



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CAMPUS CARAÚBAS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CLEYSON GOMES DE MOURA

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL DE
PEQUENO PORTE**

CARAÚBAS-RN
2017

CLEYSON GOMES DE MOURA

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL DE
PEQUENO PORTE**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), como exigência final para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador Rafael Luz Espíndola – UFERSA.

CARAÚBAS-RN
2017

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

M929p Moura, Cleyson Gomes de.
Projeto e Construção de Turbina Eólica de Eixo
Vertical de Pequeno Porte / Cleyson Gomes de
Moura. - 2017.
56 f. : il.

Orientador: Rafael Luz Espíndola.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Mecânica, 2017.

1. Turbina Eólica Vertical. 2. Pequeno Porte.
3. Turbina de Lenz. 4. Dimensionamento. I.
Espíndola, Rafael Luz, orient. II. Título.

CLEYSON GOMES DE MOURA

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL DE
PEQUENO PORTE**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), como exigência final para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador Rafael Luz Espíndola – UFERSA.

APROVADO EM 17/05/2017

BANCA EXAMINADORA



M.Sc. Rafael Luz Espíndola



M.Sc. Diego David da Silva Diniz



Dr. Jackson de Brito Simões

À minha mulher Izabela e ao nosso filho
Apollo.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha incrível mulher, Izabela, que sempre esteve comigo e me ajudou quando eu estava com problemas. Sempre compreendendo os sacrifícios que foram feitos e me trazendo felicidade nos momentos mais árduos.

Agradeço à minha querida e dedicada mãe, Adriana Gomes, meu bravo e trabalhador pai, Claudio Rogério, que estiveram sempre ao meu lado, me educando e me criando da melhor maneira que qualquer filho poderia desejar. Jamais me deixando faltar amor e apoio não importando quantos quilômetros de distância nos separassem.

Ao meu irmão mais velho, Cleyton, que entende um pouco dessa jornada árdua que é uma graduação e é um dos que mais pode compreender esses anos foram difíceis, e como um bom Uchiha sempre me apoiou do seu próprio jeito.

Aos meus irmãos animais Kiko, Chaves, Spike, Blanca, Adão, Shiroy, Nobunaga os animais mais incríveis que eu poderia desejar, que na maioria do tempo me trouxeram felicidade, cada um com sua maneira única de ser.

Ao meus grandes amigos que são a minha outra família e quem posso me orgulhar em ter a amizade de cada um de vocês, pois nossa amizade está além de qualquer desavença que tivemos ou que venhamos a ter: Johnatas, Johny, João Vitor, Wallace, Rute, Míryam, Terceiro, Savio, Pedro, Herbert, Lucas Bacatela, Diego, Lucas Lessa, Júnior, Benedito Neto, Diego Dantas, Jonas entre tantos outros.

Aos meus colegas que juntos entraram comigo nesse túnel longo e demorado e que estão, assim como eu, saindo de cabeça erguida para essa nova fase de desafios e conquistas.

À todos os professores de Engenharia Mecânica, que são muito mais que inestimáveis professores e amigos preciosos.

Por último, não menos importante, ao meu Deus por ter me agraciado com tantas experiências incríveis durante esse tempo e, se ele permitir, que se estendam por muitos anos seguintes.

“One more, Lord. Help me get one more.”

Desmond Doss

RESUMO

Esse trabalho descreve os princípios de funcionamento dos geradores eólicos, tanto de eixo vertical como horizontal, que funcionam fazendo a conversão da energia cinética que as massas de ar carregam em energia elétrica. Com o principal objetivo de produzir uma turbina eólica de eixo vertical de baixo custo que opere em um sistema gerando aproximadamente cinquenta watts de potência por hora, para suprir as necessidades de iluminação mensais de uma residência. Será realizado uma abordagem geral sobre o assunto para que o entendimento do sistema proposto fique mais claro. Uma análise teórica sobre todos os pontos que se farão presente neste trabalho. Na última parte será apresentado como foi a produção do sistema e os resultados obtidos.

Palavras-Chave: Turbina Eólica Vertical. Pequeno Porte. Turbina de Lenz. Dimensionamento.

ABSTRACT

This paper describes the operation principles of wind turbines, either vertical as horizontal axis, which work converting motion energy in the air masses into electricity. With the main goal of craft a low cost vertical axis wind turbine operating in a system generating approximately fifty watts per hour, to meet a residential lighting needs for a month. A theoretical analysis of all points will be present in this paper. In the last part will be showed the system building and the results obtained.

Keywords: *Vertical Wind Turbine. Small Size. Lenz Turbine. Scaling.*

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL – Associação Nacional de Energia Elétrica

TEEH – Turbina eólica de eixo horizontal

TEEV – Turbina eólica de eixo vertical

RPM – Rotação por minuto

PB – Paraíba

CRESEB – Centro de Referência de Energia Solar e Energia Eólica Sérgio de Salvo Brito

IEA – *International Energy Agency*

UFERSA – Universidade Federal Rural do Semi-Árido

WEC – *World Energy Council*

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ – Massa específica do ar

$\dot{m}$ – Fluxo de ar

ω – Velocidade angular

η – Eficiência

C_p – Coeficiente de potência

P_{ex} – Potência extraída

v – Velocidade do vento

A – Área

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Capacidade eólica instalada em 2016.	20
Tabela 2 – TOP10 Potência Instalada até 2016.	21
Tabela 3 – Velocidade do vento durante o ano (50 m).....	32
Tabela 4 – Distribuição de lâmpadas e seus respectivos consumos diários.	32
Tabela 5 – Especificações técnicas do gerador.	34
Tabela 6 – Especificações da corrente adotada.	39
Tabela 7 – Custos envolvidos na produção.	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa velocidade média anual do vento no nordeste.	15
Figura 2 – Primeiro gerador eólico destinado a produção de energia elétrica.	18
Figura 3 – Concentração de CO ₂ observada e prevista em Manua Loa.....	18
Figura 4 – Concentração de CO ₂ na atmosfera previsto para 2017.	19
Figura 5 – Cumulativo do potencial eólico global instalado de 2001 a 2016.	19
Figura 6 - Potencial eólico global instalado de 2001 a 2016.....	20
Figura 7 – Fluxo do ar em uma seção transversal A.....	22
Figura 8 – Dois principais tipos de turbinas eólicas: eixo horizontal (A) e eixo vertical (B). .	24
Figura 10 – Componentes de uma TEEH.	25
Figura 9 – Principais tipos de turbinas de eixo vertical.....	26
Figura 11 – Turbina de Lenz.	27
Figura 12 – Pinhão, coroa e corrente.....	28
Figura 13 – Sistema de polias com mesmo diâmetro.	28
Figura 14 –Sistema de polias A e B, respectivamente.	29
Figura 15 –Instalação adotada por esse trabalho.	35
Figura 16 – Representação do sistema adotado.....	36
Figura 17 – Representação em perspectiva do cano PVC.	37
Figura 18 – Representação da estrutura de fixação pá.	37
Figura 19 – Desenho final da pá.....	38
Figura 20 – Coroa, pinhão e corrente.	38
Figura 21 – Representação do eixo com os rolamentos instalados.	39
Figura 22 – Representação do suporte para o gerador eólico.....	40
Figura 23 – Chapas cortadas.....	40
Figura 24 – Primeiro suporte pronto.	41
Figura 25 – Todos os suportes finalizados.	41
Figura 26 – Cano PVC devidamente cortado.	42
Figura 27 – Estruturas das pás finalizadas.....	42
Figura 28 –Pás devidamente finalizadas.	43

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa do Trabalho	14
1.2	Objetivos	15
1.2.1	Objetivo Geral.....	16
1.2.2	Objetivo Específico	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Histórico	17
2.2	Cenário Atual	18
2.3	Potência do Vento	21
2.4	Tipos de Geradores Eólicos e seus Funcionamentos.....	23
2.5	Verticais x Horizontais	25
2.5.1	Rotores Horizontais	25
2.5.2	Rotores Verticais.....	25
2.6	Turbina de Lenz.....	26
2.7	Roda Dentada	27
2.8	Transmissão de Potência.....	28
2.9	Microgeração	29
3	METODOLOGIA	31
3.1	Fatores para Determinação do Potencial	31
3.1.1	Potencial do gerador eólico	31
3.1.2	Velocidade do vento	32
3.1.3	Necessidade Energética	32
3.2	Dimensionamento.....	33
3.2.1	Potência Média da Turbina	33
3.2.2	Potência do Vento	33
3.2.3	Área Total Necessária.....	34

3.2.4	Altura e Diâmetro	34
3.2.5	Escolha do Gerador	34
3.2.6	Multiplicação de Rotação	35
3.2.7	Instalação	35
3.2.8	Sistema proposto	36
4	MONTAGEM E RESULTADOS	37
4.1	Peças do Gerador Eólico	37
4.1.1	Pás	37
4.1.2	Sistema de transmissão de potência	38
4.1.3	Eixo.....	39
4.1.4	Estrutura de fixação	39
4.2	Montagem.....	40
4.3	Custos	43
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	44
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
7	APÊNDICE	49

1 INTRODUÇÃO

A energia, independente da forma, é o combustível para que qualquer tipo de processo venha a ocorrer. Se observarmos o consumo da bateria de um smartphone teremos um exemplo de como a energia é empregada para diversas atividades: iluminação, processamento, reprodução de sons, etc. Mas, apesar de tão útil, ainda existe um grande problema a ela atrelado. O fato de que não é possível criar energia a partir do nada, segundo a segunda lei da termodinâmica. E isso vem sendo provado cada vez mais devido ao resfriamento do universo (MULLER, 2013) mostrando que devido a energia se conservar, atrelado com a constante expansão, a temperatura tende a cair.

O ser humano por sua vez, conforme aprimorou seus conhecimentos, notou que era possível extrair energia de fenômenos naturais como quedas d'água, luz solar, ondas do mar, vento, etc. Dessa maneira aos poucos foi adaptando sistemas para fazer essa extração de energia. Na idade média, moinhos eram comumente utilizados usando os ventos e as quedas d'água para funcionarem.

A energia eólica é uma destas extrações que é obtida a partir do deslocamento de massas de ar. Apesar da energia eólica ter como combustível base os ventos, o movimento do ar no planeta depende diretamente do aquecimento das regiões próximas à linha do equador e ao resfriamento das regiões próximas dos polos (LOPEZ, 2012).

Porém, em qualquer forma de geração de energia, parte dela sempre será perdida nos processos de conversão, e a energia eólica não é uma exceção. A energia eólica passa por duas conversões antes de se tornar energia elétrica propriamente dita. E isso é um problema, pois apesar de parecer pouco, são suficientes para que parte da energia disponível não seja possível de ser aproveitada. Por esse motivo ainda existe um grande caminho a ser percorrido para que se possa alcançar uma eficiência ainda maior.

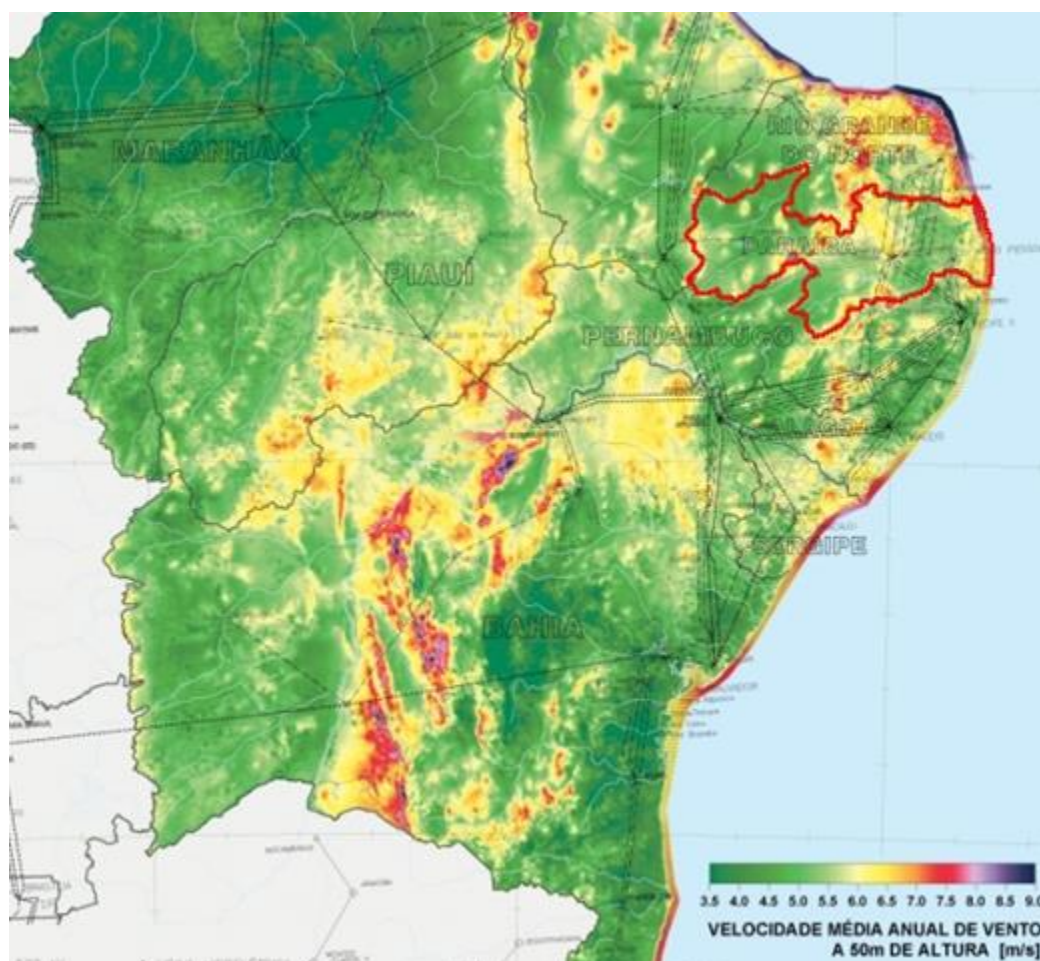
Este trabalho, em seu segundo capítulo, abordará um estudo teórico referente ao funcionamento do gerador eólico e à sua eficiência estimada. O terceiro capítulo será composto por uma apresentação da turbina eólica que esse trabalho tem a finalidade de construir. E no quarto capítulo serão apresentados os resultados obtidos por meio de testes em campo.

1.1 Justificativa do Trabalho

A partir da Figura 1, é fácil notar que o estado da Paraíba (PB) não tem muitas regiões com ventos fortes, mas ainda assim se mostra bastante promissor. Porém, os ventos turbulentos

são um problema, que pode ser contornado com a utilização de turbinas eólicas de eixo vertical, uma vez que elas apresentam funcionamento satisfatório mesmo com esse tipo de vento. Mudanças na temperatura do ar podem criar turbulências devido ao fenômeno da convecção, e reduzir a velocidade do vento e/ou mudar constantemente sua direção, o que torna as turbinas de eixo vertical mais uma vez promissoras, já que as mesmas não sofrem por essa alteração na direção do vento.

Figura 1 – Mapa velocidade média anual do vento no nordeste.



Fonte: Centro de Referência de Energia Solar e Energia Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESEB).

Com a implementação desse sistema, mais dados sobre a velocidade do vento podem ser coletados para melhorar ainda mais os estudos das regiões com uma maior escassez de dados, aumentando ainda mais as pesquisas na área.

1.2 Objetivos

Nesse tópico serão abordados os objetivos base para esse trabalho.

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver o protótipo de um gerador eólico de eixo vertical de baixo custo.

1.2.2 Objetivo Específico

- Obter dados de ventos da região para pesquisas futuras;
- Analisar o potencial eólico do local estudado;
- Dimensionar os componentes do gerador eólico;
- Construir e/ou adquirir os componentes dimensionados
- Analisar o custo da fabricação do gerador eólico.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Histórico

Desde os tempos longínquos, com o avanço da agricultura, o ser humano começou a ver a força dos ventos como um grande aliado em suas necessidades. Os moinhos movidos por vento têm origem remota e incerta (LOPEZ, 2012). No século VII, os persas começaram a utilizar moinhos de vento para atividades agrícolas, apesar de utilizarem um sistema não tão eficaz.

Conforme a sociedade foi evoluindo o ser humano começou a ver novas utilidades para essa captação de energia. A agricultura por muito tempo ainda foi quem ditava as necessidades e suas aplicações, dessa forma iniciou-se o uso dos ventos para moer grãos, passando em seguida para a utilização com fins de bombeamento de água. Com o tempo, cada vez mais opções de utilização foram surgindo: serrarias, fábricas de papel e prensa de grãos para produção de azeites, etc.

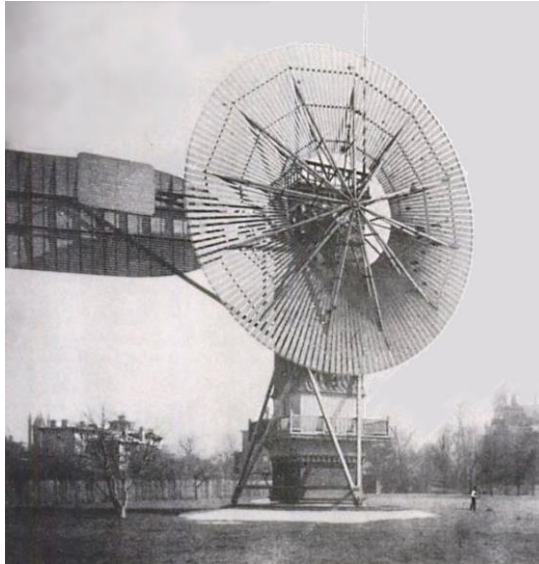
Com o aumento da utilização dessas máquinas, as necessidades por um melhor desempenho começaram a surgir. Assim, as mudanças foram transformando essas máquinas em aparelhos mais práticos. Criaram freios hidráulicos, melhoraram a aerodinâmica, etc. Mas, foi apenas no final do século XX, na Dinamarca, que as turbinas eólicas começaram a ser utilizadas para geração de eletricidade, mas ainda distante de ser algo em uma escala comercial (LOPEZ, 2012).

Somente no ano de 1888, na cidade de *Cleveland, Ohio*, com Charles Brush (1849 – 1929), foi erguido o primeiro cata-vento destinado a geração de energia elétrica. Cata-vento esse que fornecia 12 kW em corrente contínua para o carregamento de baterias. Essa máquina tinha 144 pás, um rotor de 17 metros em uma torre de 18 metros de altura, (Figura 2). A turbina eólica de Brush não ficou conhecida apenas por ser a primeira a gerar energia elétrica, mas também por ser uma das primeiras máquinas a utilizar um fator multiplicador de rotação, relação essa de 50:1. Essa turbina passou cerca de 20 anos funcionando normalmente na geração de energia elétrica (DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION, 2010).

Outro grande passo para o desenvolvimento das turbinas eólicas de grande porte para aplicações elétricas foi dado na Rússia no ano de 1931. Balaclava foi um modelo bastante avançado de 100 kW conectado a uma usina termelétrica de 20 MW. E pela primeira vez na história conseguiu-se conectar um aerogerador de corrente alterna à uma usina termelétrica.

Foram medidos por volta de 280.000 kWh ao ano o que entusiasmou os demais pesquisadores, incitando projetos ainda mais arrojados (BRITO, 2008).

Figura 2 – Primeiro gerador eólico destinado a produção de energia elétrica.

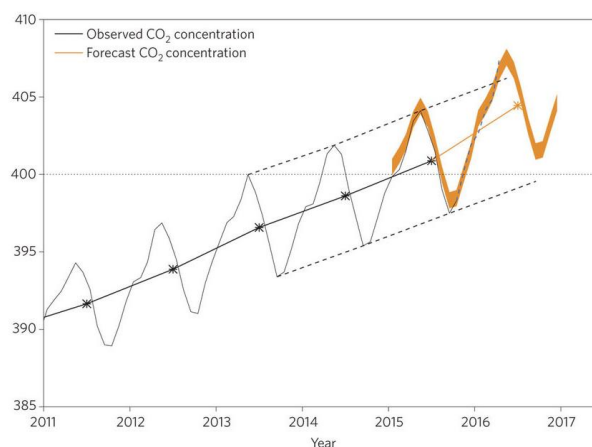


Fonte: (DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION, 2010).

2.2 Cenário Atual

O planeta está vivenciando um dos seus piores momentos. Todos os anos novos recordes em relação a concentração de carbono na atmosfera vem sendo quebrados. Infelizmente isso tudo passa despercebido aos olhos da grande maioria do planeta. Não foi por acaso que o ano de 2016 foi o ano mais quente da história (GISTEMP, 2017). O ano de 2016 foi primeiro a atingir a concentração de 400ppm durante todo o ano, como visto na Figura 3.

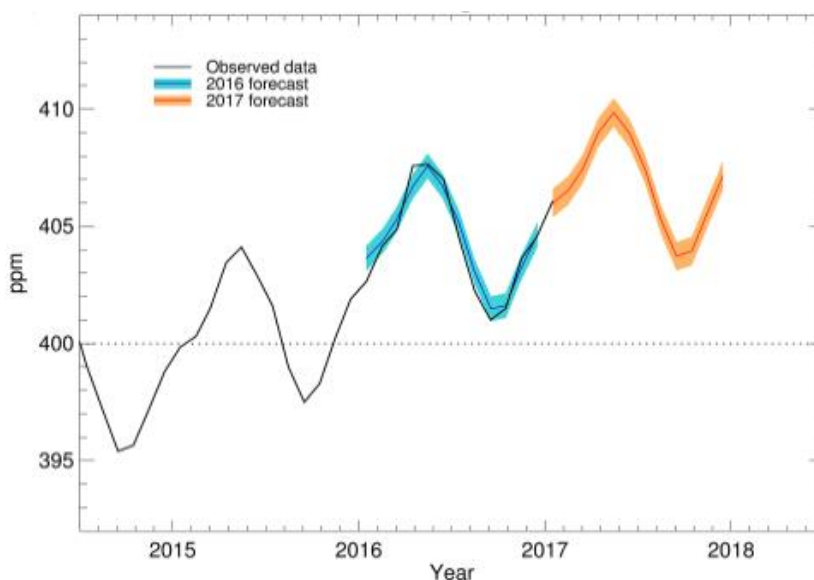
Figura 3 – Concentração de CO₂ observada e prevista em Manua Loa.



Fonte: (BETTS, 2016).

A Figura 4 também mostra uma previsão nada animadora para 2017. É esperado que a concentração de CO₂ aumente ainda mais chegando na casa dos 410ppm (NOAA, 2017). Essas mudanças drásticas que estão ocorrendo fazem com que as energias renováveis, apesar de seus custos ainda elevados, se tornem cada vez mais importantes para a matriz energética mundial.

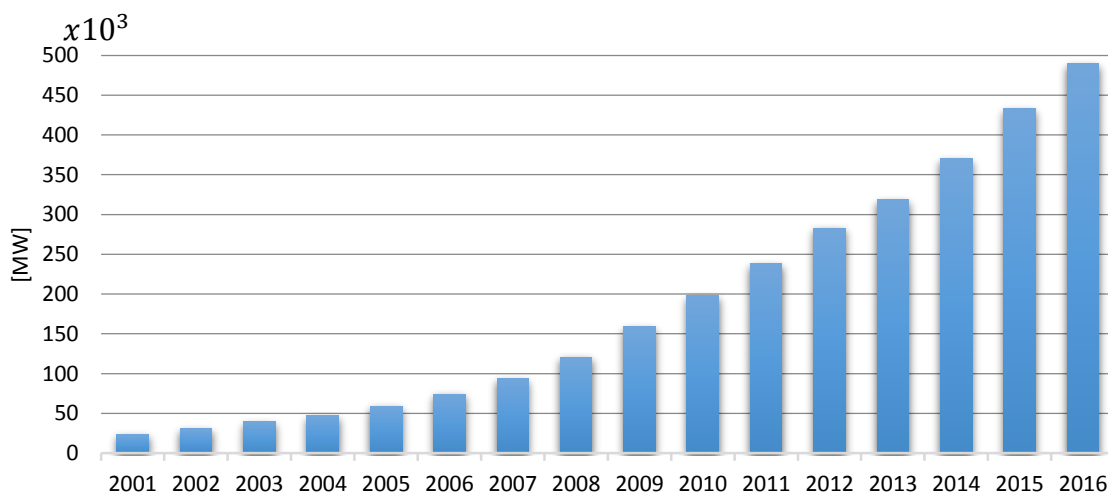
Figura 4 – Concentração de CO₂ na atmosfera previsto para 2017.



Fonte: (NOAA, 2017).

O avanço da energia eólica instalada no mundo entre os anos de 2001-2016 pode ser observado na Figura 5. Os dados da mesma mostram como a energia eólica vem crescendo mesmo em tempos de crise na economia global. No último ano foi alcançada a marca de 486,75 GW instalados em todo o mundo.

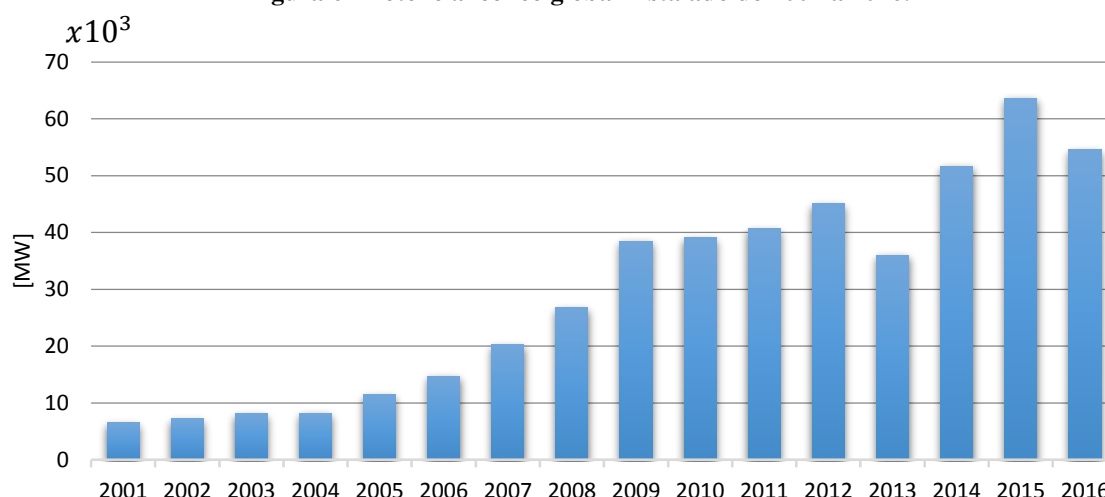
Figura 5 – Cumulativo do potencial eólico global instalado de 2001 a 2016.



Fonte: (GWEC, 2017).

Já a Figura 6 apresenta o potencial instalado anualmente durante 2001-2016. Verifica-se que o ano com maior capacidade instalada até o momento foi 2015, com um total de 63.633 MW (GWEC, 2017). Em alguns anos da série houveram quedas, mas nada muito significativo, pois nos anos seguintes sempre houve uma recuperação. Ao usar esse argumento é esperado que 2017 seja um ano que tenha uma instalação ainda maior que 2015.

Figura 6 - Potencial eólico global instalado de 2001 a 2016.



Fonte: (GWEC, 2017).

O Brasil no ano de 2016 conseguiu chegar a uma importante posição no mundo como visto na Tabela 1. Ele se tornou o quinto país com maior potência eólica instalada entre os meses de janeiro e dezembro de 2016. Apesar do Brasil estar muito distante do patamar que a China ostenta, o mesmo vem se mostrando ativo, já que só no último ano 2 MW foram instalados no país, que representam quase 4% de tudo que foi instalado no mundo.

Tabela 1 – Capacidade eólica instalada em 2016.

País	Potência Instalada (MW)	% Mundial
China	23.328	42,7
Estados Unidos	8.203	15,0
Alemanha	5.443	10,0
Índia	3.612	6,6
Brasil	2.014	3,7

Fonte: (GWEC, 2017).

Infelizmente, o Brasil cai 4 posições, ficando em nono lugar no mundo quando avaliamos toda a potência instalada dos países, como mostra a Tabela 2. Ainda assim é uma

marca significativa para o Brasil que vem crescendo cada vez mais tanto na ampliação da energia eólica como de outras energias limpas.

Tabela 2 – TOP10 Potência Instalada até 2016.

País	Potência Instalada (MW)	% Mundial
China	168.690	34,7
Estados Unidos	82.184	16,9
Alemanha	50.018	10,3
Índia	28.700	5,9
Espanha	23.074	4,7
Reino Unido	14.543	3,0
França	12.066	2,5
Canadá	11.900	2,4
Brasil	10.740	2,2
Itália	9.527	1,9
Total TOP10	411.172	84

Fonte: (GWEC, 2017).

O setor eólico em fevereiro de 2017 representava 7,1% de toda a matriz energética do Brasil. São esperados que até o final de 2020, com a contabilização da usina eólica Tubarão, tenham sido instalados no território brasileiro 17,94 GW (ALMEIDA, 2012).

2.3 Potência do Vento

O termo potência do vento é utilizado para caracterizar a energia total acumulada em uma massa de vento em deslocamento. Para calcular essa potência que o vento carrega, deve-se saber que essa energia está em sua forma cinética (Eq. 1), ou seja, ligada ao movimento, justamente dessa massa de ar, m , à uma velocidade v :

$$E = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (1)$$

Onde:

$E \rightarrow$ energia cinética [J];

$m \rightarrow$ massa do ar [kg];

$v \rightarrow$ velocidade do vento [m/s].

Partindo da Eq.(1), com o intuito de se encontrar a potência do vento (Eq. 2), aplica-se a derivada em relação ao tempo, considerando que a velocidade do vento não varia com o tempo:

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{m \cdot v^2}{2} \right) = \frac{\dot{m} \cdot v^2}{2} \quad (2)$$

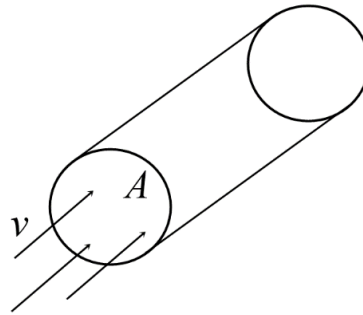
Onde:

$P \rightarrow$ potência do ar [W];

$\dot{m} \rightarrow$ fluxo do ar [kg/s];

$v \rightarrow$ velocidade do vento [m/s].

Figura 7 – Fluxo do ar em uma seção transversal A.



Fonte: (MOURA, 2015).

A partir da Figura 7 pode-se definir $\dot{m}$. Sabendo que o fluxo escalar (Eq. 3) é dado por:

$$Q = v \cdot A \quad (3)$$

Onde:

$Q \rightarrow$ fluxo [m³/s];

$A \rightarrow$ área transversal da seção por onde corre o fluido [m²];

$v \rightarrow$ velocidade do fluido [m/s].

O fluxo de um fluido qualquer pode ser definido utilizando a Eq. (3), sendo necessário multiplicar pela quantidade em massa desse fluido. No caso em questão em que se é utilizado o ar, deve ser utilizado a massa específica ρ (Eq. 4):

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A \quad (4)$$

Onde:

$\dot{m} \rightarrow$ fluxo de ar [kg/s];

$A \rightarrow$ área da seção transversal [m²];

$v \rightarrow$ velocidade do fluido [m/s].

$\rho \rightarrow$ massa específica do ar [kg/m³].

Substituindo a Eq. (4) na Eq. (2), têm-se a Eq. 5:

$$P = \frac{(\rho \cdot v \cdot A) \cdot v^2}{2} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (5)$$

Onde:

$P \rightarrow$ potência do vento [kg/s];

$A \rightarrow$ área da seção transversal [m²];

$v \rightarrow$ velocidade do vento [m/s];

$\rho \rightarrow$ massa específica do ar [kg/m³].

A Eq. (5) apresenta uma ligação direta entre a massa específica do ar e a potência por ela gerada, porém a massa específica do ar (Eq. 6) não é constante e varia com a pressão atmosférica como também com a temperatura, desta forma:

$$\rho = \frac{P_a}{R \cdot T} \quad (6)$$

Onde:

$\rho \rightarrow$ massa específica do ar [kg/m³];

$P_a \rightarrow$ pressão atmosférica [Pa];

$R \rightarrow$ constante dos gases [287 J/kgK];

$T \rightarrow$ temperatura ambiente [K].

2.4 Tipos de Geradores Eólicos e seus Funcionamentos

Para entender o que são geradores eólicos, é de suma importância saber o princípio de funcionamento destas máquinas. Geradores eólicos utilizam a energia cinética do vento para girar suas pás, que estão ligadas a um rotor de uma máquina elétrica que produz energia. Essa máquina elétrica pode ser assíncrona, conhecido como motor de indução, síncrona ou síncrona com ímãs permanentes, estes dois últimos que dispensam a caixa multiplicadora por trabalharem com baixa rotação (ALMEIDA, 2012).

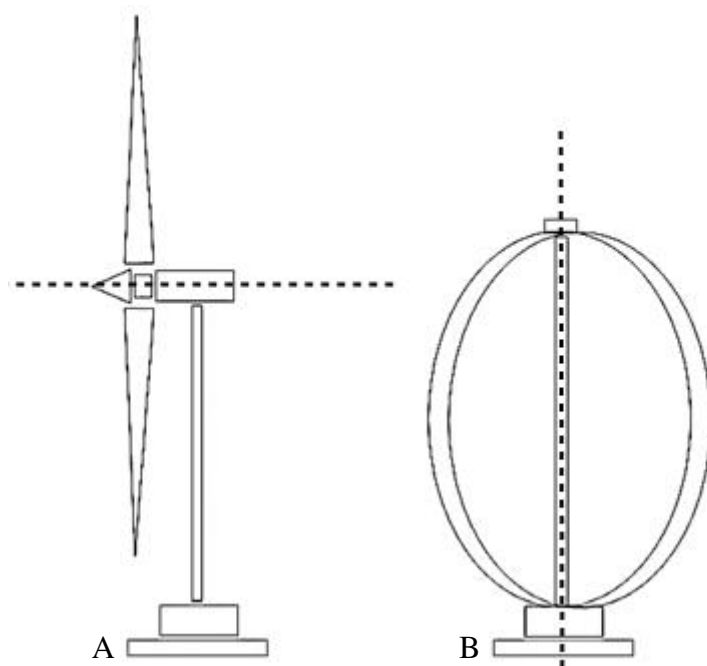
Outro fato importante sobre essas máquinas é saber que elas se dividem em dois grandes grupos: Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal (TEEH) e Turbinas Eólicas de Eixo Vertical (TEEV). A Figura 8 apresenta os dois tipos de turbinas, sabe-se que as TEEH têm o eixo de rotação paralelo ao fluxo do vento, já as TEEV têm o eixo de rotação perpendicular, ou seja,

fazendo um ângulo de 90° com o fluxo do vento. Existem muitos tipos de turbinas, variando desde o tamanho, potência e suas aplicações.

As necessidades são um ponto crucial para determinar qual gerador eólico utilizar, porém o local onde será instalado e o comportamento do vento podem mudar um projeto por completo. Dessa forma a instalação de uma TEEH em um meio urbano se torna mais difícil. Apesar delas terem uma potência maior é necessário maior cuidado ao utilizar esse tipo de gerador eólico. O espaço para a alocação de uma turbina comercial e uma direção constante do fluxo de vento são dois fatores importantes que devem ser considerados ao escolher esse tipo de turbina.

Por esse motivo, as TEEV ganham cada vez mais seu espaço. Pois, diferente das TEEH, elas não precisam de uma direção constante no fluxo dos ventos, já que trabalham bem com ventos turbulentos, que são predominantes em cidades, e por possuírem projetos mais compactos, diminuem os custos finais. As TEEV, assim como as TEEH, apresentam desvantagens, por sua eficiência cair em altas rotações (MENEZES, 2012), consequentemente a capacidade de produzir mais energia cai, tendo assim potência gerada e eficiência menores do que em relação às de um TEEH.

Figura 8 – Dois principais tipos de turbinas eólicas: eixo horizontal (A) e eixo vertical (B).



Fonte: (MOURA, 2015).

2.5 Verticais x Horizontais

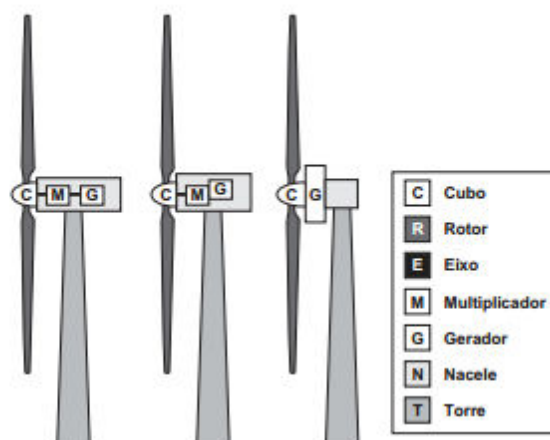
Nesta seção são apresentadas vantagens e desvantagens dos aerogeradores de eixo vertical e horizontal.

2.5.1 Rotores Horizontais

Diferente das TEEV, as TEEH têm funcionamento, processo de montagem e manutenção mais complexos. Dessa forma suas potências e custos são mais elevados em comparação aos rotores verticais. Atualmente, os rotores horizontais são a massa dominante na geração de energia elétrica para fins comerciais. A variedade de empresas que produzem e geram energia através dos ventos faz com que novas tecnologias venham sempre sendo aplicadas nestas máquinas, criando variações nas turbinas o que abrange uma gama maior de aplicações.

A Figura 9 mostra três tipos de geradores eólicos de eixo horizontal com diferentes componentes internos.

Figura 9 – Componentes de uma TEEH.



Fonte: (ALMEIDA, 2012).

2.5.2 Rotores Verticais

As TEEV apesar de não terem a mesma potência das TEEH estão cada vez mais presentes em ambientes urbanos. Esses sistemas de eixo vertical apresentam algumas vantagens sobre os de eixo horizontal: não necessitam de um sistema de alinhamento com o vento, dessa forma têm-se uma diminuição nos custos de produção, assim como também existe diminuição

nos custos no transporte, montagens e manutenção. Outra vantagem é ter o gerador instalado em alturas não muito elevadas e/ou muitas vezes no próprio solo.

As TEEV são capazes de captar os ventos de todas as direções. Conseguem operar em velocidades baixas de vento, e por esse motivo esse tipo de configuração foi adotado neste projeto, já que o local em questão não dispõe de ventos fortes.

Os três tipos de turbinas eólicas de eixo vertical mais comuns são a Savonius, Darrieus, H-Darrieus, apresentados na Figura 10. Apesar de terem a mesma finalidade, cada uma tem suas próprias vantagens e desvantagens.

Figura 10 – Principais tipos de turbinas de eixo vertical.



Fonte: (ALMEIDA, 2012).

O rotor Savonius baseia-se no princípio do acionamento diferencial. Quando o vento entra em contato com a turbina ele gera forças. Como essas forças que o vento exerce sobre as pás atua em duas direções opostas, mas em posições diferentes, isso gera um diferencial de torque que produz uma rotação no sistema (MURPHY, 2012).

Já o rotor Darrieus tem o princípio da variação cíclica de incidência. Como ambos os perfis estão sofrendo uma incidência de diferentes ângulos, a força resultante sobre o sistema tende a gerar uma rotação (X, 2014).

2.6 Turbina de Lenz

Um modelo de TEEV que tem ganhado bastante espaço para fins experimentais e para geração de pequenas potências é o modelo Lenz, desenvolvido por Edwin Lenz. Esse modelo toma como base os princípios e projetos de outras TEEV, como a Darrieus de pás retas e a Savonius, como visto na Figura 11.

Figura 11 – Turbina de Lenz.



Fonte: <https://goo.gl/haF8UB>.

O formato das pás e a forma como elas são posicionadas é baseado na distribuição das pás da turbina Giromill, tendo como diferença que uma das faces da pá não é totalmente fechada, o que a remete ao modelo Savonius. Uma grande vantagem da pá não ser completamente fechada é que, durante a partida da turbina, esse perfil tem um maior arrasto fazendo que a mesma inicie o seu movimento em velocidades baixas de vento.

O princípio de funcionamento das pás é baseado nas forças aerodinâmicas de arrasto e sustentação. O objetivo da combinação sustentação/arrasto é possibilitar a auto-partida da turbina e possibilitar que a turbina alcance proporções maiores de velocidade específica. De acordo com Edwin Lenz a turbina possui uma eficiência boa, podendo chegar aos 41%, o que a torna adequada para aplicações em geração de energia elétrica (MENEZES, 2012).

Porém, não apresenta um bom funcionamento quando submetida a velocidades de vento elevadas. A turbina foi projetada para operar em velocidades baixas de vento. De acordo com Lenz, acima de 9 m/s a turbina não apresenta bom funcionamento e sua eficiência cai consideravelmente.

2.7 Roda Dentada

As rodas dentadas são elementos rígidos com utilização na transmissão de movimentos rotativos através de eixos. Essa transmissão se dá pela ação de correntes que ligam duas rodas dentadas. Devido à rigidez desses elementos algumas características devem ser atendidas, como principal, desalinhamento entre as duas rodas dentadas para que a corrente não venha perder contato. Geralmente esse sistema é denominado de pinhão-coroa, pinhão remetendo à roda dentada menor e coroa à maior. A Figura 12 mostra um exemplo de pinhão, coroa e corrente.

Figura 12 – Pinhão, coroa e corrente.

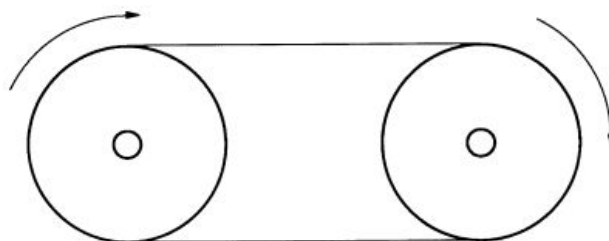


2.8 Transmissão de Potência

Conjuntos formados por rodas dentadas e correntes, assim como os formados por engrenagens, são os grandes responsáveis pela transmissão de rotação entre máquinas. Algumas máquinas elétricas, como os geradores internos das turbinas eólicas, necessitam de altas rotações para que possam gerar energia, porém o número de Rotações Por Minuto (RPM) do rotor de um gerador eólico não é, e nem pode ser, muito rápido por simples motivos de segurança.

Quando se trabalha com polias e/ou rodas dentadas, é necessário fazer com que a máquina elétrica receba a rotação necessária para que funcione corretamente. A velocidade fornecida por um conjunto de transmissão de polias depende da relação entre os diâmetros, desta forma na Figura 13 o resultado dessa interação é que ambas as polias terão o mesmo RPM, independente de quem esteja recebendo a rotação inicial.

Figura 13 – Sistema de polias com mesmo diâmetro.

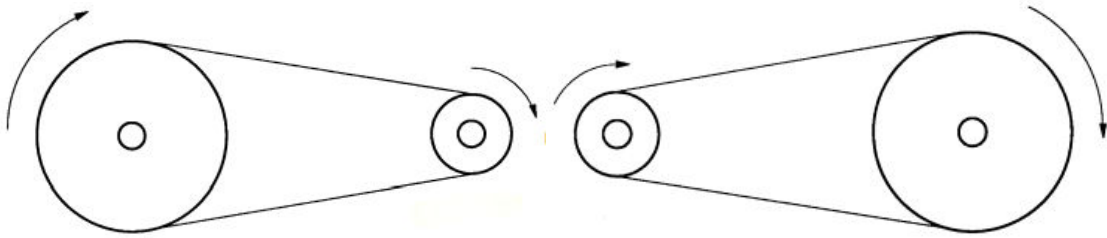


Fonte: (MOURA, 2015).

A Figura 14 mostra dois sistemas de polias, ambos sendo alimentados por um motor nas polias do lado esquerdo, porém cada um dos casos gera um resultado diferente na polia oposta.

No sistema A (esquerda) o resultado vai ser uma maior RPM no lado direito, já no sistema B (direita) será uma menor RPM.

Figura 14 –Sistema de polias A e B, respectivamente.



Fonte: (MOURA, 2015).

O fenômeno que ocorre em ambos os casos pode ser expresso pela relação matemática (Eq. 7) (MOURA,2015):

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{D_2}{D_1} \quad (7)$$

Onde:

$n_{1,2} \rightarrow$ rpm das polias motora e movida, respectivamente;

$D_{2,1} \rightarrow$ diâmetro das polias movida e motora.

O mesmo acontece em rodas dentadas (Eq. 8). A relação de transmissão é quase a mesma, trocando apenas os valores dos diâmetros na equação (7) pelo número de dentes das rodas dentadas, mas para essa equação ser válida, as duas rodas dentadas precisam ter o mesmo módulo, dessa forma têm-se que:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (8)$$

Onde:

$n_{1,2} \rightarrow$ rpm do pinhão e da coroa, respectivamente;

$Z_{2,1} \rightarrow$ número de dentes das rodas dentadas.

2.9 Microgeração

Com o crescimento da energia eólica o uso desses geradores eólicos vem se tornando algo cada vez habitual. Inclusive a geração de energia deixou de ser algo utópico e se tornou realidade. Vários consumidores vêm investindo em aerogeradores residenciais e painéis solares para a produção da sua própria energia, ajudando cada vez mais o meio ambiente e dando uma

ajuda na conta ao final do mês. Os consumidores já não enxergam esses sistemas isolados de geração de energia como um gasto desnecessário, mas sim como um investimento rentável. Esses sistemas não são exclusivamente elétricos. De forma geral, a presença de pequenos geradores próximos às cargas pode proporcionar diversos benefícios para o sistema elétrico, tais como: baixo investimento em expansão da rede, baixo impacto ambiental, melhoria do nível de tensão da rede no período de alta carga e a diversificação da matriz energética (ANEEL, 2014).

O Brasil no ano de 2016 teve um rápido crescimento no número de novas conexões de microgeração. Eram 5.040 conexões em agosto de 2016, contra as 1.148 ligações registradas em setembro de 2015, o que representa uma potência instalada de 47.934 kW apenas de mini e microgeradores. A microgeração entrou em vigor no Brasil pela resolução normativa ANEEL nº 482/2012. A norma estabeleceu as condições gerais para o acesso de micro e minigeração a todos os sistemas de distribuição de energia elétrica. Assim como também criou o sistema de compensação de energia elétrica, que é quem permite o consumidor instalar pequenos geradores em sua residência e trocar energia com a distribuidora local (ANEEL, 2017).

3 METODOLOGIA

Nesta seção é apresentada a metodologia seguida e o dimensionamento do aerogerador a ser construído.

3.1 Fatores para Determinação do Potencial

Sabendo que em qualquer projeto o objetivo é alcançar os resultados, este terá como objetivo suprir a energia demandada pela iluminação de uma residência.

3.1.1 Potencial do gerador eólico

Como abordado na seção 2.3, pela Eq. (5), viu-se que a potência que uma massa de ar carrega é:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (5)$$

Porém, o que um gerador eólico consegue gerar de energia é um valor menor que a energia carregada pelo ar, devido ao próprio funcionamento das turbinas eólicas. Segundo o físico Albert Betz em 1919, a máxima quantidade de energia cinética que pode ser convertida por uma turbina eólica em energia mecânica no rotor é 59.3 %. Esse é o limite de Betz (MOURA, 2015). Além disso é necessário considerar a eficiência mecânica do sistema e a eficiência elétrica do gerador.

Dessa forma, pode-se definir a equação real (Eq. 9) para a conversão de energia:

$$P_{ex} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \quad (9)$$

Onde:

$C_p \rightarrow$ coeficiente de potência;

$A \rightarrow$ área da seção transversal [m²];

$v \rightarrow$ velocidade do vento [m/s];

$\eta_{1,2} \rightarrow$ eficiência elétrica e mecânica, respectivamente;

$\rho \rightarrow$ massa específica do ar [kg/m³].

O coeficiente de potência pode ser escrito a partir das Eqs. 5 e (9) como a Eq. 10:

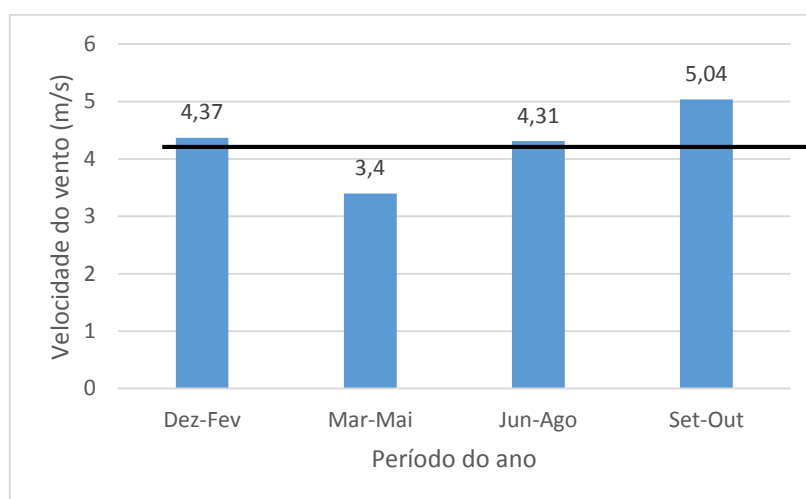
$$C_p = \frac{P_{ex}}{P} \quad (10)$$

Apesar do valor teórico de Betz ser aproximadamente 60%, nos problemas reais de engenharia, quando outros fatores que inserem perdas são adicionados, o valor do coeficiente de potência dos geradores eólicos varia em torno de 35~45% e quando adiciona-se as perdas na conversão elétrica, aproveita-se apenas 10~30% de energia convertida.

3.1.2 Velocidade do vento

Um dos desafios no cálculo de quanta energia aproximadamente vai ser gerada é determinar com exatidão a velocidade do vento já que o vento costuma variar bastante diariamente. A Tabela 3 apresenta valores para a velocidade do vento numa altura de cinquenta metros, com uma média anual de 4,28 m/s, em um ponto da cidade de Paulista – PB.

Tabela 3 – Velocidade do vento durante o ano (50 m).



Fonte: CRESESB.

3.1.3 Necessidade Energética

Para definir a necessidade energética será avaliado a quantidade de lâmpadas na residência, suas respectivas potências e o tempo de uso diário. A residência adotada para as observações deste trabalho será a própria residência do autor. Ao observar a Tabela 4 podemos ver a distribuição das lâmpadas a serem avaliadas nesta residência.

Tabela 4 – Distribuição de lâmpadas e seus respectivos consumos diários.

Aparelho	Quantidade	Tempo de uso (h)	Potência (W)
Lâmpada	3	4	20
Lâmpada	2	3	20
Lâmpada	3	0,5	20
Total	8	19,5	---

Avaliando os dados da Tabela 4 é possível chegar ao valor de 0,39 kWh/dia, ou seja, se faz necessário uma turbina projetar a turbina usando esse valor como base.

3.2 Dimensionamento

A proposta é obter um gerador eólico que forneça energia constante para a iluminação de uma residência. A partir daí, será realizado o dimensionamento.

3.2.1 Potência Média da Turbina

A potência média é justamente o valor que será necessário ser gerado pela turbina para que seja possível atender a demanda diária sem ter nenhum déficit de energia. Para se alcançar esse valor é preciso usar como base o consumo diário encontrado no item anterior e o tempo diário de ventos satisfatórios para geração de energia.

Para este trabalho será adotado o valor de 10 h diárias de ventos satisfatórios e assim, dividindo o consumo diário por esse valor, chega-se à 39 W.

3.2.2 Potência do Vento

Para a determinação das dimensões da turbina, primeiramente será calculada a potência do vento necessária para a conversão, que é dada pela Eq. 11:

$$P = \frac{P_{med}}{C_p \cdot \eta_1 \cdot \eta_2} \quad (11)$$

O coeficiente de potência das turbinas Giromill no mercado atual variam entre 40% a 45% (MENEZES, 2012), para velocidades nominais do vento entre 8 a 13 m/s. Para velocidades do vento baixas entre 3 a 6 m/s, a eficiência pode variar de 20% a 30% (CASTILLO, 2011). Para este projeto será considerada uma eficiência de 23% por ser um valor um pouco abaixo da média de 20 e 30. Os geradores normalmente apresentam um rendimento de até 95% (MENEZES, 2012). Para este projeto será considerada uma eficiência de 90%, por ser um valor normalmente encontrado para essas máquinas. A eficiência do sistema de transmissão tende variar de 95 a 99% (TEIXEIRA, 2006). Para este projeto será considerada uma eficiência de 98%, por ser um valor intermediário.

Empregando os valores adotados e utilizando a Eq. 12 tem-se:

$$P = \frac{39}{0,23 \cdot 0,9 \cdot 0,98} = 192,25 \text{ W} \quad (12)$$

3.2.3 Área Total Necessária

Para definir a área total necessária para que a turbina possa converter essa energia será utilizada a Eq. 5, dessa forma tem-se a Eq. 13:

$$A = \frac{2 \cdot P}{\rho \cdot v^3} = \frac{2.192,25}{1,225 \cdot 4,28^3} = 4,00 \text{ m}^2 \quad (13)$$

3.2.4 Altura e Diâmetro

Nesse momento se fez necessário limitar uma das duas variáveis. Para este projeto foi adotado o valor de 1,6 m para o diâmetro do rotor, dessa forma é necessário encontrar a altura do rotor. Portanto, é preciso utilizar a fórmula da área projetada de um cilindro (área de um retângulo) para chegar ao valor da altura.

Utilizando o valor de área que foi encontrado, considerando que ela é dada pela área projetada do rotor na direção do vento (Eq. 14), e utilizando o diâmetro definido, a altura pode ser calculada como sendo (Eq. 15):

$$A = h \cdot D \quad (14)$$

$$h = \frac{A}{D} = \frac{4,00}{1,6} = 2,50 \text{ m} \quad (15)$$

A altura total do rotor da TEEV será de 2,5 m, dessa maneira cada pá terá um suporte na altura de 1,25 m para uma melhor sustentação.

3.2.5 Escolha do Gerador

Para a escolha do gerador foram avaliados alguns parâmetros, como a necessidade energética, preço de mercado, disponibilidade etc. Assim chegou-se ao modelo MQ500M6, que tem suas principais especificações listadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Especificações técnicas do gerador.

Modelo	Marca	Tensão (V)	Corrente (A)	Rotação (RPM)	Potência (W)
MQ500M6	Qualitas	127	3	1160	745

3.2.6 Multiplicação de Rotação

A multiplicação se faz necessário para levar uma maior rotação ao gerador e assim fazê-lo fornecer melhor a energia. Para chegar à relação de transmissão, será utilizada a Eq. 8. Os modelos de coroa e pinhão deste trabalho foram adotados por maior facilidade de obtenção no mercado local. Sabendo que a coroa possui 35 dentes, o pinhão 15 (mesmo módulo) e a rotação ideal para o gerador é de 1160 rpm, isolando a rotação um tem-se (Eq. 16):

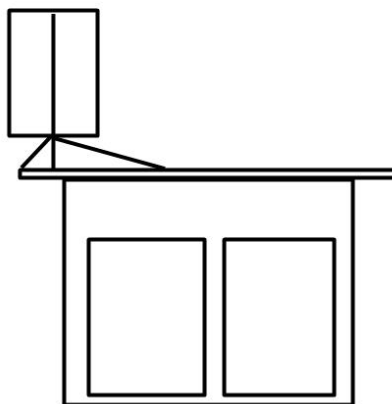
$$\frac{n_1}{1160} = \frac{15}{35} \Rightarrow n_1 = 497 \text{ rpm} \quad (16)$$

Dessa forma, utilizando essa relação de transmissão, para conseguir gerar energia na potência nominal do gerador a turbina terá que alcançar uma rotação de 497 rpm.

3.2.7 Instalação

A altura adequada para a instalação seria o quão mais alto fosse possível, para assim tentar buscar ventos mais satisfatórios. Como o presente trabalho tem o objetivo de produzir um gerador eólico de baixo custo, será necessário que sua instalação seja acima da residência, para dessa forma já diminuir os gastos com uma estrutura maior. Outro fator da escolha do local de instalação foi porque esse local apresenta um lago próximo, o que ajuda os ventos a desenvolverem uma melhor velocidade. Assim como a turbina será instalada em uma laje, permitindo fácil acesso e instalação, e também possibilitando a futura instalação de novas turbinas. A Figura 15 mostra como seria, na prática, essa instalação.

Figura 15 –Instalação adotada por esse trabalho.



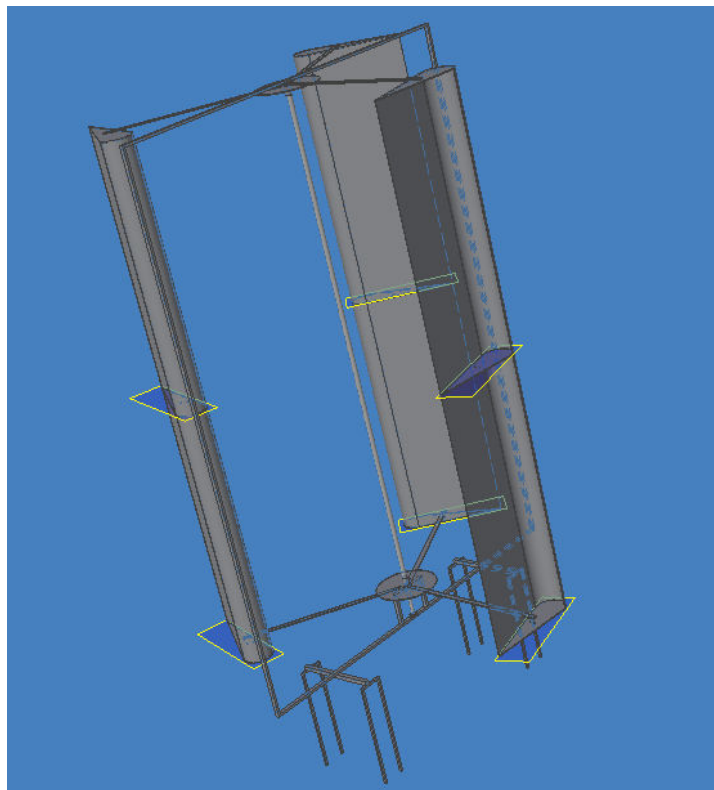
3.2.8 Sistema proposto

O sistema foi desenvolvido em três partes, que estão ligadas a cada processo de conversão de energia. A primeira parte, como em todo gerador eólico, consiste em receber em suas pás a energia que o vento carrega. Então ocorre a conversão da energia cinética para energia de rotação do rotor. Mesmo com o limite de Betz mostrando que o máximo que pode ser convertido está em torno de 60 %, as máquinas atualmente produzidas só conseguem alcançar até 45 % e essa talvez seja uma das maiores barreiras para o desenvolvimento da energia eólica.

O rotor faz com que seu eixo entre em movimento, criando assim uma rotação no sistema multiplicador. A coroa entra em movimento e através de uma corrente que a liga ao pinhão e por meio do fenômeno apresentado no item 2.8 deste trabalho, as rotações crescem para que assim o gerador possa funcionar sem problemas.

A Figura 16 mostra a representação da turbina eólica montada. O que foi apresentado anteriormente sobre a multiplicação de rotação acontece na base do gerador eólico. Então através de cabos a energia elétrica produzida pelo gerador é transportada até a bateria que será carregada ou enviada para a rede elétrica.

Figura 16 – Representação do sistema adotado.



4 MONTAGEM E RESULTADOS

Nesta seção é apresentada a construção e montagem do gerador eólico dimensionado na Seção 3.

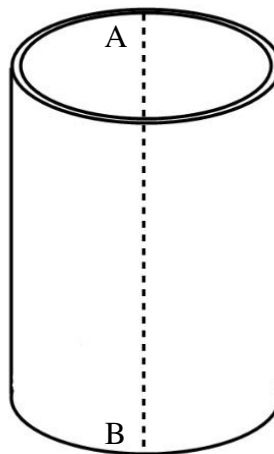
4.1 Peças do Gerador Eólico

Nesta seção é apresentada a fabricação das peças que compõem o gerador eólico

4.1.1 Pás

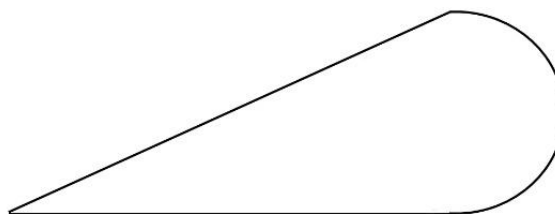
As pás foram confeccionadas a partir de um cano PVC de 150 mm sendo cortado como na linha AB na Figura 17 e barras chatas $\frac{1}{2}$ " x $\frac{1}{8}$ " de aço.

Figura 17 – Representação em perspectiva do cano PVC.



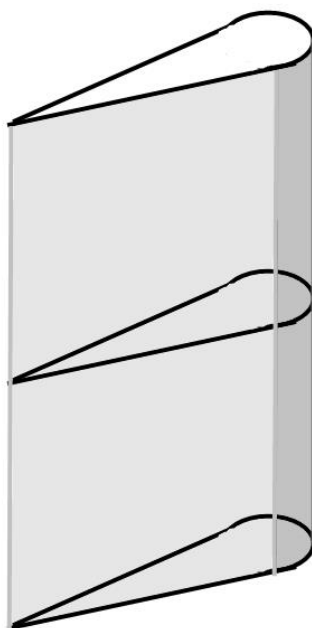
Em seguida um dos pedaços do cano de PVC deve ser fixado à estrutura mostrada na Figura 18.

Figura 18 – Representação da estrutura de fixação pá.



Com o cano devidamente cortado, seguindo o que foi mostrado nas Figura 17 e Figura 18, cada pá deve ficar como apresentado na Figura 19, cinza claro representando a fita adesiva e o cinza escuro representando o cano de PVC.

Figura 19 – Desenho final da pá.



Para melhor fixação, estruturas verticais foram implementadas e devidamente fixadas. Para maiores detalhes, verificar o apêndice.

4.1.2 Sistema de transmissão de potência

As rodas dentadas fazem parte de uma região facilmente alterável do projeto, pois ficam fora do rotor. Por questões de disponibilidade de mercado foi adotado uma coroa com 35 dentes, um pinhão de moto com 15 dentes, assim com uma corrente, todos apresentados na Figura 20.

Figura 20 – Coroa, pinhão e corrente.



Para que o sistema funcione é necessária uma corrente fazendo a ligação. A corrente escolhida está especificada na Tabela 6 – Especificações da corrente adotada. Essa corrente (Figura 20), foi a que melhor se encaixou nas necessidades do projeto e ainda teve um bom custo.

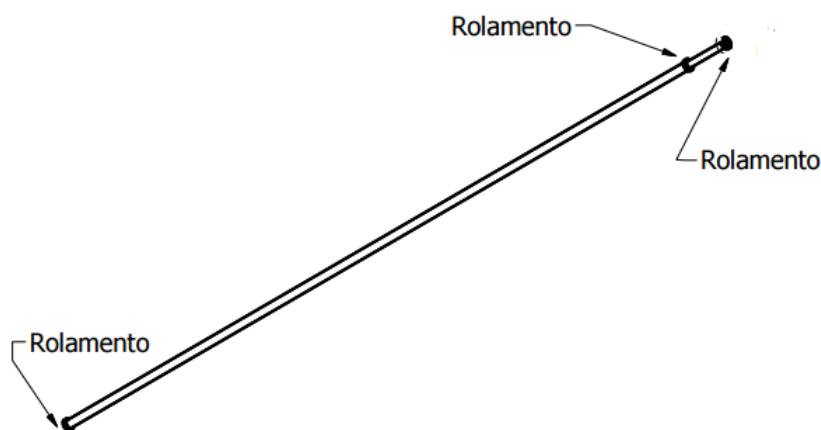
Tabela 6 – Especificações da corrente adotada.

Marca	Modelo	Passo (in)
Vaz	Rks1045	½

4.1.3 Eixo

Para completar o funcionamento do sistema mecânico de rotação é necessário um eixo central. O eixo adotado é de aço 1020 com diâmetro de 1” e comprimento de 2,6 m. O eixo deve ser devidamente usinado para que se faça a instalação de 3 rolamentos, dois de 25mm de diâmetro interno e um de 20mm, escolhidos por disponibilidade no mercado local e facilitação de instalação, como mostrado na Figura 21. Para maiores detalhes, verificar o apêndice.

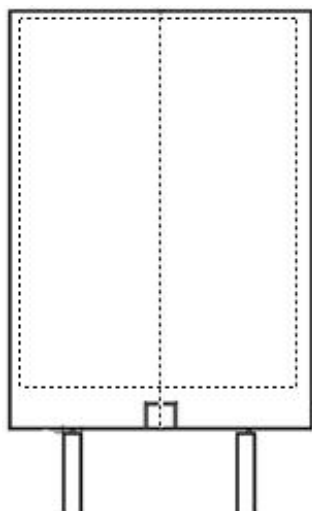
Figura 21 – Representação do eixo com os rolamentos instalados.



4.1.4 Estrutura de fixação

A estrutura de fixação tem como função assegurar que o gerador eólico fique bem estável para que assim possa receber os ventos sem complicações, assim como servir de apoio para os rolamentos do eixo. Para esse projeto foi adotada uma estrutura em tubos 20x20 de aço 1020 em conjunto de uma base em cantoneiras 3/16”, também em aço 1020. Ao final da confecção o suporte deve ficar como apresentado na Figura 22. Para maiores detalhes, verificar o apêndice.

Figura 22 – Representação do suporte para o gerador eólico.



4.2 Montagem

A primeira parte da produção foram as pás. Se fez necessário a produção do primeiro molde em papelão, como apresentado na Figura 18, para assim ser produzido o primeiro molde em aço. Após isso todas as chapas foram cortadas, como apresentado na Figura 23.

Figura 23 – Chapas cortadas.



Em seguida as barras $\frac{1}{2}'' \times \frac{1}{8}''$ foram cortadas com o auxílio de uma tesoura manual em pedaços de 69 cm. Em seguida cada pedaço foi furado em 2 locais com o auxílio de uma furadeira de coluna e um broca $\frac{1}{4}''$. Logo após foram dobradas para seguirem o modelo da chapa então o processo de soldagem iniciou.

Após alinhar a barra com a chapa e soldar, o suporte ficou como na Figura 24. Para fazer as soldas foi utilizada uma máquina de solda MIG da marca Merkle Balmer, modelo MB 350K.

Figura 24 – Primeiro suporte pronto.



Após todas as peças serem soldadas, foi feito o acabamento no poli corte para remoção de cantos vivos e discontinuidades. A Figura 25 apresenta todos os suportes devidamente finalizados.

Figura 25 – Todos os suportes finalizados.



Com todos os suportes finalizados, fez-se necessário novamente o corte de barras $\frac{1}{2}$ " x $\frac{1}{8}$ ", dessa vez com 2,5 m de comprimento, para serem fixadas às extremidades dos suportes. Em seguida o cano PVC foi cortado em pedaços de 2,5m e em seguida ao meio, como apresentado na Figura 17, ficando como mostrado na Figura 26.

Figura 26 – Cano PVC devidamente cortado.



Em seguida se deu início a fixação dos suportes ao cano PVC. Foram utilizados 3 suportes por cano, um em cada extremidade e um no centro. Após todos prontos, ficaram como na Figura 27.

Figura 27 – Estruturas das pás finalizadas.



Com as estruturas das pás prontas, foi utilizado a fita adesiva para criar o perfil da pá, ou seja, fechando um dos lados, e em seguida aquecendo para gerar um perfil com melhor acabamento, assim cada pá ficou como na Figura 28.

Figura 28 –Pás devidamente finalizadas.



Com as 3 pás prontas, se dá início a produção do eixo. Este processo se inicia cortando a barra circular de aço em um tamanho de 2,7 m. Em seguida foi corretamente posicionada no torno para iniciar a usinagem, garantindo o tamanho final devido ao furo da contra ponta.

O eixo deve ser usinado nas duas extremidades de modo a que os rolamentos possam ser fixados. Após todos os processos de usinagem deve-se produzir dois suportes em formato de flange, para receberem as pás, nas duas extremidades do eixo, assim como fazer as adaptações necessárias para que a coroa possa ser fixada ao eixo.

Com o eixo finalizado se dá início a produção da estrutura que vai fixar o gerador ao solo. A manufatura não apresenta grandes dificuldades, apenas o cuidado para que os rolamentos sejam alinhados com a estrutura. Ao final dos processos, dois cabos de aço devem ser presos nas laterais para garantir que a estrutura não venha a oscilar com o vento.

Após todos esses processos, o gerador pode ser instalado e assim dar início a geração de energia.

4.3 Custos

Para a produção do projeto, foi necessário adquirir muitos materiais, porém muitos custos foram reduzidos devido as doações das microempresas Cláudio Serralheria, Tormaq, Serraria União e Israel Motos. Além das doações, todas as empresas se prontificaram durante a produção, auxiliando e ajudando quando necessário. Custos com mão de obra também foram

evitados, já que a produção foi feita pelo próprio autor desse trabalho. Para melhor entendimento, a Tabela 7 apresenta todos os gastos com o projeto, excluindo custos associados a ferramentas (os itens com asterisco representam quais foram recebidos por doação).

Tabela 7 – Custos envolvidos na produção.

Item	Quantidade	Preço Un. [R\$]	Preço [R\$]
Cantoneira 3/16" - 1020*	3m	5,00	15,00
Rolamento FAG 6305 2Z	2	17,50	35,00
Rolamento CK 6204Z	1	10,00	10,00
Coroa 35 dentes*	1	35,00	35,00
Pinhão 15 dentes*	1	25,00	25,00
Corrente Rks1045*	1	15,00	15,00
Eixo 1" - 1020*	2,7m	14,00	35,00
Parafuso rosca 1/4" c/porca	22	0,40	8,00
Chapa 18 - 1020*	1	70,00	70,00
Fita Adesiva 7,14mm	3	2,50	7,50
Cabo de Aço 18PAAS1	6m	1,30	8,00
Cano PVC Esgoto - 150 mm	5m	18,00	90,00
Barra 1/2" x 1/8" - 1020*	22m	1,30	29,00
Tubo 20x20 - 1020*	9m	6,30	57,00
Motor Elétrico MQ500M6*	1	80,00	80,00
TOTAL			519,50

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Vale enfatizar que, o projeto pode ser facilmente adaptado para os fins desejados por qualquer um. O objetivo era a produção de uma turbina de baixo custo que fosse capaz de suprir as necessidades de iluminação de uma residência. Apesar de todas as dificuldades o conhecimento gerado é imensurável para a vida acadêmica e profissional.

Por problemas no fornecimento de matéria prima o protótipo não foi concluído a tempo, porém fica evidente que o projeto possui uma boa viabilidade técnica. O custo final da turbina foi baixo levando em conta o tamanho da turbina produzida. Em regiões com ventos um pouco melhores, na faixa dos 5 a 6 m/s, para gerar a mesma potência que a turbina aqui apresentada, seu tamanho variaria entre 0,9 e 1,6 m de altura, fazendo os custos caírem ainda mais.

Infelizmente para fazer a análise definitiva da viabilidade do projeto para a região escolhida, no interior da Paraíba, seria necessário no mínimo um mês de testes de campo para constatar sua capacidade real de geração. Mas fica como uma proposta para um trabalho futuro, fazer a análise da viabilidade financeira desta turbina para regiões com ventos fracos.

Como propostas para trabalhos futuros fica também a adaptação desse mesmo projeto com a troca parcial ou total do sistema de transmissão de potência e fazer a inserção de um gerador de ímã permanente, para que possa gerar energia com qualquer rotação. Assim como dar continuidade ao trabalho, construindo novas turbinas e criando uma mini fazenda eólica. Para futuramente fazer o contrato com a rede distribuidora de energia para assim criar um local de micro geração trazendo cada vez mais lucros e cobrindo os custos de fabricação das turbinas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEEÓLICA, Dados Mensais – Fevereiro de 2017. 2017.
- ALMEIDA, Bruno Ricardo de. **Sistema de controle digital para WECS de eixo vertical**. 2012. Tese de Doutorado.
- ANEEL. **Brasil ultrapassa 5 mil conexões de micro e minigeração**. Disponível em: <https://goo.gl/yBqepB>. Acesso em: 20/04/2017.
- ANEEL, Cadernos Temáticos. Micro e Minigeração Distribuída. **Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Brasília, DF, Brasil: Centro de Documentação–Cedoc**, 2014.
- AMARANTE, Odilon; SILVA, Fabiano; FILHO, Luiz. **Potencial eólico do estado do Rio Grande do Norte**. Rio Grande do Norte. Cosern, 2003.
- BETTS, Richard A. et al. El Nino and a record CO2 rise. **Nature Climate Change**, 2016.
- BRITO, Sérgio de Salvo. Energia Eólica. Princípios e Tecnologias. **Centro de Referência para Energia Solar e Eólica, Equipe CEPEL/CRESESB**, 2008.
- CASTILLO, Javier. “Small-scale Vertical Axis Wind Turbine Design”. 54p. Bachelor’s Thesis (Degree Programme in Aeronautical Engineering). Tampere University of Applied Sciences, December 2011.
- MOURA, Cleyson Gomes de. **Projeto de turbina eólica de eixo horizontal de baixo custo**. 2015. 56 f. Monografia (Graduação em Ciência e Tecnologia)- Universidade Federal Rural do Semi Árido, Caraúbas, 2015.
- DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION et al. A wind energy pioneer: Charles F. Brush. 2010.
- DUTRA, Ricardo. **Energia Eólica: Princípios e Tecnologias**. CRESESB. 2008.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J.. **Introduction to Fluid Mechanics**. ed. 5. John Wiley & SonsCanada - Ltd, 1998.

GISTEMP Team, 2017: GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP). NASA Goddard Institute for Space Studies. Disponível em: <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>. Acesso em: 14/03/2017.

GWEC, Global Wind Energy. Global Wind Statistics 2016. 2017.

HALLIDAY, David; RESNIK, Roberto; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física: Mecânica**. Traduzido por Ronaldo Sérgio de Biasi. vol. 1. ed. 8. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

HIRAHARAA, H. et al. **Testing basic performance of a very small wind turbine designed for multi-purpose**. Renewable Energy 30, 2005. p. 1279 - 1297.

JÚNIOR, Auteliano. **Engrenagens Clíndricas de Dentes Retos**. Campinas. UNICAMP, 2002. p. 2-3. Apostila.

JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M.,1991. **Fundamentals of machine component design**. ed. 2. John Wiley & Sons Canada - Ltd, 1991.

LINO, Paulo. Polias, Correias e Transmissão de Potência. 2013, 15 f. Apostila.

LOPEZ, Ricardo Aldabo. **Energia Eólica**. ed. 2. Artliber, 2012.

MENEZES, Ana Elisa da Silva. **APROVEITAMENTO EÓLICO PARA UMA VILA DE PESCADORES**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

MOORI, Daniel; FORTES, João; MOLON, Leandro. **Micro Turbinas Eólicas de Baixo Custo**. Trabalho apresentado ao VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande, 2010.

MULLER, Sebastien et al. A precise and accurate determination of the cosmic microwave background temperature at $z=0.89$. **Astronomy & Astrophysics**, v. 551, p. A109, 2013.

MURPHY, Gary. **Savonius wind turbine**. U.S. Patent Application n. 14/007,189, 26 mar. 2012.

NEVES, Eurico *et al.* Introdução ao Estudo da Energia Eólica. Pelotas. Universidade Federal de Pelotas, 2009. p.34-37. Apostila.

NOAA National Centers for Environmental Information, State of the Climate: Global Analysis for January 2017. Disponível em: <http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201701>. Acesso em: 01/03/2017.

NOGUEIRA, Larissa. **Estado Atual e Perspectivas Futuras para a Indústria Eólica no Brasil**. 2011. 137. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético, 2011.

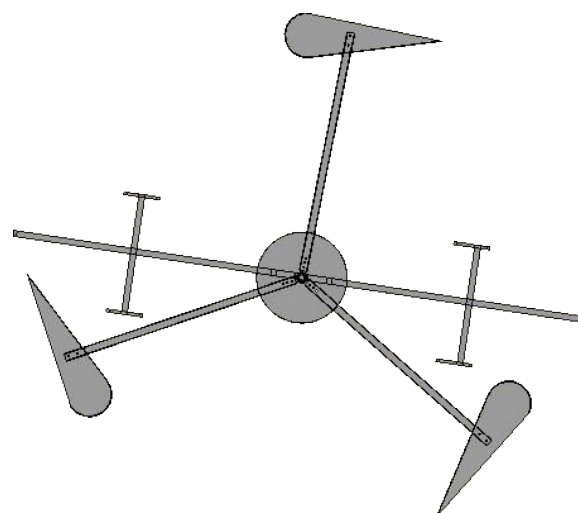
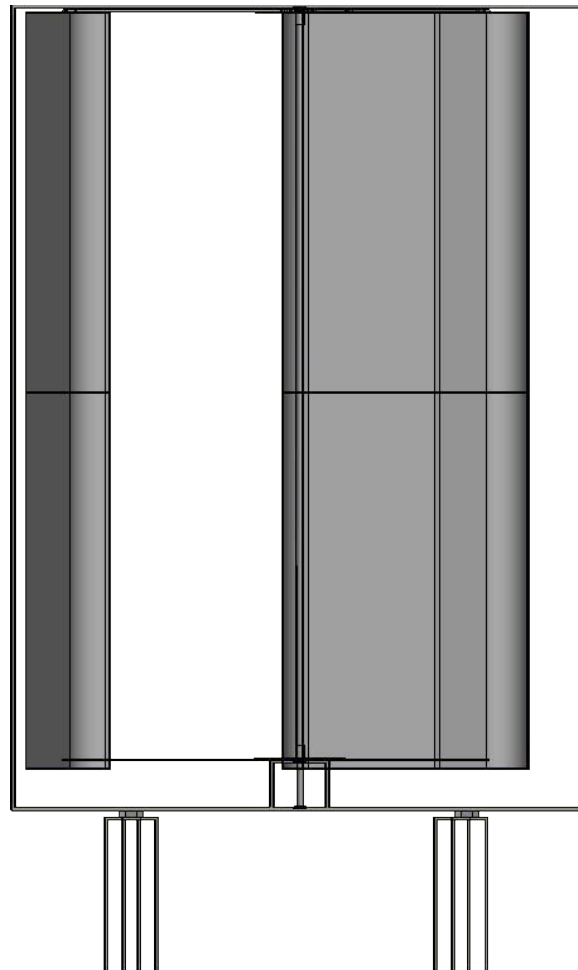
TEIXEIRA, Mauri M.; RUAS, Renato A. A.. “Mecanismos de Transmissão de Potência e Lubrificantes”. Departamento de Engenharia Agrícola, Área de Mecanização Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Novembro de 2006.

TIBOLA, Gabriel. **Sistema Eólico de Pequeno Porte para Geração de Energia Elétrica com Rastreamento de Máxima Potência**. 2009. 285. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

WOOFENDEN, Ian. **Wind Power for Dummies**. Canadá: Wiley Publishing, Inc., 2009.

X, Jin *et al.* Darrieus vertical axis Wind turbine: Basic research methods. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, EUA, 5 out. 2014. p. 212-225.

7 APÊNDICE



Todos os valores estão em milímetros*



Gerador Eólico Vertical

Engenheiro:
Cleyson Gomes de Moura

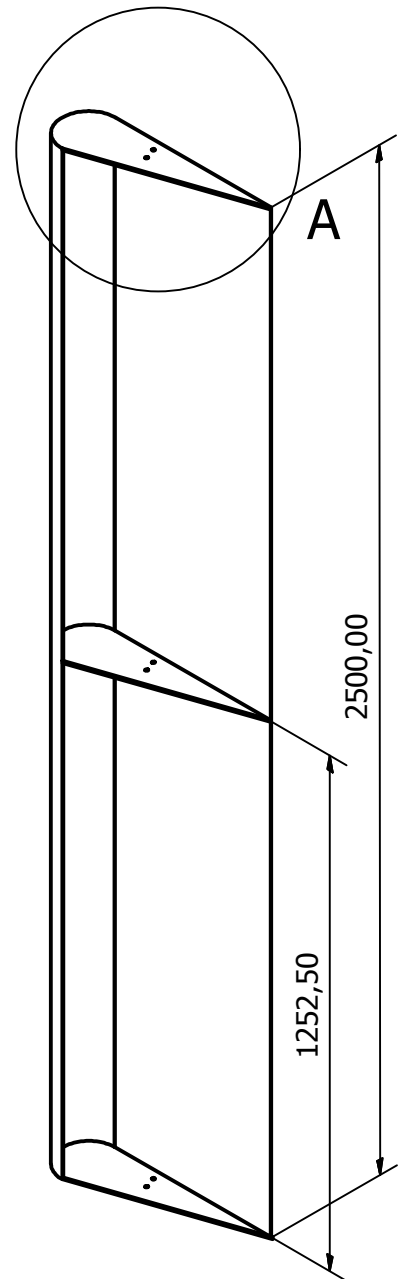
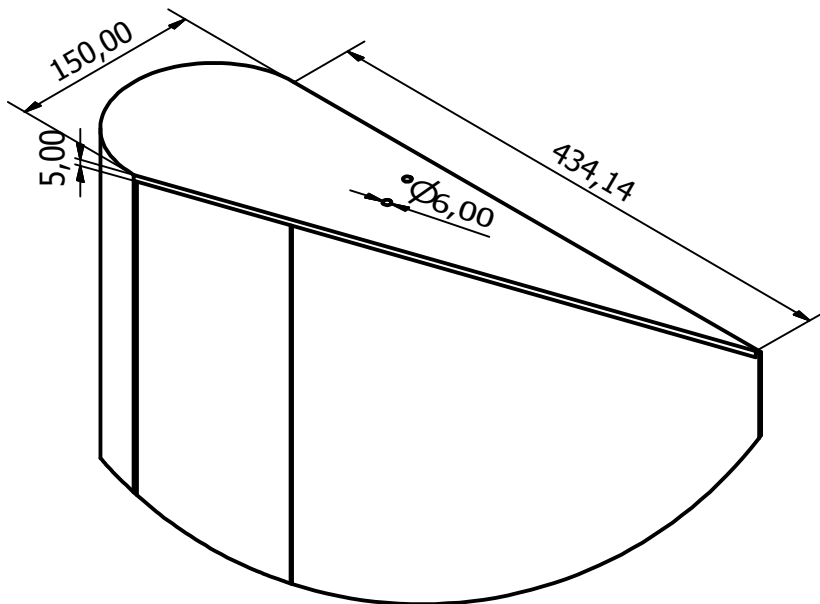
MATRÍCULA
2015001133

Aprovado por:

Escala
1:25

Pág.
1 / 5

A (1:5)



Todos os valores estão em milímetros*



Pá

Engenheiro:
Cleyson Gomes de Moura

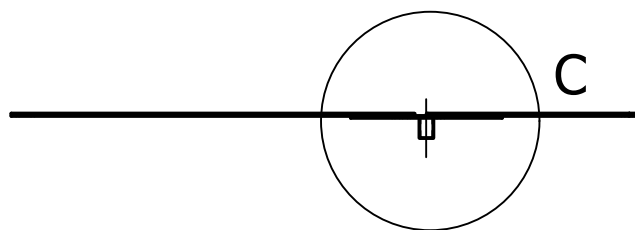
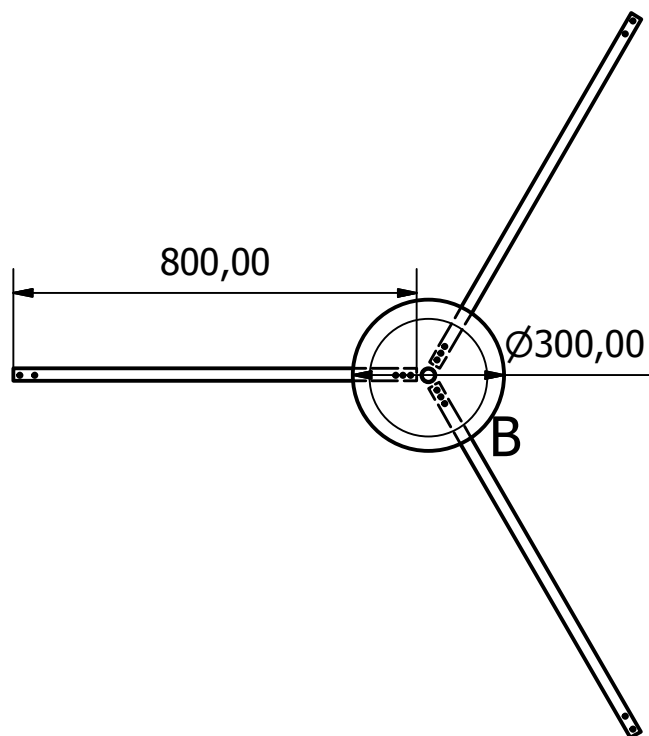
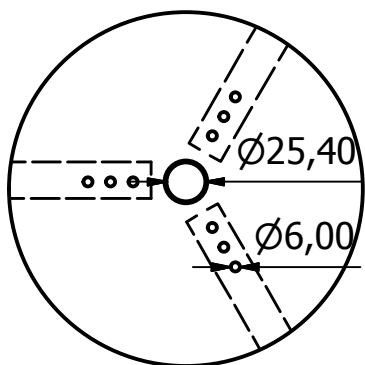
MATRÍCULA
2015001133

Aprovado por:

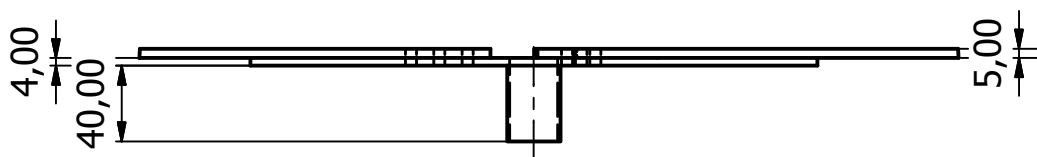
Escala
1:15

Pág.
2 / 5

B (1:5)



C (1:4)



Todos os valores estão em milímetros*



Flange de Suporte

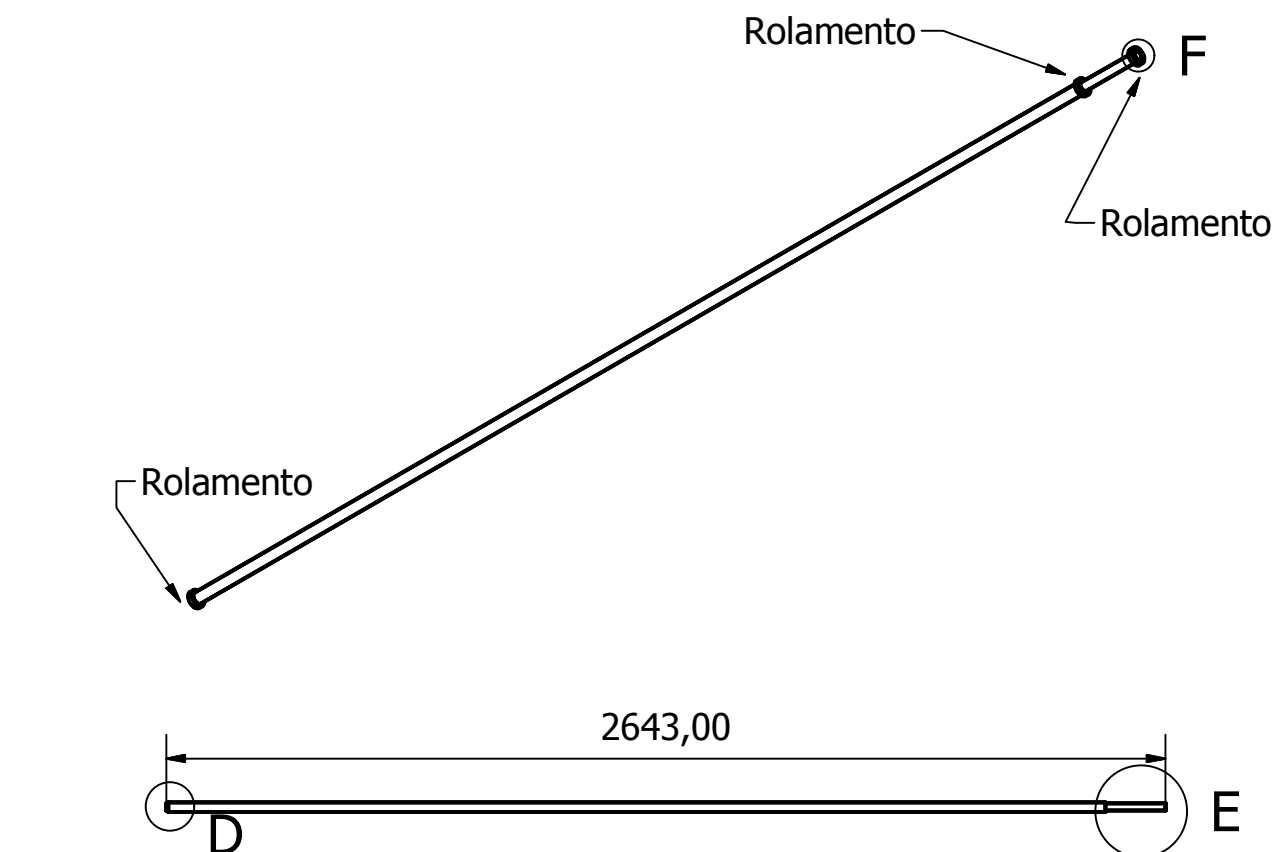
Engenheiro:
Cleyson Gomes de Moura

MATRÍCULA
2015001133

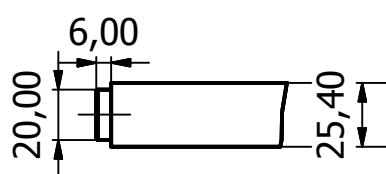
Aprovado por:

Escala
1:15

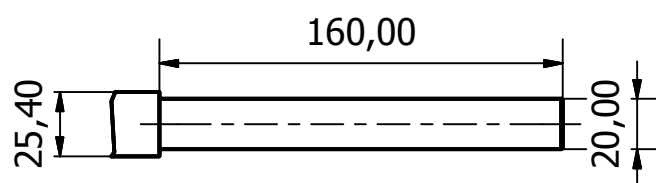
Pág.
3 / 5



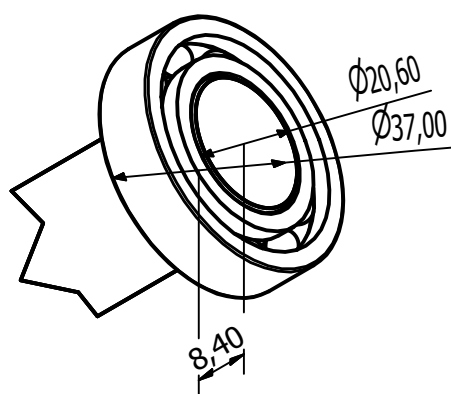
D (1 : 3)



E (1 : 3)



F (1 : 1)



Todos os valores estão em milímetros*



Eixo

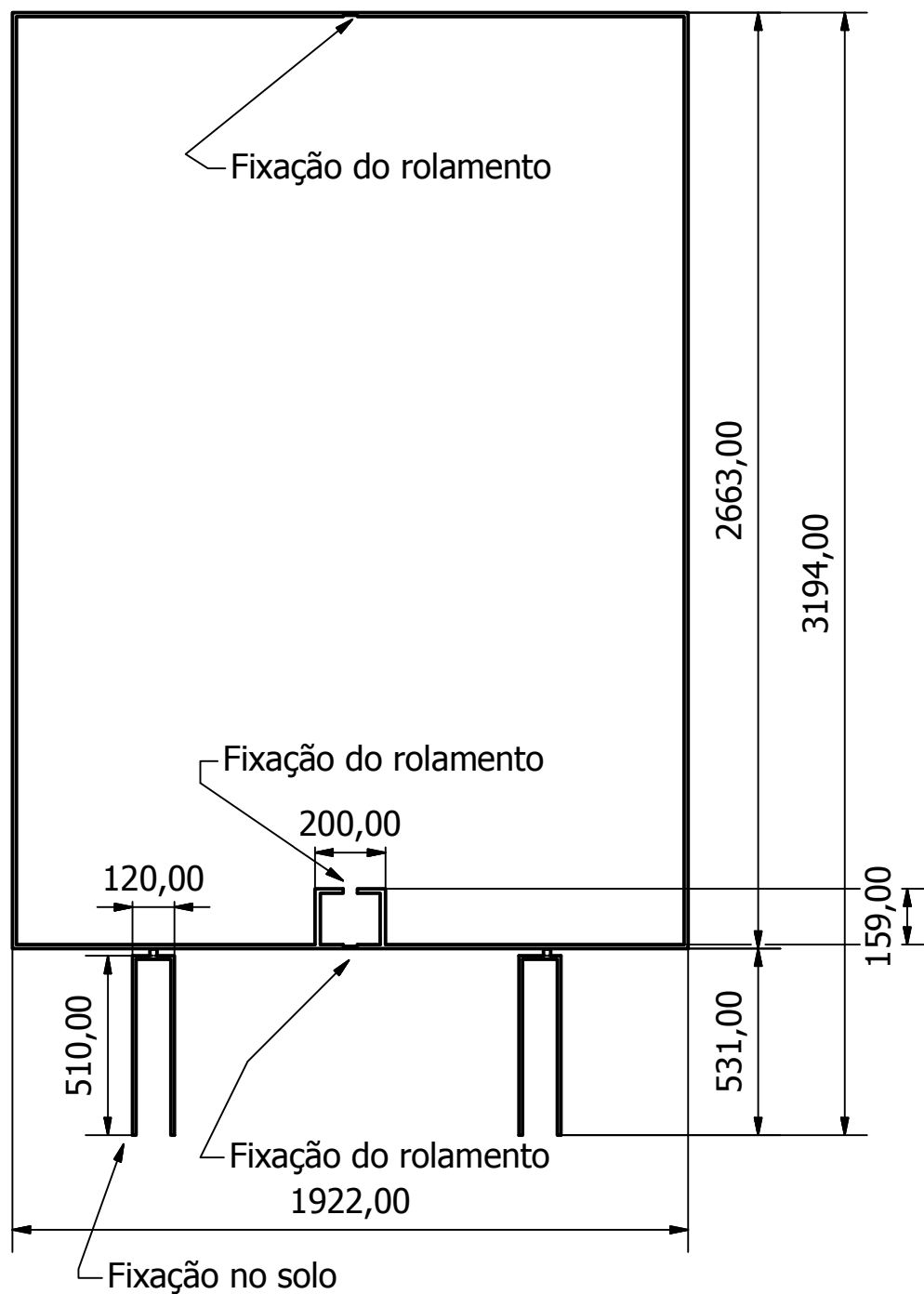
Engenheiro:
Cleyson Gomes de Moura

MATRÍCULA
2015001133

Aprovado por:

Escala
1:15

Pág.
4 / 5



Todos os valores estão em milímetros*



Estrutura

Engenheiro:
Cleyson Gomes de Moura

MATRÍCULA
2015001133

Aprovado por:

Escala
1:15

Pág.
5 / 5