdot \alpha \cdot \frac{1}{r \cdot \sin\theta} \right]$$

$$F_r = 334,012N$$

A princípio foi feita uma simulação de fluido realizada através do *software* SolidWorks, pela qual é possível observar que a incidência dos ventos sobre cada pá não é exatamente como será tratado nos cálculos realizados ao longo do desenvolvimento do presente trabalho, porém o modelo adotado considera a força máxima para a velocidade definida, uma vez que leva em conta um fluxo direto de vento.

Uma análise do comportamento do rotor seria realizada, a partir de simulações de escoamento de fluido ao incidir sobre o mesmo. Chegou-se a fazer tais simulações no *software* SolidWorks, entretanto, por falta de embasamento teórico suficiente foi decidido deixar essas análises referentes à mecânica dos fluidos para uma continuação do projeto num momento futuro (Figura 26).

Figura 26: Análise de escoamento de fluido



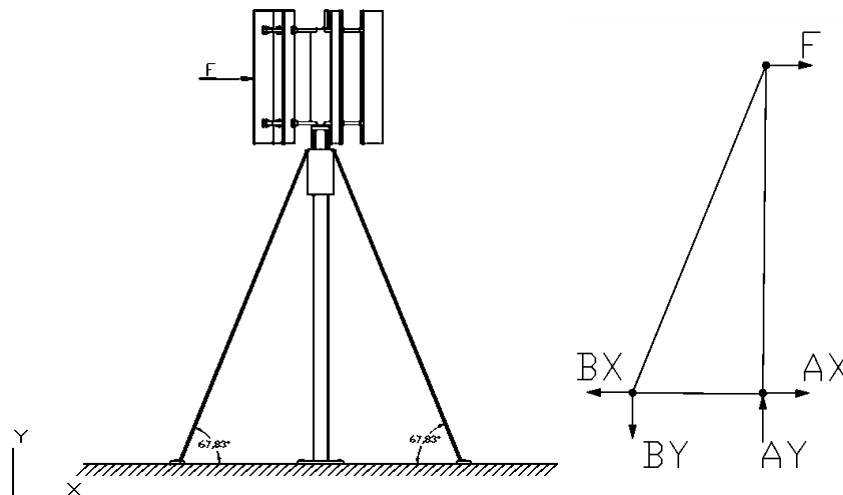
Fonte: Próprios autores

6.2. CÁLCULO DE TENSÃO NOS CABOS DE SUSTENTAÇÃO

A partir do valor obtido na equação (8) é possível determinar as tensões que irão incidir sobre os cabos. A simetria radial do aerogerador faz com que a direção do vento não interfira na força incidente sobre o sistema. Para o dimensionamento será

considerado o pior caso possível, onde toda a força lateral derivada do vento atuará apenas em um cabo. Por incidir na direção do mesmo, o cabo oposto a ele não sofrerá compressão por ser flexível, e os dois restantes estarão dispostos ortogonalmente à força e não influenciarão no sistema. O ângulo formado entre os cabos e a superfície foi definido inicialmente como sendo $67,83^\circ$ (Figura 27).

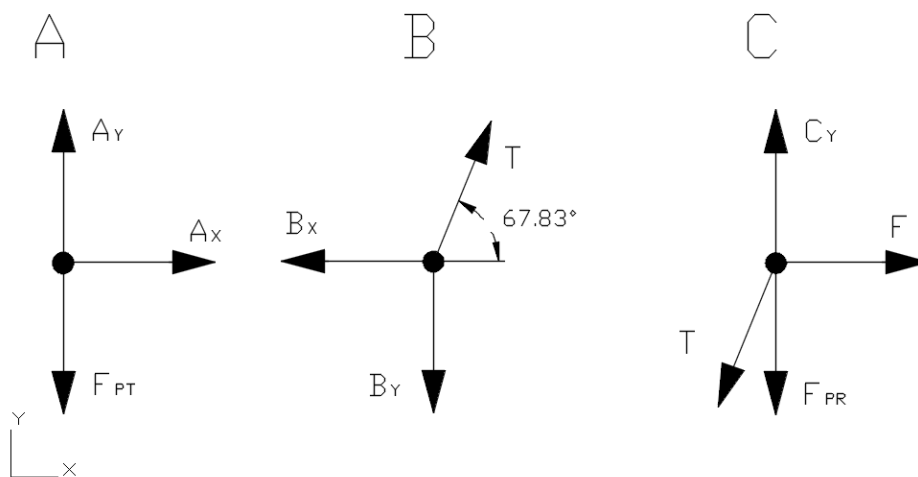
Figura 27: Disposição dos cabos de tensão



Fonte: Próprios autores

onde o segmento \overline{CA} representa a torre, incluindo a blindagem do gerador, e o segmento \overline{CB} representa o cabo, os pontos A, B e C indicam os nós (Figura 28) em que serão feitas as análises de forças para simplificação dos cálculos. (VALIENTE, 2015)

Figura 28: Forças atuantes nos nós



Fonte: Próprios autores

O modelo adotado considera que não há ligação entre os nós B e A, ambos são fixos, e as forças de reação equilibram as forças no sentido positivo do eixo y, fazendo com que a base não se movimente verticalmente.

No nó A atuam três forças: a força peso da torre F_{PT} e as forças de reação com a superfície A_Y e A_X .

No nó B atuam três forças: a tração T do cabo, e as forças de reação com a superfície B_Y e B_X .

No nó C atuam quatro forças: a força externa F causada pelo vento, a tração T do cabo, a força peso do rotor F_{PR} e a força de reação com a superfície C_Y .

A partir das forças atuantes em cada nó é possível montar as equações de equilíbrio de cada um. (VALIENTE, 2015)

$$\text{Nó A: } \begin{cases} \sum F_x = A_X \\ \sum F_y = 0 \Rightarrow -F_{PT} + A_Y = 0 \end{cases}$$

$$\text{Nó B: } \begin{cases} \sum F_x = 0 \Rightarrow -B_X + \cos \theta \cdot T = 0 \\ \sum F_y = 0 \Rightarrow -B_Y + \text{sen } \theta \cdot T = 0 \end{cases}$$

$$\text{Nó C: } \begin{cases} \sum F_x = 0 \Rightarrow F - \cos \theta \cdot T = 0 \\ \sum F_y = 0 \Rightarrow -F_{PR} - \text{sen } \theta \cdot T + C_Y = 0 \end{cases}$$

Substituindo os valores de F, F_{PR} e θ :

$$\begin{cases} A_X = 0 \\ -F_{PT} + A_Y = 0 \\ -B_X + \cos(67,83^\circ) T = 0 \\ -B_Y + \text{sen}(67,83^\circ) T = 0 \\ 334,01 - \cos(67,83^\circ) T = 0 \\ -282,56 - \text{sen}(67,83^\circ) T + C_Y = 0 \end{cases}$$

Montando a matriz:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -0,3774 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0,9261 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -0,9261 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,3774 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_X \\ A_Y \\ B_X \\ B_Y \\ C_Y \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ F_{PT} \\ 0 \\ 0 \\ 282,56 \\ 334,01 \end{bmatrix}$$

A partir da matriz é possível demonstrar que as forças de reação são numericamente iguais às de ação, e também é possível determinar a tração T .

$$0,3774 \cdot T = 334,01 \Rightarrow T = 885,029 \text{ N}$$

Substituindo o valor de T na matriz obtém-se as outras forças:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_X \\ A_Y \\ B_X \\ B_Y \\ C_Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ F_{PT} \\ 334,01 \\ -819,62 \\ 1102,185 \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} A_X = 0 \\ A_Y = F_{PT} \\ B_X = 334,01 \text{ N} \\ B_Y = -819,62 \text{ N} \\ C_Y = 1102,185 \text{ N} \end{cases}$$

Conhecida a tração no fio quando a força do vento atinge seu valor máximo se torna possível dimensionar os cabos de estabilização. Para tal será utilizada a equação (BAÊTA, SARTOR; 1999):

$$\sigma = \frac{T}{A} \quad (9)$$

onde σ representa a tensão, T a tração e A a área da secção transversal.

Para o dimensionamento do primeiro cabo, é necessário definir seu material. A partir de uma tabela de propriedades mecânicas de alguns materiais foi decidido utilizar o Aço 1010 (Laminado a quente) que possui tensão última (Ruptura) de tração equivalente à 330 MPa. Porém por uma questão de segurança não se utiliza a tensão de ruptura para os cálculos, utiliza-se apenas uma parcela (Tensão admissível), para que haja uma margem para variação sem que ocorra danos à estrutura. A tensão que será utilizada é definida pela equação:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{rup}}{F.S.} \quad (6)$$

Onde σ_{adm} é a tensão admissível, σ_{rup} é a tensão de ruptura e F.S. é o fator de segurança.

Devido às possíveis variações de velocidade e por consequência de força do vento o fator de segurança utilizado para os cabos será 2, o que permite que o sistema suporte até duas vezes a força considerada anteriormente.

Substituindo os valores de F.S. e de σ_{rup} na equação 6:

$$\sigma_{adm} = \frac{330}{2} = 165 \text{ MPa}$$

Ou seja, a tensão admissível que será utilizada para dimensionamento dos cabos é de 165 MPa. ($165 \times 10^6 \text{ Pa}$)

Atribuindo os valores de σ_{adm} e T na equação 5:

$$165 \times 10^6 \text{ Pa} = \frac{885,029 \text{ N}}{A}$$

$$A = \frac{885,029}{165000000} = 5,3638 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

Como os cabos são maciços e tem formato cilíndrico, sua seção transversal é um círculo e a respectiva área é dada por:

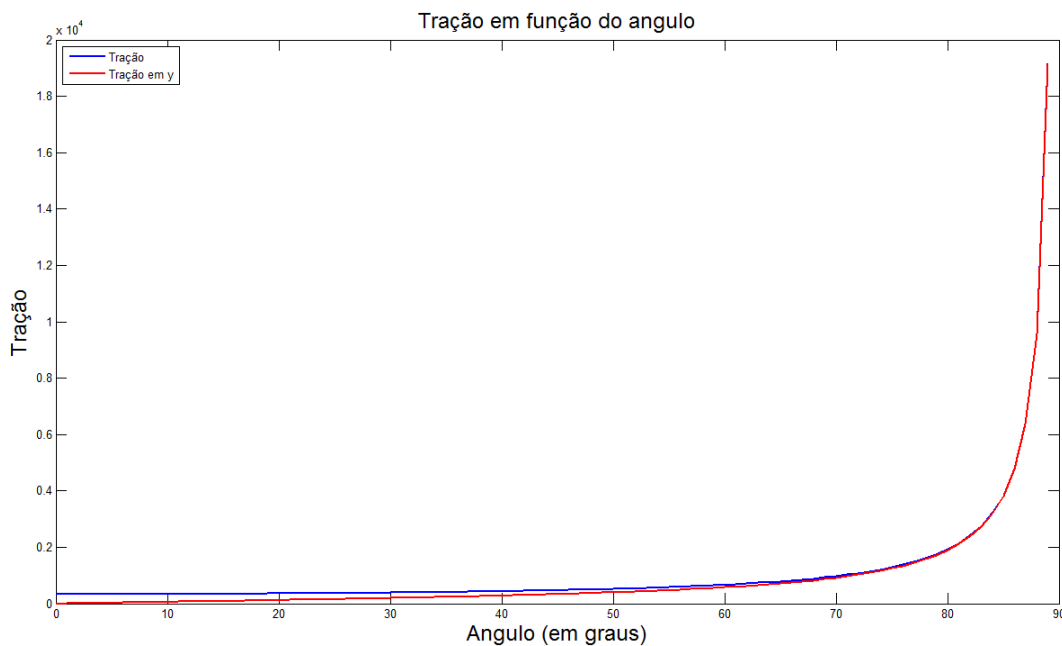
$$A = \pi \cdot r^2$$

$$r = 0,0013067 \text{ m}$$

Dessa forma, o raio mínimo do cabo é de 0,0013 m, (Equivalente a 1,3 mm) para manter em equilíbrio o sistema com uma força lateral proporcionada por ventos de 21 m/s. Um cabo com essa espessura pode ser considerado desprezível comparado com as dimensões do aerogerador. Considerando que esse valor de raio obtido levou em conta um fator de segurança expressivo e a velocidade de vento admitida como máxima é pouco comum em baixas altitudes pode-se concluir que o aerogerador poderia ser construído sem cabos estabilizadores, conforme as condições de vento do local e a altura da torre.

Como a única função dos cabos é proporcionar estabilidade horizontal ao sistema, devido às forças verticais serem equilibradas pela torre, os melhores ângulos são os mais próximos de zero, por direcionarem melhor a tração para o eixo x, onde incide a força do vento. Utilizando o *software* MatLab foi possível determinar o comportamento da tração no cabo quando se modifica o ângulo entre o cabo e a superfície (Considerando uma força de 334,01 N incidente no topo da torre) (Figura 29).

Figura 29: Gráfico da tração em função do ângulo



Fonte: Próprios autores

Com base no gráfico foi verificado que variações no ângulo não representariam grandes modificações na intensidade da tração no cabo e, por conseguinte não iriam interferir de forma significativa no raio mínimo do cabo. Porém reduzir o ângulo faria com que a base se distanciasse da torre, aumentando a área ocupada pelo aerogerador e aumentando o comprimento do cabo. Considerando a relevância do cabo no sistema, os custos de uma modificação no ângulo seriam mais expressivos do que os ganhos estruturais, fazendo com que não seja interessante modificar o ângulo nem o modelo construído.

6.3. ANÁLISE DO MOVIMENTO DO ROTOR

O gerador e o sistema de transmissão que serão implementados ao rotor para o uso efetivo do aerogerador e não serão especificados, porque variam conforme o local onde é instalado. Porém devido à velocidade do vento será feita uma análise do movimento do rotor que permitirá determinar a potência que o mesmo produz na velocidade previamente estipulada.

Como já foi determinado e calculado anteriormente, a velocidade linear do rotor será de considerada 3,9 m/s, a velocidade angular, a aceleração angular e o tempo de aceleração utilizados são os mesmos do cálculo da força incidente sobre as pás. Desta forma:

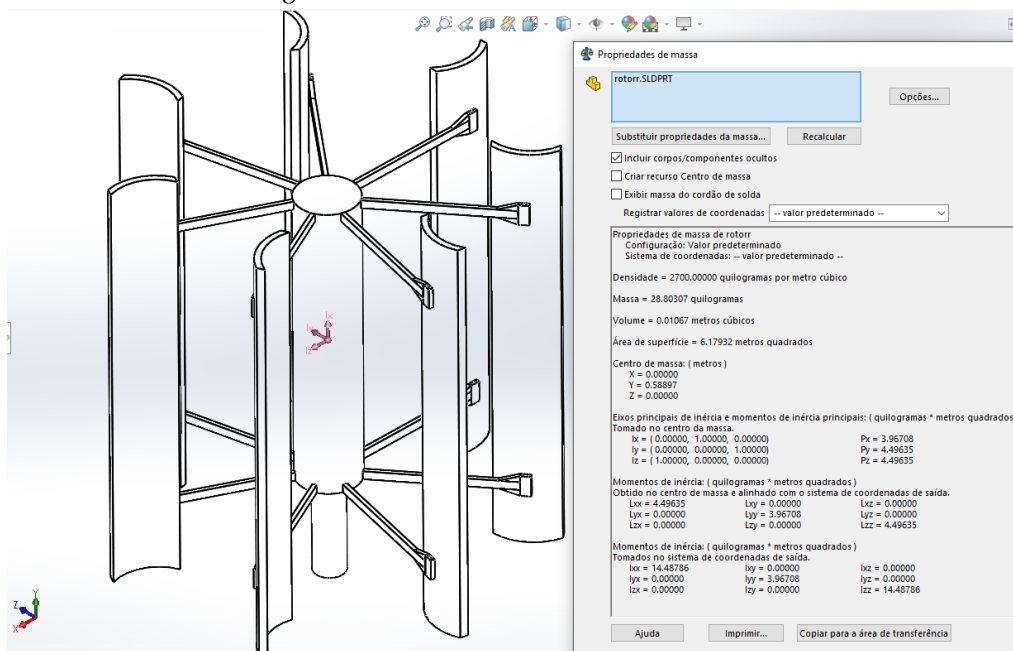
$$\omega = 7,8000 \text{ rad/s}$$

$$t = 20\text{s}$$

$$\alpha = 0,390 \text{ rad/s}^2$$

O momento de inércia do rotor foi determinado de forma análoga ao das pás (Figura 30).

Figura 30: Momento de inércia do rotor



Fonte: Próprios autores

Momentos de inércia: (quilogramas · metros quadrados)

Tomados no sistema de coordenadas de saída,

$$I = \begin{bmatrix} 14,48786 & 0 & 0 \\ 0 & 3,96708 & 0 \\ 0 & 0 & 14,48786 \end{bmatrix}$$

O momento de inércia do rotor em relação ao eixo (y) é:

$$I_y = 3,96708 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

A partir desses dados é possível determinar: a energia cinética total da rotação.

$$K_t = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega$$

$$K_t = \frac{1}{2} \cdot 3,96808 \cdot 7,8 = 15,471612J$$

O torque:

$$\tau = I \cdot \alpha$$

$$\tau = 3,96808 \cdot 0,39 = 1,5471612N/m$$

O trabalho:

$$W = \frac{1}{2} \cdot I \cdot (\omega^2 - \omega_0^2)$$

$$W = \frac{1}{2} \cdot 3,96808 \cdot 60,84 = 120,67857J$$

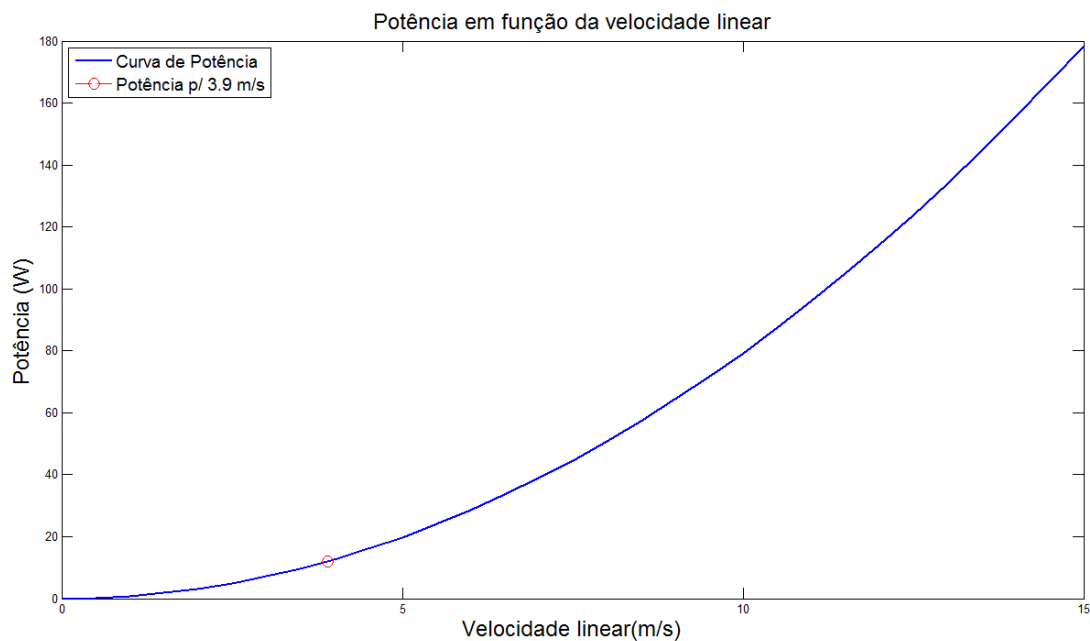
E a potência:

$$P = \tau \cdot \omega$$

$$P = 8,139066 \cdot 7,8 = 12,06785736W$$

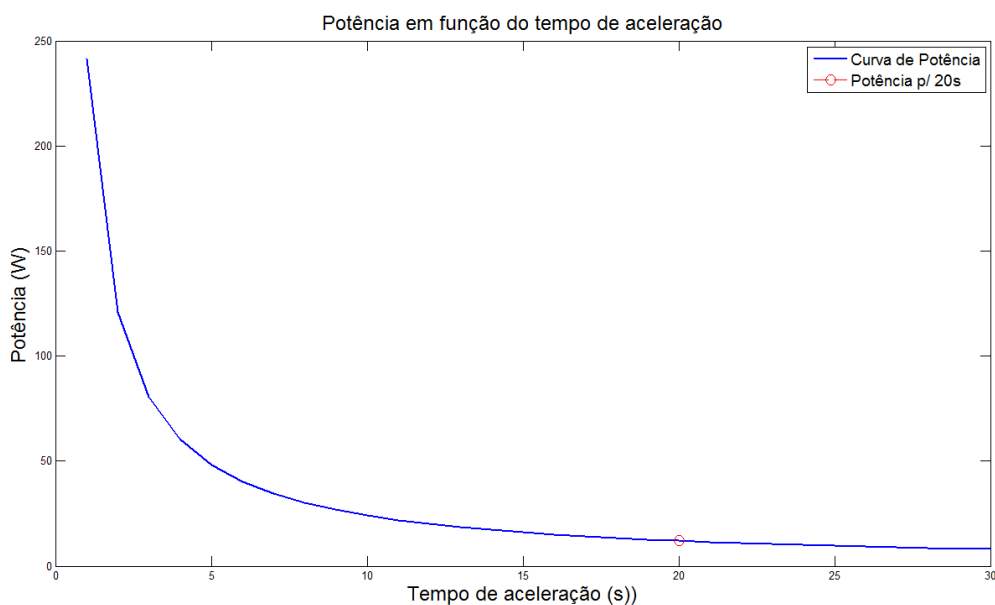
Utilizando o Matlab foram feitos dois gráficos que demonstram o comportamento da curva de potência para valores de velocidade linear e tempo de aceleração. Diferentes dos adotados nos cálculos anteriores (Figura 31) (Figura 32), também foi feito um algoritmo que calcula todos os dados anteriores a partir dos mesmos parâmetros. O *script* se encontra no anexo 22.

Figura 31: Gráfico da potência em função da velocidade linear



Fonte: Próprios autores

Figura 32: Gráfico da potência em função do tempo de aceleração



Fonte: Próprios autores

Velocidade nominal em RPM

$$2\pi \text{ rad/s} = 60 \text{ RPM} \rightarrow 7,8 \text{ rad/s} = \frac{7,8}{2\pi} \cdot 60 = 74,4845 \text{ rpm}$$

Numa situação ideal, em que as forças dissipativas não existissem ou fossem desprezíveis e o sistema conseguisse adquirir uma velocidade tangencial equivalente à velocidade do vento no ambiente, com ventos de 3,9 m/s se alcançaria uma velocidade nominal de aproximadamente 74,5 rpm, para uma eventual construção do projeto poderia ser construído ou adquirido um gerador para baixas rotações, ou utilizado um sistema de transmissão que aumente a velocidade nominal do sistema.

Após todos os cálculos foi elaborada a tabela de especificações do aerogerador:

Tabela 2: Características físicas

	Símbolo	Valor
Altura	h	3,40750 m
Área ocupada	A	5,08 m ²

Fonte: Próprios autores

Tabela 3: Condições iniciais

	Símbolo	Valor
Velocidade linear	V	3,9 m/s
Tempo de aceleração	t	20 s

Fonte: Próprios autores

Tabela 4: Dados Obtidos

	Símbolo	Valor
Aceleração angular	α	0,390 rad/s ²
Energia cinética total	K_T	15,471612J
Trabalho	W	120,67857J
Torque	τ	1,5471612N/m
Potência	P	12,06785736W
Rotação nominal	ω	74,4845 RPM

Fonte: Próprios autores

6.4. CÁLCULO PARA DIMENSIONAMENTO DA TURBINA

Como não há conhecimento ou ferramentas para calcular as medidas ideais da turbina algumas dimensões foram definidas arbitrariamente para ser base dos cálculos e do dimensionamento de outros dispositivos.

A altura da turbina foi definida como sendo igual ao diâmetro para reduzir a vibração e dar estabilidade ao movimento. O eixo central foi modificado diversas vezes para ser o menor possível reduzindo sua influência no escoamento do vento, seu diâmetro foi escolhido arbitrariamente como 150 mm, o eixo inferior que tem a função de transmitir o movimento diretamente para o gerador ou para o sistema de amplificação de frequência (que pode ser necessário conforme a velocidade dos ventos no local de instalação da turbina) tem diâmetro de 70 mm e para simulação seu comprimento foi tomado como 242.5 mm, mas pode ser alterado conforme as condições de transmissão ou do gerador escolhido.

A torre de sustentação se faz necessária para que a turbina receba ventos com velocidades maiores que os incidentes na superfície. A altura pode ser alterada para alcançar ventos com velocidades ainda maiores, mas para simulação e modelagem foi determinada como sendo de 2 metros.

6.5. AJUSTES E TOLERÂNCIAS

Para que o rotor possa ser fabricado futuramente é preciso definir o processo de fabricação e as tolerâncias das peças. O processo de fabricação determinado foi a usinagem, devido ao material e ao custo reduzido. Para a fabricação por usinagem e considerando o nível de precisão requerido para que não haja problemas na montagem ou no funcionamento foi definido que todas as tolerâncias dimensionais considerarão uma qualidade de trabalho IT7. Os afastamentos superiores e inferiores foram calculados a partir dos valores de tolerância obtidos na tabela 1 da norma NBR 6158, sendo que para as medidas que não implicam diretamente na montagem considera-se que não há diferença entre variações acima ou abaixo do valor nominal. Assim cada afastamento representa metade da respectiva tolerância. Os cálculos desses afastamentos não serão detalhados, mas todas as dimensões nominais e tolerâncias estão nos desenhos técnicos das peças (Anexos 25 a 29).

As tolerâncias referentes às dimensões que interferem na montagem requerem um cálculo específico. Na montagem do rotor há três acoplamentos, do eixo do rotor com os rolamentos, dos pinos com os furos nos olhais e nos braços, e dos olhais com os braços de suporte. O acoplamento do eixo com os rolamentos precisa ser fixo, de forma que suporte o peso do rotor sem que haja escorregamento. Com base na tabela para aplicação de ajustes-sistema ISO furo-base do livro curso de desenho técnico e AUTOCAD (RIBEIRO, et al, 2013) para acoplamentos do tipo forçado/duro que permitem que as peças sejam montadas e desmontadas sem deterioração o ajuste adequado é o H7/n6. Para o diâmetro nominal de 75 mm as tolerâncias do eixo e do rolamento são definidas da seguinte maneira:

De acordo com a tabela 3 da norma NBR 6158, para a classe de ajuste H, o afastamento inferior é zero. Assim o diâmetro interno mínimo do rolamento deve ser igual à dimensão nominal do mesmo (75 mm). Conforme a tabela 1 da norma NBR 6158, para o diâmetro 75mm e qualidade de trabalho IT7, a tolerância é 0,030 mm, assim o diâmetro interno máximo do rolamento é 75,030mm.

Conforme a tabela 2 da norma NBR 6158, para a classe de ajuste n, o afastamento superior é de +0,020mm. Isso implica que a dimensão mínima do eixo deve ser 75,020mm.

De acordo com a tabela 1 da norma NBR 6158, para o diâmetro 75mm e qualidade de trabalho IT6, a tolerância é 0,019 mm, portanto, o diâmetro máximo do eixo é 75,039mm.

Para o acoplamento dos pinos, com diâmetro nominal de 5mm, para um ajuste H7/n6, de forma similar ao ajuste do eixo, o resultado obtido foi de um diâmetro mínimo de 5 mm, e máximo de 5,012 mm para o furo e diâmetro mínimo de 5,008mm e máximo de 5,016 mm para o pino.

O acoplamento dos olhais no braço de suporte é móvel, de forma que as pás podem se movimentar livremente sem os pinos, para acoplamentos do tipo deslizante justo é utilizado o ajuste H7/h6, com a dimensão nominal de 20 mm utilizando as tabelas 1, 2 e 3 da NBR 6158 é possível determinar que a distância mínima entre os encaixes do braço é de 20 mm, máxima de 20,021 mm; e a altura mínima do olhal é 20 mm e a máxima é de 20,013mm.

Os braços são acoplados no eixo por solda, os ângulos entre eles são de aproximadamente $51,43^{\circ}$, de acordo com a tabela 3 da norma NBR ISO 2768 para

ângulos entre 50° e 120° com um acabamento médio a tolerância é de $\pm 0^{\circ},20'$. (Tolerância representada como $\pm 0,20^{\circ}$ no desenho por definições do *software* em que foi feito).

7. CONCLUSÕES

Como apresentado ao longo do trabalho à utilização da energia eólica esteve presente em grande parte do desenvolvimento da humanidade, seja para geração de energia mecânica para moer grãos ou através dos grandes parques de geração de energia elétrica, porém ela ainda representa uma parcela muito pequena se comparado como o seu real potencial.

No Brasil, apesar de ter 7% energia elétrica vinda dos parques eólicos, principalmente nas regiões Nordeste e Sul, ainda não é usual encontrar turbinas eólicas nos meios urbanos e rural como em outros países, uma vez que foivisto os benefícios que a geração eólica proporciona.

O trabalho apresentado teve como um dos objetivos, modelar um aerogerador de eixo vertical para demonstrar que tal tecnologia pode ser aplicada em meios urbanos e se tornar um importante meio de geração de energia e que pode servir como complemento a energia consumida por residências urbanas e rurais. Como toda turbina eólica a eficiência do rotor modelado depende diretamente do regime de ventos. Contudo o modelo adotado se mostrou pouco eficiente depois de concluído o trabalho como visto na análise do movimento do rotor.

Tendo em vista o TAI as disciplinas do período corrente foram aplicadas de forma a resolver alguns problemas encontrados ao longo do desenvolvimento do modelo e foram empregadas disciplinas ainda não cursadas, como Estática e Mecânica dos Fluidos.

Pode-se dizer que o objetivo geral do trabalho foi alcançado. Porém, fica como sugestão para trabalhos futuros um estudo mais aprofundado para que seja adotado um rotor mais eficiente que consiga converter uma parcela maior da energia cinética, presente nos ventos, em energia mecânica que possa atender aos parâmetros necessários de eficiente em relação à geração de energia.

Desta forma espera-se que em trabalhos futuros se possa melhorar sua eficiência, levando em conta estudos mais aprofundados da mecânica dos fluidos e dos perfis aerodinâmicos para que seja melhor aproveitada a energia cinética presente nos ventos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEEOLICA – Associação brasileira de energia eólica. **Boletim anual de geração eólica**. 2016.

AMARANTE, O. A. C. do; ZACK, J.; BROWER, M.; De Sá, A. L. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2001. 44 p.

AMARANTE, O. A. C. Do; SILVA, F. de J. L. da; ANDRADE, P. E. P. de. **Atlas eólico: Minas Gerais**. Belo Horizonte, MG: Cemig, 2010. 84 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEólica). Infográfico 10GW. Disponível em <http://www.abeeolica.org.br/dados-abeeolica/>. Acesso em: 06 de jun. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 2768-1: Tolerâncias para dimensões lineares e angulares sem indicação de tolerância individual**. Rio de Janeiro 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6409: Tolerâncias geométricas – Tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento – Generalidade, símbolos, definições e indicação em desenho**. Rio de Janeiro 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6158: Sistemas de tolerâncias e ajustes**. Rio de Janeiro 1995.

BAÊTA, F. C.; SARTOR, V. **Resistencia dos materiais e dimensionamento de estruturas para construções rurais**. 1º ed. Viçosa, Dep. de Eng. Agrícola. 1999.

BATISTA, N. A. M da C. **Novo Aerogerador de eixo vertical integrada numa rede inteligente em contexto urbano**. 2013. 251 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de Évora, Évora. 2013

CARVALHO, N. da C. C.; TRABASSO, L. G. Modelagem de Processo: Uma contribuição para a avaliação econômica de projetos de sistemas fotovoltaicos ou eólicos de pequeno porte, no contexto da resolução normativa ANEEL N° 482/2012 – Micro e minigeração distribuída. In: BRAZIL WINDPOWER, 5., 2014, Rio de Janeiro. **Anais...** São Paulo: ABEEólica, 2014. p 10.

FERREIRA JÚNIOR, J. B. M.; **Projeto de um aerogerador vertical de pequeno porte para aplicação em habitações populares em centros urbanos**. 2016. 67 f. – UFRJ – Escola Politécnica, Rio de Janeiro. 2016

Instituto de Física – UFRGS, O que Vaz um avião voar? <www.if.ufrgs.br/tex/fis01043/20031/Andre/#O%20QUE%20FAZ%20UM%20AVI%C3%83O%20VOAR?>. Acesso em 21 de Junho de 2017.

G1 – Energia eólica é suficiente para o mundo, diz estudo.<<http://g1.globo.com/Noticias/Ciencia/0,,MUL1204259-5603,00.html>>. Acesso em 10 de Maio de 2017.

GIANNINI, M.; DUTRA, R. M.; GUEDES, V, G. Estudo prospectivo do mercado de energia eólica de pequeno porte no Brasil. In BRAZIL WINDPOWER, 2013, 4. Rio de Janeiro. **Anais...** São Paulo: ABEEólica 2013. p 10.

IEA – International Energy Agency. **Key World Energy Trends: World energy balances. Organização das nações unidas.** 2016. Acessado em 21 de Junho de 2017.

MME – Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **2ª Revisão Quadrimestral das Projeções da demanda de energia elétrica 2016-2020.** Rio de Janeiro, 2016.

MME - Ministério de Minas e Energia. **Energia Eólica 2014 – Brasil e o Mundo.** Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético, Dezembro, 2014. Acessado em 20 de Maio de 2017.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física básica.** 4 ed. São Paulo, Edgard Blucher, 2002.

RAHMEIER, R. A. S. **Desenvolvimento de uma turbine eólica de eixo vertical tipo H.** 2015. Monografia (Graduação em Engenharia de Energias Renováveis e Ambiente) – Universidade Federal do Pampa. Bagé, 2015. p 71.

RIBEIRO, A.C.; PERES, M. P.; IZIDORO, N. **Curso de Desenho Técnico e Autocad.** Editora Pearson, SãoPaulo, 2013.

ROCHA, Rafael Vieira. **Simulação de aerogerador em uma bancada experimental.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

STEWART, James. **Cálculo Volume 1.** 7 ed. São Paulo, Cengage, 2013.

TABARES, H. G.; FILHO, A. J. S., BELATI E. A.. **Controle Direto de Torque Aplicado à Aerogeradores de Junção com Rotor Bobinado.** Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE. Abril 2014.

PEREIRA, M. G.; MONTEZANO, B. E. M.; DUTRA, R. M. Mercado de energia eólica de pequeno porte no Brasil: Percepção do Potencial Consumidor. In: BRAZIL WINDPOWER, 6. 2015, Rio de Janeiro. **Anais...** São Paulo: ABEEólica, 2015. p 10.

VALIENTE, E. S. P. **Aplicações de sistemas lineares e determinantes na engenharia.** 2015. Dissertação (Mestrado Profissional em Matemática) – Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grade, 2015.

ANEXOS

Anexo 1.

25/06/17 18:34 C:\Users\FELIPE \Downloads\mun.m 1 of 1

```
%Geração de energia elétrica mundial - 2015
x=[30 2 26 18 13 11];%dados
pie (x)
legend ('Carvão','Óleo','Gás','Nuclear','Hidrelétrica','Outras','fontsize',12)
title('Geração de energia elétrica mundial - 2015','fontsize',12)
```

Anexo 2.

25/06/17 18:35 C:\Users\FELIPE \Downloads\PARETO.m 1 of 1

```
%Grafico de pareto da matriz energetica brasileira - 2016
x=[61.20 9.40 7.10 3.30 8.60 6.70 2.40 1.3];
pie (x,x==x(3))
legend ('Hidrelétrica','Biomassa','Eólica','PCH','Gás'
Natural','Óleo','Carvão','Nuclear',2)
title('Matriz elétrica brasileira - 2016')
```

Anexo 3.

25/06/17 18:57 C:\Users\FELIPE \Downloads\barra.m 1 of 1

```
%Grafico da Evolução da capacidade eólica instalada no Brasil
x=[27.1 27.1; 208.3 235.4; 10.2 245.6; 77.8 323.4; 277.4 600.8; 330.4 931.2; 498.7
1429.9; 1094.6 2524.5; 952.1 3476.6; 2506.3 5982.9;2753 8736.7; 2330 11066.7; 2618.6
13685.3 ; 3464.2 17149.5; 947.3 18096.8; 320.4 18417.2];%dados
bar(x)%plota o grafico de barras
grid%ativa a grade
set(gca,'Xtick',1:16,'XTickLabel',
{'2005','2006','2007','2008','2009','2010','2011','2012','2013','2014','2015','2016','
2017','2018','2019','2020'})%muda os dados do eixo x
legend('Novo','Acumulado',2)%legenda
```

Anexo 4.

25/06/17 19:08 F:\TAI\MATLAB\disper.m 1 of 1

```

dados=[708795 1848000
985341 2715000
1115903 2777000
1258767 3232000
1317659 3245000
1470155 3735000
1800500 4477000
1848797 4561000
1956657 4949000
1961413 4951000
1800348 4671000
1590349 4106000];
m=1:12;%eixo x
x=dados(:,1);
y=dados(:,2);
plot(m,x,'ks-')%plota o grafico de dispersão
hold on
plot(m,y,'rs-')%plota o grafico de dispersão
legend('Emissão de CO2','Geração de energia de fonte eólica',2)
set(gca,'Xtick',1:12,'XTickLabel',
{'Janeiro','Fevereiro','Março','Abril','Maio','Junho','Julho','Agosto','Setembro','Out
ubro','Novembro','Dezembro'})

```

Anexo 5.

20/06/17 18:44 C:\Users\Felipe\Desktop\TAI\M...\barras.m 1 of 1

```

vel=[8 14 16 13 13 13 19 16];%velocidades do vento
hr=[1 2 3 4 5 6 7 8];%eixo horizontal
bar(hr,vel,'k');%gera o grafico de barras
xlabel('Hora do dia')
ylabel('Velocidade do vento (Km/h)')
set(gca,'Xtick',1:8,'XTickLabel',{'17:00','20:00','23:00','02:00','05:00','08:00','11:
00','14:00'})%muda as informações apresentadas no eixo x para o horário das velocidades

```

Anexo 6.

Equação para a velocidade do vento:

$$V_m = \frac{8 + 14 + 16 + 13 + 13 + 13 + 19 + 16}{8} = 14 \text{ km/h} \cong 3,9 \text{ m/s (1)}$$

Anexo 7.

25/06/17 20:56 C:\Users\Felipe\Desktop\TA...\graficopa.m 1 of 1

```

x=[-75:0.1:75];%eixo x
y=(125^2-x.^2).^ (1/2);%curva do raio externo
z=(110^2-x.^2).^ (1/2);%curva do raio interno
plot(x,y,'k')%plota o raio externo
axis([-80 80 0 160])%define os limites dos eixos
hold on
plot(x,z,'k')%plota o raio interno

```

Anexo 8.

Integral para área superior da pá:

$$A = \int_{-75}^{75} \sqrt{125^2 - x^2} - \sqrt{110^2 - x^2} dx$$

$$\int_{-75}^{75} \sqrt{125^2 - x^2} dx - \int_{-75}^{75} \sqrt{110^2 - x^2} dx = 2 \int_0^{75} \sqrt{125^2 - x^2} dx - 2 \int_0^{75} \sqrt{110^2 - x^2} dx$$

Por substituição trigonométrica:

$$\sin \theta = \frac{x}{r} \rightarrow x = r \sin \theta \quad dx = r \cos \theta \, d\theta$$

$$= \int_0^{\theta} \sqrt{r^2 - (r \sin \theta)^2} (r \cos \theta) d\theta$$

$$= \int_0^{\theta} \sqrt{r^2 - r^2 \sin^2 \theta} (r \cos \theta) d\theta = \int_0^{\theta} \sqrt{r^2(1 - \sin^2 \theta)} (r \cos \theta) d\theta$$

$$\rightarrow \int_0^{\theta} \sqrt{r^2 \cos^2 \theta} r \cos \theta d\theta = \int_0^{\theta} r^2 \cos^2 \theta d\theta = r^2 \int_0^{\theta} \cos^2 \theta d\theta$$

$$= r^2 \int_0^{\theta} \frac{1 + \cos 2\theta}{2} d\theta = \frac{r^2}{2} \int_0^{\theta} 1 d\theta + \int_0^{\theta} \cos 2\theta d\theta = \frac{r^2}{2} \left[\theta + \int_0^{\theta} \cos 2\theta d\theta \right]$$

$$\int_0^{\theta} \cos 2\theta d\theta = \frac{1}{2} \int_0^u \cos u du = \frac{1}{2} \sin u = \frac{1}{2} \sin 2\theta$$

Sendo $u = 2\theta \frac{du}{2} = d\theta$

$$\therefore \frac{r^2}{2} \left[\theta + \int_0^{\theta} \cos 2\theta d\theta \right] = \frac{r^2}{2} \left[\theta + \frac{1}{2} \sin 2\theta \right] = \frac{r^2}{2} \left[\sin^{-1} \frac{x}{r} + \frac{1}{2} \sin 2(\sin^{-1} \frac{x}{r}) \right] [0, 75]$$

$$\theta = \sin^{-1} \frac{x}{r}$$

$$2 \int_0^{75} \sqrt{125^2 - x^2} dx$$

$$= 125^2 \left[\sin^{-1} \frac{75}{125} + \frac{1}{2} \sin 2(\sin^{-1} \frac{75}{125}) \right] - 125^2 \left[\sin^{-1} \frac{0}{125} + \frac{1}{2} \sin 2(\sin^{-1} \frac{0}{125}) \right]$$

$$2 \int_0^{75} \sqrt{110^2 - x^2} dx$$

$$= 110^2 \left[\sin^{-1} \frac{75}{110} + \frac{1}{2} \sin 2(\sin^{-1} \frac{75}{110}) \right] - 110^2 \left[\sin^{-1} \frac{0}{110} + \frac{1}{2} \sin 2(\sin^{-1} \frac{0}{110}) \right]$$

Anexo 9.

```
>> %calculo da area da superficie da pa

ma=2*((125^2/2)*((asin(75/125))+(1/2)*sin(2*(asin(75/125)))));%area da circunferencia maior
mi=2*((110^2/2)*((asin(75/110))+(1/2)*sin(2*(asin(75/110)))));%area da circunferencia menor
area=ma-mi;%area entre as curvas em milimetros quadrados
area/1000000%conversão para metros quadrados

ans =

    0.002441683520372
```

Anexo 10.

06/06/17 15:13 C:\Users\Felipe\Desktop\T...\funcaoarea.m 1 of 1

```
format long
r1=input('Digite o raio menor ');
r2=input('Digite o raio maior ');
c=input('Didite o tamanho da corda ');
f=input('Possui furo? (sim/nao) ','s');
t='sim';
if f==t
    f1=input('Quantos furos ');
    f2=input('Raio dos furos ');
    ft=((f2^2)*pi)*f1;%quantifica a área dos furos se houver
else
    ft=0;
end
co=c/2;
maior=((r2^2)*((asin(co/r2))+(1/2)*sin(2*(asin(co/r2)))));%area da circunferencia maior
menor=((r1^2)*((asin(co/r1))+(1/2)*sin(2*(asin(co/r1)))));%area da circunferencia menor
area=maior-menor-ft;%area total em milimetros quadrados
area=area/1000000;%conversão para metros quadrados
fprintf('A área da superficie entre as curvas é %10.15f metros quadrados \n',area)
```

Anexo 11.

06/06/17 15:14 MATLAB Command Window 1 of 1

```
Warning: Function C:\Users\Felipe\Documents\MATLAB\j.m has the same name as a MATLAB
builtin. We suggest you rename the function to avoid a potential name conflict.
Digite o raio menor 110
Digite o raio maior 125
Didite o tamanho da corda 150
Possui furo? (sim/nao) 0
A área da superficie entre as curvas é 0.002441683520372 metros quadrados
>> funcaoarea
Digite o raio menor 125
Digite o raio maior 135
Didite o tamanho da corda 24
Possui furo? (sim/nao) sim
Quantos furos 2
Raio dos furos 2.5
A área da superficie entre as curvas é 0.000201072745209 metros quadrados
```

Anexo 12.

```
>> %calculo da area da superficie do suporte

mai=((135^2)*((asin(12/135))+(1/2)*sin(2*(asin(12/135)))));%area da circunferencia maior
men=((125^2)*((asin(12/125))+(1/2)*sin(2*(asin(12/125)))));%area da circunferencia menor
area=mai-men-(12.5*pi);%area total em milimetros quadrados
area/1000000%conversão para metros quadrados

ans =

    2.010727452090346e-04
```

Anexo 13.

```
>> %volume eixo central
a=(0.075^2)*pi;%area externa do eixo principal em mm quadrados
a1=(0.070^2)*pi;%area interna do eixo principal em mm quadrados
va=((a*0.720)-(a1*0.710));% volume do eixo principal em metros cúbicos
aei=(0.0375^2)*pi;%area exterior do eixo inferior em mm quadrados
aei1=(0.0325^2)*pi;%area interna do eixo inferior em mm quadrados
vaei=((aei*0.2425)-(aei1*0.2325));%volume do eixo inferior em metros cúbicos
v=(va+vaei);%volume total em metros cúbicos
fprintf('O volume do eixo do rotor é %10.15f metros cúbicos \n',v)

O volume do eixo do rotor é 0.002093675154077 metros cúbicos
```

Anexo 14.

Volume do braço:

(1) Para o volume da haste é preciso primeiro determinar a área da superfície superior:

A área da haste é obtida pelo retângulo formado entre o centro do eixo e o suporte da pá, subtraída da área do eixo inserida no retângulo.

$$A = (413 \cdot 10,043) - \int_0^{10,043} \sqrt{75^2 - x^2} dx$$



O volume é obtido a partir da área da superfície e da altura:

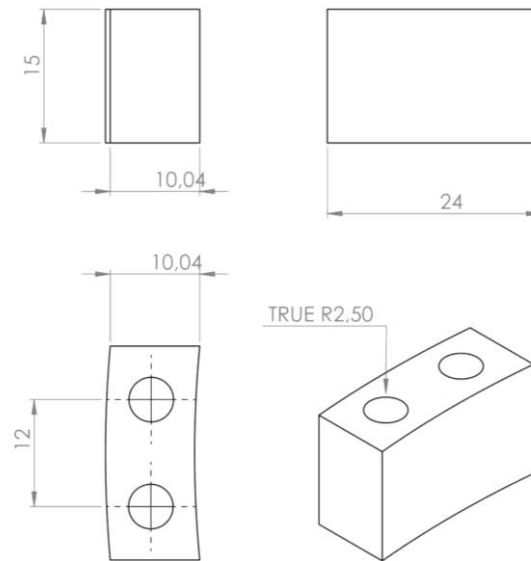
$$V = A \cdot h$$

Onde V é o volume, A é a área e h a altura.

$$V = A \cdot 20$$

$$V = 6.793582211759230 \times 10^4 \text{ mm}^3$$

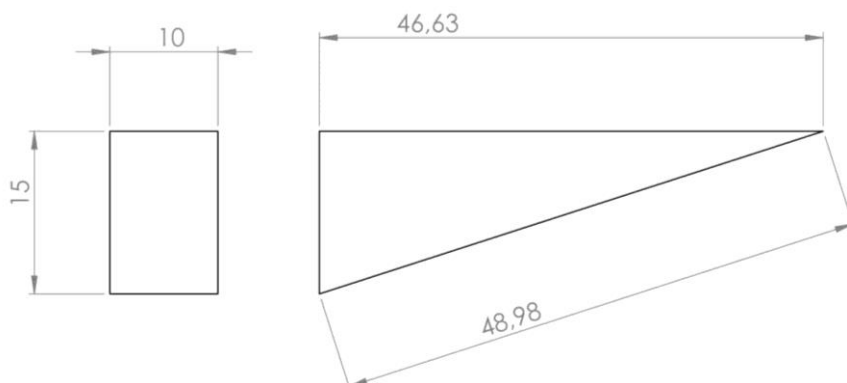
(2) O volume dos encaixes é calculado de forma similar ao dos olhais, diferindo apenas na altura, que no caso é de 30 mm considerando os dois encaixes.



$$V = 201,073 \cdot 15$$

$$V = 3.016095 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

(3) O volume da ligação entre os dois outros componentes utiliza a mesma fórmula para volume. A área da superfície nesse caso é um triângulo.



$$V = 46,63 \cdot 15 \cdot 10,04$$

$$V = 7,022478 \times 10^4 \text{ mm}^3$$

Por fim o volume total é dado pela soma do volume da haste, com o das duas ligações e dos dois encaixes.

$$V = 6.793582211759230 \times 10^4 + 2 \cdot 7,022478 \times 10^4 + 2 \cdot 3.016095 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

$$V = 8.099049011759230 \times 10^4 \text{ mm}^3 = 8.099049011759230 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

O volume do braço de suporte portanto é de $8.09905 \times 10^{-5} \text{ m}^3$

Anexo 15.

```

20/06/17 17:47      MATLAB Command Window      1 of 1


---


>> haste=(413*10.043-((5625*asin(10043/75000))/2 + (10043*5524138151^(1/2))/2000000))  

*20;%volume haste  

ligacao=46.63*10.04*15;%volume ligações  

olhal=201.073*30;%volume olhais  

volumetotal=haste+ligacao+olhal;%volume total  

volumetotal=volumetotal/1000000000%conversão para mm cubicos  

volumetotal =  

      8.099049011759230e-005

```

Anexo 16.

```

20/06/17 17:52      MATLAB Command Window      1 of 1


---


>> bracos=8.099049e-005*14;%volume total dos braços de suporte  

pas=0.001054852*7;%volume total das pás  

olhais=4.0214549e-06*14;%volume total dos olhais  

eixos=0.002093675;%volume total dos eixo  

volumerotator=bracos+pas+eixos+olhais%volume total do rotor  

massarotor=voltot*2700%massa do rotor feito em aluminio 6061  

peso=massarotor*9.81%peso do rotor p/ g=9.81 m/s^2  

volumerotator =  

      0.010667806228600  

massarotor =  

      28.803076817219999  

peso =  

      2.825581835769282e+002

```

Anexo 17.

Propriedades de massa de Peça18

Configuração: Valor predeterminado

Sistema de coordenadas: -- valor predeterminado --

Densidade = 2700.000000 quilogramas por metro cúbico

Massa = 2.8698167 quilogramas

Volume = 0.0010629 metros cúbicos

Área de superfície = 0.7084039 metros quadrados

Centro de massa: (metros)

X = -0.8502252

Y = 0.5000000

Z = 0.0176962

Eixos principais de inércia e momentos de inércia principais: (quilogramas * metros quadrados)

Alinhado no centro da massa.

I_x = (0.0000000, 1.0000000, 0.0000000) P_x = 0.0067033I_y = (-1.0000000, 0.0000000, 0.0000000) P_y = 0.2440940I_z = (0.0000000, 0.0000000, 1.0000000) P_z = 0.2500810

Momentos de inércia: (quilogramas * metros quadrados)

Obtido no centro de massa e alinhado com o sistema de coordenadas de saída.

L_{xx} = 0.2440940 L_{xy} = 0.0000000 L_{xz} = 0.0000000L_{yx} = 0.0000000 L_{yy} = 0.0067033 L_{yz} = 0.0000000L_{zx} = 0.0000000 L_{zy} = 0.0000000 L_{zz} = 0.2500810

Momentos de inércia: (quilogramas * metros quadrados)

Alinhados no sistema de coordenadas de saída.

I_{xx} = 0.9624469 I_{xy} = -1.2199952 I_{xz} = -0.0431785I_{yx} = -1.2199952 I_{yy} = 2.0821432 I_{yz} = 0.0253924I_{zx} = -0.0431785 I_{zy} = 0.0253924 I_{zz} = 3.0420764

Anexo 18.

25/06/17 20:41 C:\Users\Felipe\Desktop\TAI\MATLAB\new.m 1 of 1

```

r=0.5;%raio do rotor
fr=0;%força resultante
i=2.0821432;%momento de inercia
n=1:1:7;
a=[1.98 53.41 104.84 23.73 27.64 101.08 49.65];%angulos de incidencia do vento sobre as pás
v=input('Digite a velocidade linear ');
t=input('Digite o tempo ');
w=v/r;%velocidade angular
alpha=w/t;%aceleração angular
for k = 1:1:7
    f(k)=i*alpha*(1/(r*sind(a(k))));%calcula a força sobre cada pá
    fr=fr+f(k);%soma todas as forças
    fprintf('A força na pá %1.0f é %5.3f N para um angulo de %5.2f',n(k),f(k),a(k))%
mostra as informações de cada pa
    disp(char(176))%símbolo de graus
end
fprintf('A força resultante é %10.15f N \n',fr)
tabela=[n;a;f];
xlswrite('force',tabela)%exporta os dados

```


Anexo 19.

```

Digite a velocidade linear 21
Digite o tempo 20
A força na pá 1 é 253.107 N para um angulo de 1.98°
A força na pá 2 é 10.891 N para um angulo de 53.41°
A força na pá 3 é 9.047 N para um angulo de 104.84°
A força na pá 4 é 21.731 N para um angulo de 23.73°
A força na pá 5 é 18.850 N para um angulo de 27.64°
A força na pá 6 é 8.911 N para um angulo de 101.08°
A força na pá 7 é 11.475 N para um angulo de 49.65°
A força resultante é 334.012035548141400 N

```

Anexo 20.

21/06/17 18:20 C:\Users\Felipe\Documents\MATLAB\tracao.m 1 of 1

```

fv=334.01;%força do vento
ang=0:1:90;%angulo
T=fv./(cosd(ang));%tração
plot(ang,T,'linewidth',1.5)%plota a curva de tração
xlabel('Angulo (em graus)','fontsize',18)
ylabel('Tração','fontsize',18)
title('Tração em função do angulo','fontsize',18)
hold on
Ts=T.*(sind(ang));%tração em y
plot(ang,Ts,'r','linewidth',1.5)%plota a curva de tração
legend('Tração','Tração em y','linewidth',2,'fontsize',18,2)

```

Anexo 21.

Propriedades de massa de rotor

Configuração: Valor predeterminado

Sistema de coordenadas: -- valor predeterminado --

Densidade = 2700.00000 quilogramas por metro cúbico

Massa = 28.80307 quilogramas

Vólume = 0.01067 metros cúbicos

Área de superfície = 6.17932 metros quadrados

Centro de massa: (metros)

X = 0.00000

Y = 0.58897

Z = 0.00000

Eixos principais de inércia e momentos de inércia principais: (quilogramas * metros quadrados)

Āmado no centro da massa.

Ix = (0.00000, 1.00000, 0.00000) Px = 3.96708

Iy = (0.00000, 0.00000, 1.00000) Py = 4.49635

Iz = (1.00000, 0.00000, 0.00000) Pz = 4.49635

Momentos de inércia: (quilogramas * metros quadrados)

Obtido no centro de massa e alinhado com o sistema de coordenadas de saída.

Lxx = 4.49635 Lxy = 0.00000 Lxz = 0.00000

Lyx = 0.00000 Lyy = 3.96708 Lyz = 0.00000

Lzx = 0.00000 Lzy = 0.00000 Lzz = 4.49635

Momentos de inércia: (quilogramas * metros quadrados)

Āmados no sistema de coordenadas de saída.

Ixx = 14.48786 Ixy = 0.00000 Ixz = 0.00000

Iyx = 0.00000 Iyy = 3.96708 Iyz = 0.00000

Izx = 0.00000 Izy = 0.00000 Izz = 14.48786

Anexo 22.

25/06/17 20:39 C:\MATLAB\R2011a\rotordadoas.m 1 of 1

```

r=0.5;%raio do rotor
fr=0;%força resultante
i=3.96708;%momento de inercia
v=input('Digite a velocidade linear ');
t=input('Digite o tempo ');
w=v/r;%velocidade angular
alpha=w/t;%aceleração angular
k=0.5*i*w;%calculo de energia cinética
torque=i*alpha;%calculo de torque
p=torque*w;%calculo da potencia
trab=0.5*i*(w^2);%calculo de trabalho
fprintf('A energia cinética total é %10.15f J \n',k)
fprintf('O torque é %10.15f N/m \n',torque)
fprintf('A potência é %10.15f W \n',p)
fprintf('O trabalho é %10.15f W \n',trab)

```

Anexo 23.

25/06/17 20:41 MATLAB Command Window 1 of 1

```

Warning: Function C:\Users\Felipe\Documents\MATLAB\j.m has the same name as a MATLAB
builtin. We suggest you rename the function to avoid a potential name conflict.
Digite a velocidade linear 3.9
Digite o tempo 20
A energia cinética total é 15.471612000000000 J
O torque é 1.547161200000000 N/m
A potência é 12.067857360000001 W
O trabalho é 120.678573599999990 W

```

Anexo 24.

25/06/17 20:44 C:\MATLAB\R2011a\tentativa1.m

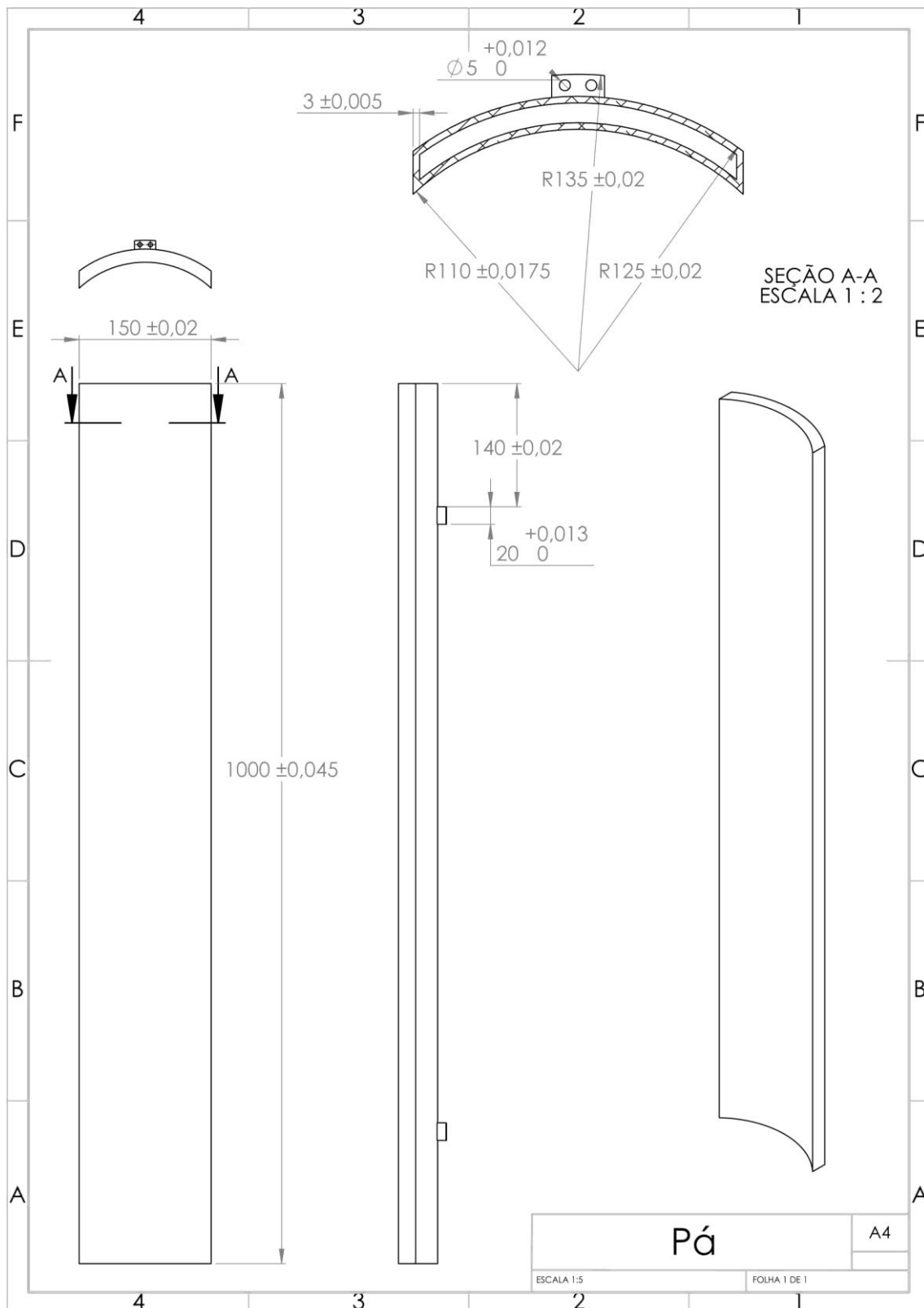
1 of 1

```

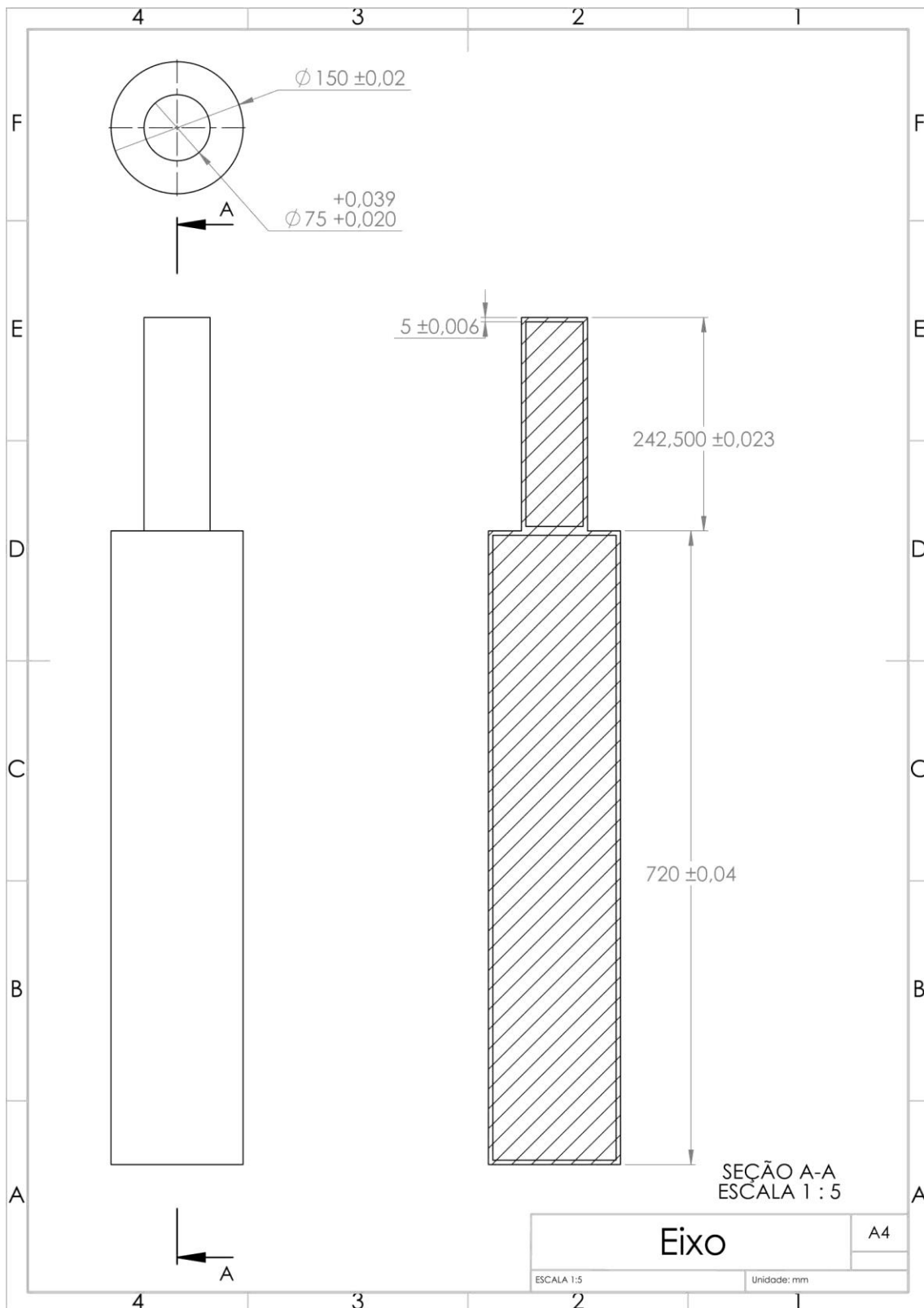
r=0.5;%raio do rotor
fr=0;%força resultante
i=3.96708;%momento de inercia
v=0:0.5:15;%velocidades variando de 0 a 15m/s
t=20;%tempo constante
figure(1)%cria a matriz de ploagem e plota na posição 1
w=v./r;%velocidade angular
alpha=w./t;%aceleração angular
k=0.5*i.*w;%calculo de energia cinética
torque=i.*alpha;%calculo de torque
p=torque.*w;%calculo da potencia
plot(v,p,'linewidth',1.5)%plota a curva de potencia
xlabel('Velocidade linear(m/s)','fontsize',18)
ylabel('Potência (W)','fontsize',18)
title('Potência em função da velocidade linear','fontsize',18)
hold on
o=[3.9];
l=[12.067857360000001];
plot(o,l,'ro--','markersize',10)%plota o ponto base
legend('Curva de Potência','Potência p/ 3.9 m/s','fontsize',18,2)
figure(2)
vc=3.9;
tv=0:1:30;%tempo de aceleração variando de 0 a 30s
w2=vc/r;%velocidade angular
alpha2=w2./tv;%aceleração angular
k2=0.5*i.*w2;%calculo de energia cinética
torque2=i.*alpha2;%calculo de torque
p2=torque2.*w2;%calculo da potencia
plot(tv,p2,'linewidth',1.5)%plota a curva de potencia
title('Potência em função do tempo de aceleração','fontsize',18)
xlabel('Tempo de aceleração (s)','fontsize',18)
ylabel('Potência (W)','fontsize',18)
hold on
o=[20];
l=[12.067857360000001];
plot(o,l,'ro--','markersize',10)
legend('Curva de Potência','Potência p/ 20s','fontsize',18)

```

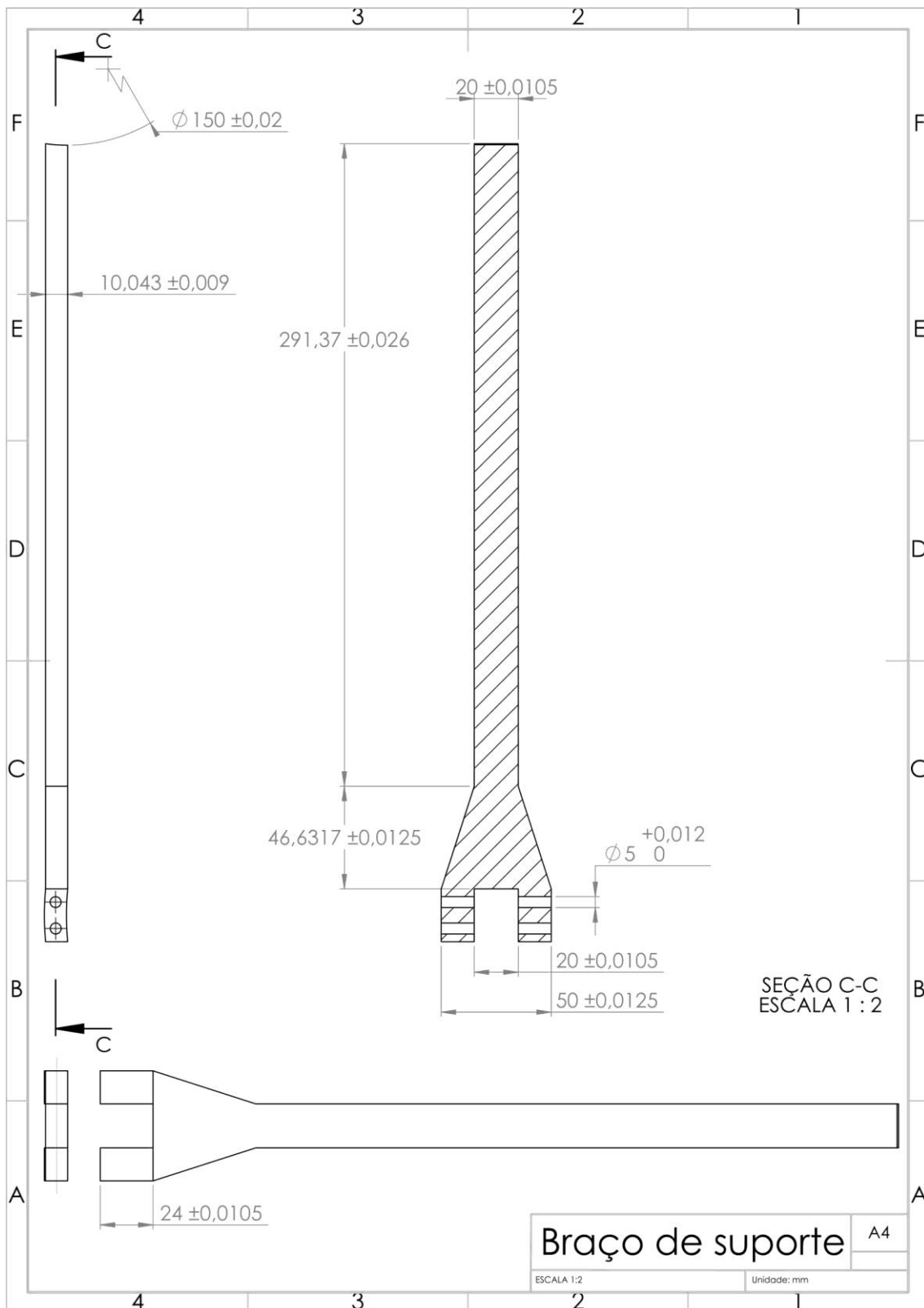
Anexo 25.



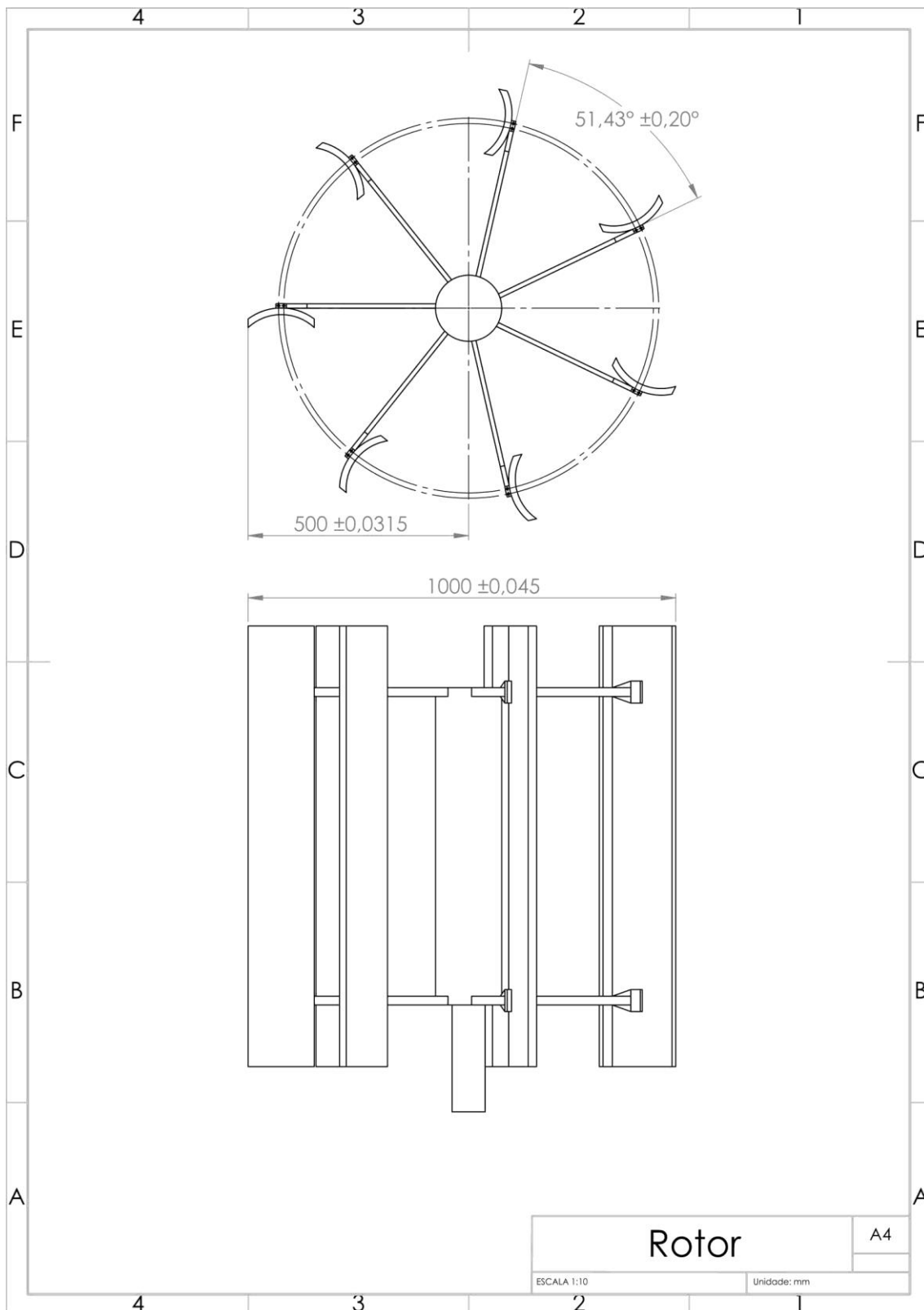
Anexo 26.



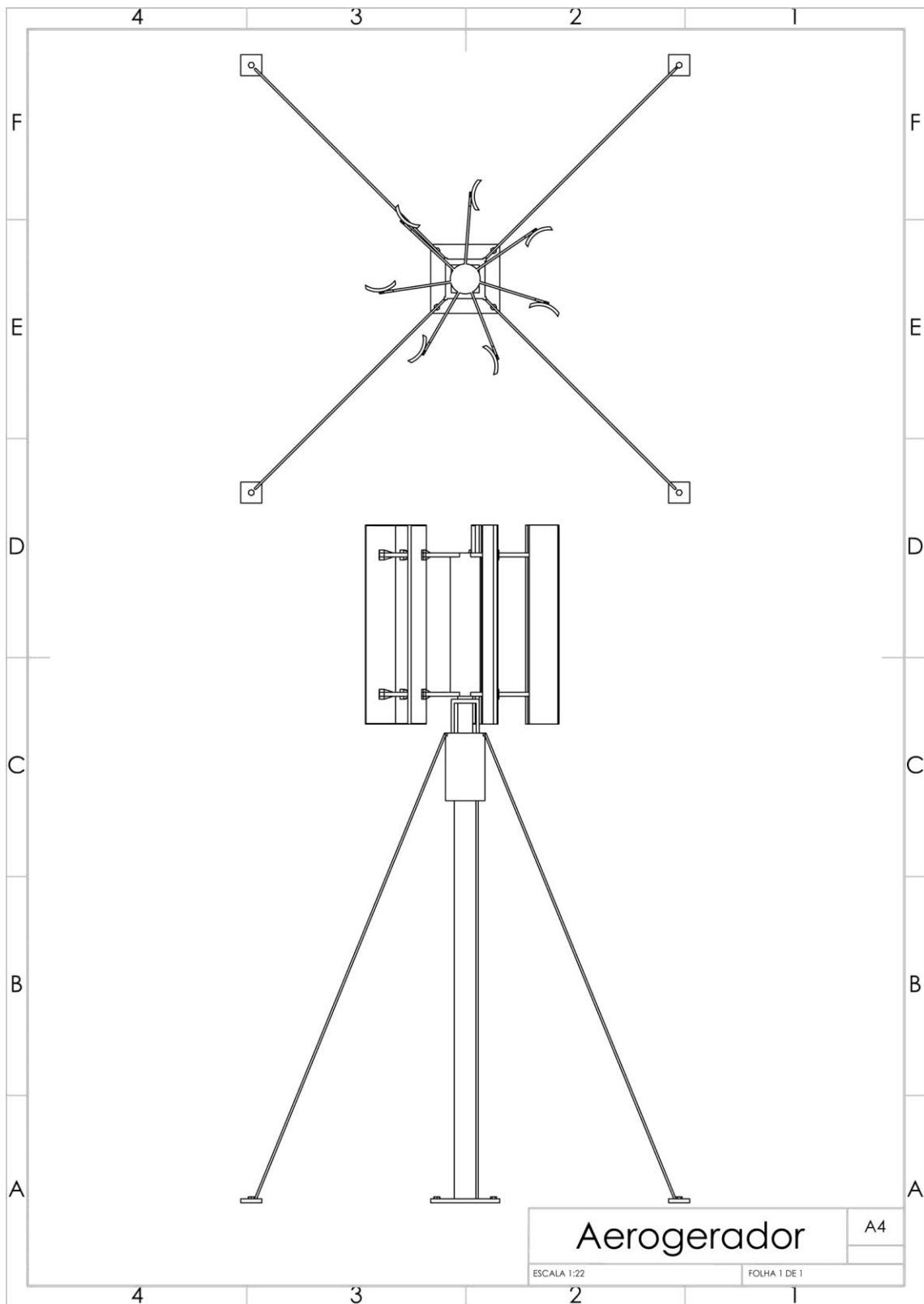
Anexo 27.



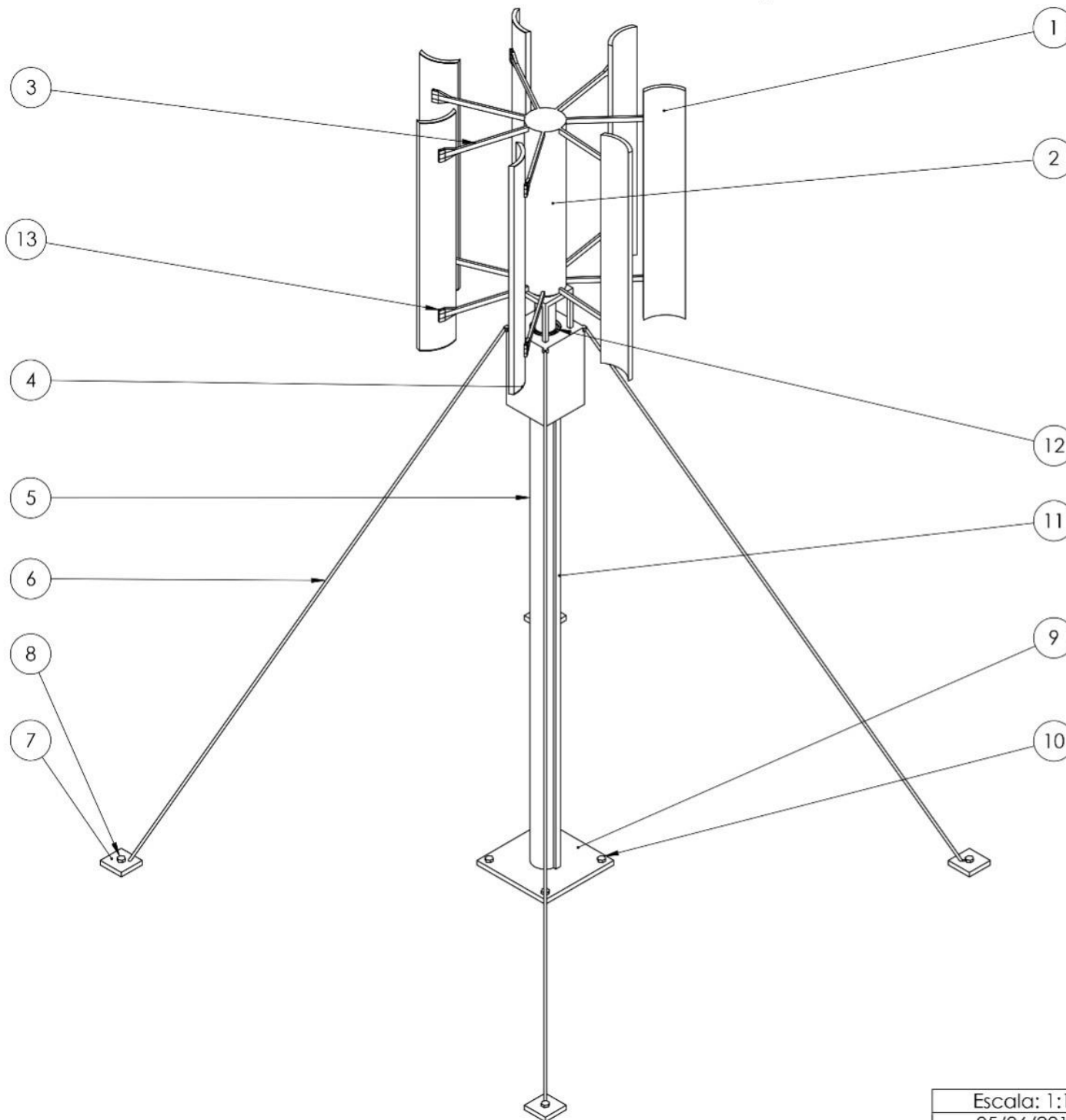
Anexo 28.



Anexo 29.



Conjunto Aerogerador



Lista de peças

Nº DO ITEM	DESCRIÇÃO	QTD.
1	Pá	7
2	Eixo do rotor	1
3	Haste de suporte	14
4	Blindagem do gerador	1
5	Torre de sustentação	1
6	Cabo estabilizador	4
7	Base de fixação do cabo	4
8	Parafuso de fixação da base	4
9	Base da torre	1
10	Parafuso de fixação	4
11	Blindagem dos fios	1
12	Rolamento	2
13	Pino do suporte	28

Escala: 1:15
05/06/2017

