



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAPÁ**  
**DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS**  
**COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

ANDRÉ VINÍCIUS LIMA DE AQUINO  
CYNTIA CRISTINNE CORRÊA BAIA

**BANCADA DE EMULAÇÃO DE TURBINA EÓLICA**

Macapá-AP

2018



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAPÁ**  
**DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS**  
**COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

ANDRÉ VINÍCIUS LIMA DE AQUINO  
CYNTIA CRISTINNE CORRÊA BAIA

**BANCADA DE EMULAÇÃO DE TURBINA EÓLICA**

Trabalho apresentado no curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Amapá como requisito para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.  
Orientador: Dr. Alaan Ubaiara Brito.

Macapá-AP

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Biblioteca Central da Universidade Federal do Amapá  
Elaborado por Mara Patrícia Corrêa Garcia – CRB-2/1248

---

Aquino, André Vinícius Lima de

Bancada de emulação de turbina eólica / André Vinícius Lima de Aquino, Cyntia Cristinne Corrêa Baia ; orientador, Alaan Ubaiara Brito. – Macapá, 2018.

88 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Fundação Universidade Federal do Amapá, Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica.

1. Turbina eólica. 2. Bancadas. 3. Energia eólica. 4. Emulador de turbina. I. Baia, Cyntia Cristinne Corrêa. II. Brito, Alaan Ubaiara, orientador. III. Fundação Universidade Federal do Amapá. IV. Título.

621.165 A657b

CDD: 22. ed.

---

## Dedicatória

Dedicamos este trabalho primeiramente a Deus por ter guiado o nosso caminho até aqui e nos dado forças para nunca desistirmos dos nossos sonhos, aos nossos pais Eliete e Manoel (*In Memoriam*), Zulma e Francisco, por nos apoiarem em todos os momentos.

## **Agradecimentos**

Agradecemos em primeiro lugar a Deus por sua soberania, pela paz aos nossos corações em momentos difíceis, por sua sabedoria e por iluminar o nosso caminho para que cumpramos a Sua vontade.

Agradecemos aos nossos pais e familiares por sempre estarem ao nosso lado e torcerem pelo nosso sucesso profissional. Todo o apoio demonstrado nos fortaleceu para que nos tornássemos quem somos hoje.

Agradecemos aos amigos de curso, em especial à Andreza e ao Salatiel, pela amizade e dedicação nos vários trabalhos e laboratórios realizados juntamente conosco durante o período de graduação. Sempre torceremos por vocês.

Agradecemos aos amigos de vida pela compreensão nos momentos em que estivemos ausentes, pelos conselhos e por todos os momentos felizes que compartilhamos.

Agradecemos ao nosso professor orientador Alaan Ubaiara Brito pela confiança em nosso potencial, pela inspiração de tema deste trabalho e pela disponibilidade dos materiais para a elaboração desta última etapa para a conclusão do curso.

Agradecemos ao colegiado de Engenharia Elétrica, em especial aos professores Felipe Monteiro e Raphael Comesanha pela disponibilidade em sanar todas as nossas dúvidas e por todos os conhecimentos transmitidos, e em especial ao professor Geraldo Maranhão pelo apoio financeiro neste projeto, devido ao seu trabalho em “Controlador Fuzzy para Uso em Conversores de Frequência Aplicado a Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento”.

E agradecemos a todos, que de forma direta e indireta contribuíram para a conclusão de mais uma etapa de nossas vidas.

“O vento sopra onde quer. Você o escuta, mas não pode dizer de onde vem nem para onde vai. Assim acontece com todos os nascidos do Espírito.” (A Bíblia, João 3.8)

## Resumo

Este trabalho tem como proposta principal a emulação de uma turbina eólica a partir de uma bancada de testes. Esta bancada é composta por um motor de indução tipo gaiola de esquilo, o qual servirá para emular o comportamento da turbina. Este motor é acionado através do conversor de frequência, o qual está conectado a um microcontrolador que tem a função de converter os sinais de saída de um anemômetro em tensão, através de uma equação que depende das características inseridas pelo usuário da bancada. O maior diferencial deste trabalho é que ele utiliza dados de vento medidos em tempo real. Através desta bancada será possível analisar a velocidade angular, e relacioná-la com a potência mecânica de saída do motor. Foi utilizado um banco de dados com os valores de potência em relação a frequência, tensão e velocidade angular. Sendo assim possível a comprovação de eficiência da bancada analisando a curva de potência obtida e a curva de potência da turbina definida pelo usuário para os parâmetros inseridos nas equações necessárias para a emulação. Estes parâmetros serão necessários para verificar se as características dominantes da turbina são semelhantes às encontradas como resultado desta emulação.

**Palavras-chave:** Turbinas Eólicas. Bancada. Emular. Potência. Características Dominantes. Parâmetros.

## **Abstract**

This paper has as the main idea emulating a wind turbine from a didactic stand. This stand is build with an induction motor type squirrel cage, which is going to emulate the proceeding of a real wind turbine rotor. This motor is going to be started with a frequency converter, which is connected to a microcontroller that has the function to convert the output signals from an anemometer into voltage signals, through an equation that depends on the insert characteristics by the stand user. The biggest difference of this project is that it uses wind data measured in real time. Through this stand, it will be possible to analyze the angular speed and relate it to the mechanic power values read in the motor output. A database is used with power values related to frequency, voltage and angular velocity. This way, it's possible to prove the stand efficiency by analyzing the power curve obtained and the power curve of the wind turbine chosen by the user with the parameters insert in the equations necessary for the emulation. These parameters will be used to verify if the wind turbine's dominant characteristics are similar to those found as a result of this emulation.

**Keywords:** Wind Turbine. Stand. Emulating. Power. Dominant Characteristics. Parameters.

## Sumário

Lista de figuras .....	9
Lista de tabelas .....	11
Lista de símbolos .....	12
1 Introdução .....	14
1.1 Problemática .....	14
1.2 Objetivos .....	15
1.3 Justificativa.....	15
2 Revisão de Literatura .....	17
2.1 Aerogeradores .....	17
2.2 Anemômetro.....	30
2.3 Motor .....	32
2.4 Conversor de frequência .....	35
3 Materiais e Métodos .....	37
3.1 Metodologia Proposta .....	37
3.2. Motor de Indução .....	37
3.3 Conversor de Frequência .....	38
3.4 Anemômetro .....	40
3.5 Microcontrolador .....	42
3.6 Determinação dos parâmetros da Turbina Eólica .....	43
3.7 Equacionamento da Turbina.....	44
3.8. Montagem da Bancada .....	50
4. Emulação e Análise de Resultados.....	57
5. Conclusão .....	67
Referências Bibliográficas .....	70
Apêndice I .....	72
Apêndice II .....	86

## Lista de figuras

Figura 1 - Componentes de um aerogerador .....	17
Figura 2 - Tipos de Turbinas .....	18
Figura 3 - Forças de sustentação e arrasto.....	19
Figura 4 - Forças atuantes em uma pá do aerogerador .....	21
Figura 5 - Definição do ângulo de arrasto e de ataque .....	21
Figura 6 - Curva característica de Potência <i>versus</i> Velocidade para controle de passo e por estol .....	23
Figura 7 - Gráfico da potência <i>vs</i> velocidade de vento para uma turbina eólica ideal. ....	25
Figura 8 - Rugosidade <i>versus</i> Velocidade do Vento .....	26
Figura 9 – Curvas de potência de $C_{ps}$ variadas .....	29
Figura 10 – Curvas de potência de diâmetros variadas .....	29
Figura 11 – Curvas de potência de densidades variadas.....	30
Figura 12 - Anemômetros tipo hélice e copo .....	31
Figura 13 - Dedução da equação do torque.....	33
Figura 14 - Campos magnéticos do rotor e do estator. ....	34
Figura 15 - Diagrama resumido de um CF .....	36
Figura 16 – Equipamentos utilizados para a montagem da bancada.....	37
Figura 17 – Motor trifásico de indução. ....	38
Figura 18 – Conversor de frequência.....	39
Figura 19 – Anemômetro tipo concha. ....	40
Figura 20 – Arduino UNO.....	42
Figura 21 – Aerogerador de referência E300I. ....	44
Figura 22 – Potência mecânica <i>versus</i> frequência armazenadas no banco de dados. ....	45
Figura 23 – Curvas de tensão de diâmetros diferentes com um $C_p$ fixo de 0,18, e densidade de vento $1,225 \text{ kg/m}^3$ .....	46

Figura 24 – Curvas de tensão de diferentes densidades de vento para um diâmetro de 3 metros e $C_p$ de 0,18 .....	46
Figura 25 – Curvas de tensão de diferentes $C_p$ com densidade de vento de 1,225 kg/m <sup>3</sup> e diâmetro de 3 m .....	47
Figura 26 - Fluxograma Geral da Bancada .....	48
Figura 27 – Layout para a parametrização.....	49
Figura 28 - Local de instalação do anemômetro .....	50
Figura 29 – Sinal de Saída do Anemômetro em um Osciloscópio. ....	51
Figura 30 – Conexão do anemômetro com o Microcontrolador.....	52
Figura 31 - Conexão do anemômetro com o microcontrolador real .....	52
Figura 32 – Resistência equivalente .....	53
Figura 33 – Gráfico de correção de tensão. ....	54
Figura 34 – Conexões no Conversor de Frequência.....	55
Figura 35 – Conexão Conversor-Motor. ....	56
Figura 36 – Layout do conversor de RPM para velocidade de vento .....	56
Figura 37 – Curvas comparativas com $C_p$ de 0,18.....	57
Figura 38 - Curvas comparativas com densidade do ar de 1,1125 kg/m <sup>3</sup> . ....	59
Figura 39 - Curvas comparativas com densidade do ar de 1 kg/m <sup>3</sup> . ....	60
Figura 40 - Curvas comparativas para variados valores de densidade de ar.....	61
Figura 41 - Curvas comparativas com $C_p$ de 0,15.....	62
Figura 42 - Curvas comparativas com $C_p$ de 0,25.....	63
Figura 43 - Curvas comparativas com $C_p$ de 0,35.....	64
Figura 44 - Curvas comparativas para variados valores de $C_p$ . ....	65
Figura 45 – Curva de $C_p$ versus Velocidade de vento, para um $C_p$ de 0,18. ....	65

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Valores de referência dos coeficientes $c_i$ . .....	28
Tabela 2 – Dados técnicos do motor trifásico de indução. ....	38
Tabela 3 – Parametrização do Conversor de Frequência. ....	39
Tabela 4 – Dados técnicos do anemômetro. ....	41
Tabela 5 – Dados comparativos dos anemômetros .....	42
Tabela 6 – Valores de Tensão antes e depois do capacitor.....	53
Tabela 7 – Valores de Tensão sem e com ganho de 1,03. ....	54

## Lista de símbolos

$F_d$	Força de sustentação
$F_i$	Força de arrasto
$v_w$	Velocidade do vento incidente
$v_{res}$	Velocidade resultante
$v_{tan}$	Velocidade tangencial da pá do aerogerador
$\beta$	Ângulo de passo (°)
$\gamma$	Ângulo de ataque (°)
$E_c$	Energia Cinética (J)
$m$	Massa (Kg)
$v$	Velocidade (m/s)
$\rho$	Densidade do ar (Kg/m <sup>3</sup> )
$V$	Volume (m <sup>3</sup> )
$A$	Área da secção (m <sup>2</sup> )
$P_v$	Potência de Vento (W)
$v(h)$	Velocidade de vento estimada à uma determinada altura (m/s)
$v_{ref}$	Velocidade de vento medida na altura de referência (m/s)
$h$	Altura que se deseja determinar a velocidade de vento (m)
$h_{ref}$	Altura de medição de velocidade de vento (m)
$Z_0$	Rugosidade (altura no qual a velocidade do vento é zero)
$\lambda$	Variável <i>lambda</i> – relação de velocidade da ponta da pá e velocidade de vento incidente (rad)
$r_m$	Raio máximo de rotação da turbina (m)
$w_m$	Velocidade angular do rotor (rad/s)
$n_r$	Velocidade do rotor (rpm)
$P_t$	Potência da Turbina (W)
$T$	Torque (N.m)
$F$	Força (N)
$r$	Distância Radial (m)
$\theta$	Ângulo entre a distância radial e a força (°)
$E_{mec}$	Energia Mecânica (J)
$d$	Deslocamento (m)
$P_{mec}$	Potência Mecânica (J/s ou W)

$t$	Tempo (s)
$\omega$	Velocidade Angular do Eixo do Motor (rad/s)
$V_L$	Tensão de linha do motor (V)
$I_L$	Corrente de linha do motor (A)
$\cos\varphi$	Fator de Potência
$C_p$	Coefficiente de performance
$f_c$	Frequência de corte (Hz)
$R$	Resistência do filtro ( $\Omega$ )
$C$	Capacitância do filtro (F)

## 1 Introdução

O aproveitamento eólico é a fonte de energia que mais cresceu no Brasil nos últimos cinco anos, tanto que a energia eólica representa cerca de 5% de toda sua produção energética em 2016 (MME, 2017). Já são mais de 500 parques eólicos instalados em todo o território brasileiro, além disso, o ano de 2017 foi promissor para esta fonte de energia. Por alguns dias, a energia eólica abasteceu 12,6% de todo o país. Esse valor atingiu 64% do abastecimento total do Nordeste. Na penúltima semana de 2017, a fonte mais importante de energia no Brasil foi ultrapassada pelo vento. O preço da energia eólica ficou mais barato em comparação com as três últimas grandes hidrelétricas contratadas desde o início dos leilões de energia, há 12 anos (TRIGUEIRO, 2017).

Os avanços tecnológicos relacionados à área tornam evidente a relevância de um estudo mais aprofundado sobre este tema, trazendo à tona seus conceitos, embates e funcionamentos.

### 1.1 Problemática

Os estudos sobre a energia eólica no Amapá ainda são escassos. Para que se realize um estudo aprofundado desta área e incentive a sua utilização sem a necessidade de montar um laboratório de grande porte, pois a aquisição de materiais para sua funcionalidade é de alto custo, pode-se emular o comportamento de uma turbina eólica naquele ambiente, sendo investigado o seu potencial eólico e rendimento. Visto que não se conhece o seu comportamento preliminarmente, a aquisição de uma turbina eólica para testes e estudos torna o projeto de alto custo, além de necessitar de uma mão de obra qualificada para a montagem e manutenção desta.

A solução para os problemas de custo, manutenção e até mesmo geográfico em relação à pesquisa, é buscar alternativas mais práticas e econômicas. Uma boa opção é a simulação, a qual é possível programar e prever o comportamento de uma turbina eólica em diversas situações. Ainda assim, a parte prática tende a ficar de lado nesta situação. É por isso que a emulação traz consigo a possibilidade de analisar os diversos cenários com uma prática muito maior aos que a manusearem. Para este caso, a emulação é de grande valor tanto para o campo científico quanto para a possibilidade de futuras instalações de turbinas eólicas funcionando em

aerogeradores. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é apresentado no tópico seguinte.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema que emule o comportamento de turbinas eólicas sobre condições reais de velocidade de vento.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, os objetivos específicos são:

- Selecionar os componentes necessários e projetar a bancada;
- Montar e instalar a bancada de emulação em ambiente apropriado;
- Analisar os parâmetros de entrada e saída de cada equipamento;
- Realizar testes em diferentes cenários;
- Comparar os resultados esperados e obtidos.

## 1.3 Justificativa

Quando se estuda sistemas de conversão de energia eólica, é importante analisar o comportamento de um gerador, o qual deve ser testado em situações mais próximas à realidade possível. A utilização de dados estocásticos provenientes de um anemômetro possibilitará a realização de testes mais realistas de um aerogerador no ambiente de laboratório.

Algumas bancadas de teste utilizam dados simulados através de modelos esquematizados com dados obtidos através de *softwares*, como HINANI (2014) em "*Design and development of wind turbine emulator to operate with 1.5kW induction generator*", o qual utilizou a simulação de velocidade do vento através do MATLAB, inserindo os dados em uma modelagem para características dominantes de uma turbina, igualmente a ROCHA (2008) em "*Simulação de aerogerador em uma bancada experimental*". Outras bancadas utilizam dados coletados por um anemômetro, como CUNHA e NICOLLOTTE (2015), utilizaram em "*Implementação de uma bancada para um simulador de microgerador eólico*" e também DOLAN e LEHN em "*Real-Time Wind Turbine Emulator suitable for Power Quality and Dynamic Control Studies*" dados anemométricos armazenados durante o período do ano anterior ao do trabalho realizado, sendo então não utilizados dados em tempo real, analisando o comportamento estimado de uma turbina baseando-se em dados previamente coletados. Ainda que se pretenda simular situações específicas através

destes modelos, bons resultados são obtidos através dos projetos introduzidos anteriormente, mas que para um campo acadêmico, onde se busca aprimorar o conhecimento e aumentar a realidade em um experimento de laboratório, a finalidade deste projeto se torna mais interessante.

Faz-se necessária a compreensão de situações realísticas para futuros estudos nos campos de pesquisa, além do menor custo de uma emulação sem a necessidade da aquisição de uma turbina eólica real. O aumento de interesse pela busca de novas técnicas para uma melhor eficiência e para o aprimoramento de experiência na área de energia eólica demonstram a necessidade de equipamentos e bancadas que tragam o conhecimento mais tático a todos os que têm interesse em trabalhar ou aprender sobre turbinas eólicas.

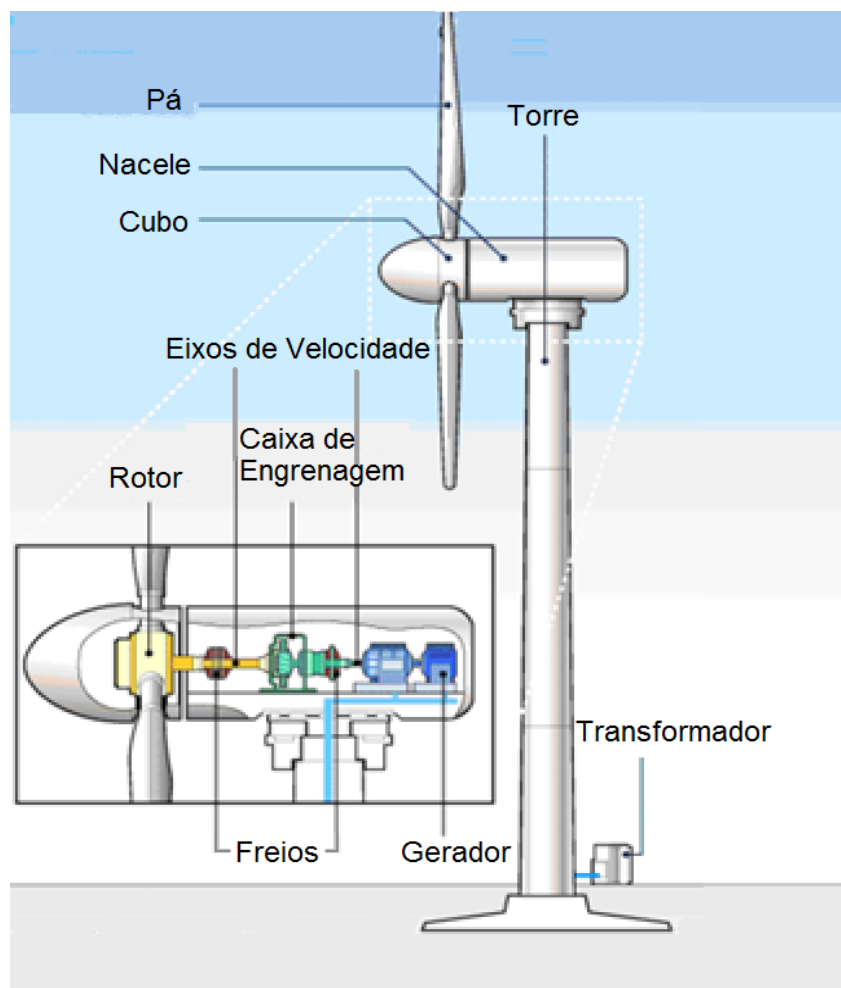
## 2 Revisão de Literatura

Nesse capítulo, será explicado o que é um aerogerador, bem como seu funcionamento, variáveis e sua constituição física. Em seguida, serão explicados os equipamentos necessários para a construção da bancada de testes, sendo eles, um anemômetro, um motor e um conversor de frequência.

### 2.1 Aerogeradores

O aerogerador é o responsável pela geração de energia elétrica a partir da energia cinética do vento. Desde a captação da energia cinética do vento, passando pela rotação da turbina eólica, até a geração da energia elétrica, o aerogerador possui diversos componentes. A figura 1 mostra os principais componentes de um aerogerador de grande porte. Pode-se ressaltar que aerogeradores de pequeno porte, que não possuem todos os componentes mostrados na Figura 1, possuindo um leme para a direcionar o aerogerador na melhor orientação de vento possível.

Figura 1 - Componentes de um aerogerador



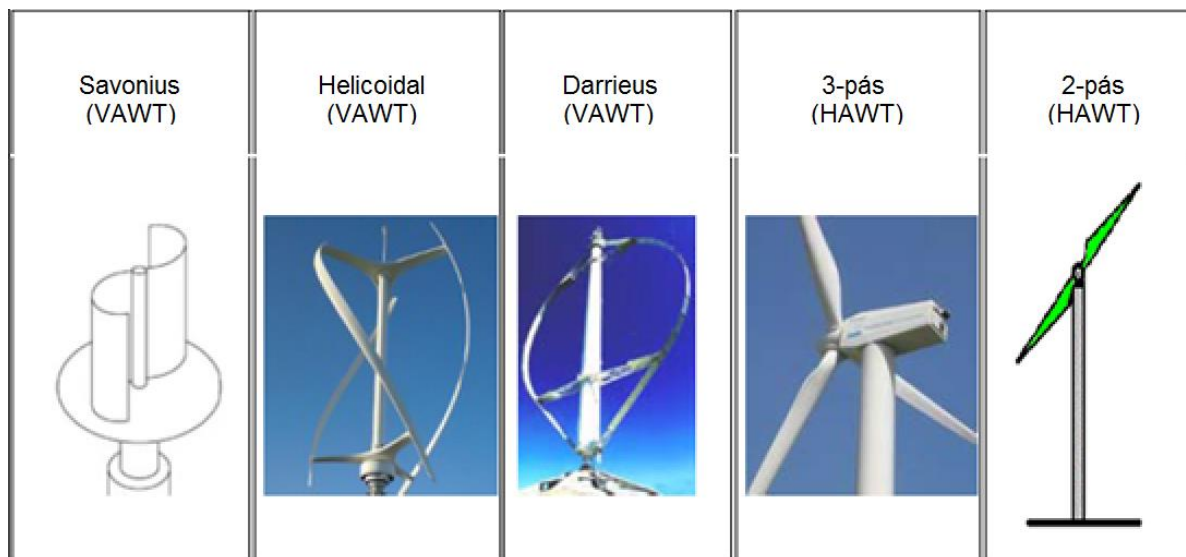
Fonte: Adaptado de Al-shemmeri (2010, página 22).

### 2.1.1 Tipos de turbina eólica

A turbina eólica é somente uma parte do aerogerador, mas que o classifica através do seu eixo. A turbina, ou o rotor, é o componente responsável pelo aproveitamento da energia cinética dos ventos e o aerogerador é a máquina por completa, com a torre, nacelle, gerador e a turbina. (PINHO, 2008).

As turbinas eólicas são classificadas através do eixo de rotação do rotor, podendo ser de dois tipos: As turbinas de eixo vertical, ou VAWT (do inglês, *vertical axis wind turbines*) e as turbinas de eixo horizontal ou HAWT (do inglês, *horizontal axis wind turbines*), representadas pela figura 2.

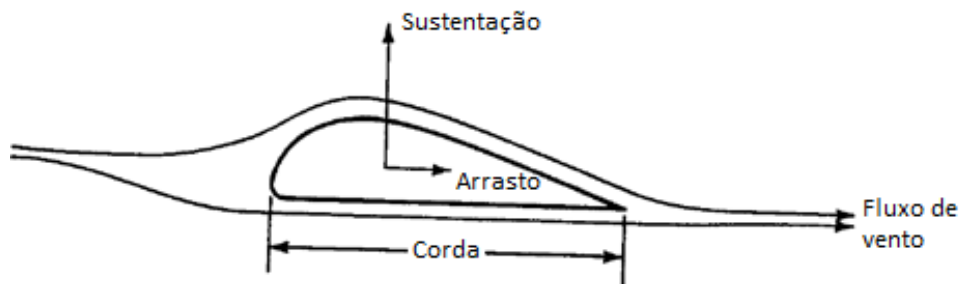
Figura 2 - Tipos de Turbinas



Fonte: Adaptado de Al-shemmeri (2010, página 46).

As turbinas de eixo vertical são projetadas com o rotor, o gerador e a caixa de câmbio no eixo vertical, os quais estão posicionados na parte inferior da turbina, facilitando o acesso quando necessário. Essas turbinas possuem uma pá de formato único que é projetada para captar a potência de vento independentemente da direção do fluxo (HEMAMI, 2012). As turbinas de eixo vertical também podem ser movidas por forças de sustentação e por forças de arrasto, forças apresentadas na figura 3. Os principais tipos de turbinas de eixo vertical são *Darrieus*, *Savonius* e helicoidal (DUTRA, 2009).

Figura 3 - Forças de sustentação e arrasto



Fonte: Adaptado de Jonhson (2006, página 140).

As turbinas de eixo horizontal possuem o rotor e gerador no eixo horizontal, os quais ambos estão localizados no topo de uma torre. Estas são as mais encontradas no mercado, por serem mais simples e possuírem um rendimento maior. Também são movidas pelas forças de sustentação e arrasto. Um corpo que obstrui o movimento do vento sofre a ação de forças que atuam perpendicularmente ao escoamento (forças de sustentação) e de forças que atuam na direção do escoamento (forças de arrasto). Os rotores que giram predominantemente sob o efeito de forças de sustentação permitem liberar muito mais potência do que aqueles que giram sob efeito de forças de arrasto, para uma mesma velocidade de vento.

As turbinas de eixo horizontal são predominantemente movidas por forças de sustentação e devem possuir mecanismos capazes de permitir que o disco varrido pelas pás esteja sempre em posição perpendicular ao vento. As turbinas mais utilizadas para geração de energia elétrica são as de eixo horizontal do tipo hélice, normalmente compostas por 3 pás (DUTRA, 2009).

### 2.1.2 Componentes do aerogerador

Por serem os mais utilizados no mercado, as características apresentadas a seguir serão dadas com base em aerogeradores de eixo horizontal. Em geral, os aerogeradores de eixo horizontal possuem três componentes principais: a torre, o rotor (turbina) e a nacela. Em algumas literaturas, pode-se encontrar em destaque o cubo, a caixa de engrenagem, a base, o gerador, entre outros componentes que já estão inclusos nos três citados anteriormente.

-Torre: A torre é o eixo principal que conecta o rotor e a nacela. Além disso, a torre precisa ser estruturalmente forte o suficiente para suportar o peso dos componentes nela apoiados e a força do vento, a qual pode facilmente quebrar ou causar danos se a torre não for resistente. Sua função, além de sustentação,

também se dá a levar o rotor a alcançar alturas mais altas, onde ventos mais fortes são encontrados.

-Nacele: É uma estrutura situada sobre a torre, geralmente feita em aço, que contém a parte elétrica do aerogerador e outros componentes, como o eixo, a caixa de engrenagem, se utilizada, o gerador, o transformador e o sistema de direcionamento. O eixo construído em aço ou liga metálica de alta resistência, tem como função transferir a energia mecânica da turbina para o gerador. O gerador, por sua vez, transforma a energia mecânica do rotor em energia elétrica. O transformador eleva a tensão de saída do gerador ao valor da rede a qual o aerogerador está ligado. Há a opção de instalar o transformador na torre (dentro ou fora dela) ou até no chão ao lado da torre. O sistema de direcionamento existe para alinhar a face do rotor com o vento.

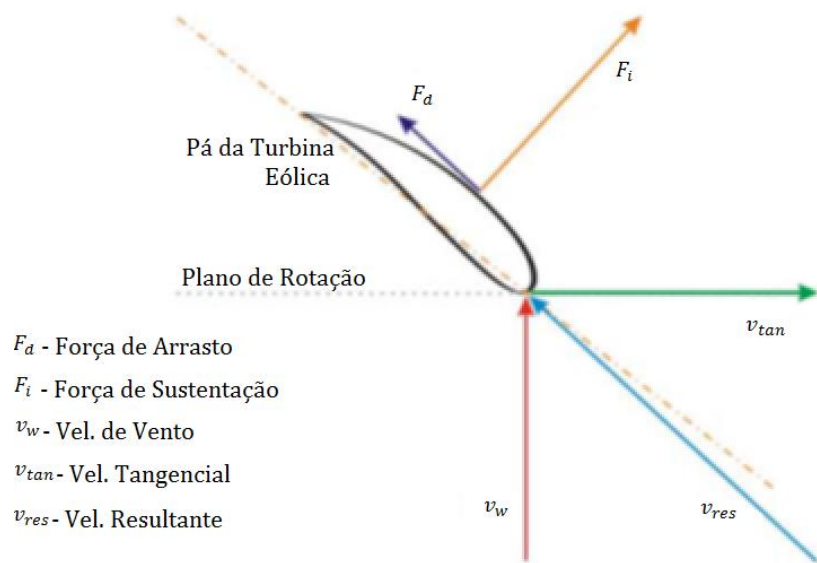
-Rotor: O rotor pode ser dito como o componente mais importante de um aerogerador, e será o objeto de estudo principal deste trabalho. É ele que absorve o vento e converte a energia cinética em energia mecânica no eixo principal. O rotor se refere a todas as partes móveis da turbina, as quais se incluem as pás, que estão conectadas a uma estrutura metálica a frente do aerogerador denominada cubo. As pás são responsáveis pelo recebimento da energia eólica e pelas suas características físicas e mecânicas. Esse recebimento de vento dá origem ao torque no eixo principal. O cubo acomoda as pás e seus sistemas para controle do ângulo de ataque, os sistemas de passo e/ou estol. Esses sistemas de controle oferecem flexibilidade na operação das turbinas, alterando a direção das pás para limitar a potência ou manter constante a velocidade da turbina.

### 2.1.3 Aerodinâmica das pás

A força do vento que incide em uma área é chamada de força aerodinâmica. Existem dois tipos de força que atuam em uma turbina eólica: a força de sustentação ( $F_d$ ) e a força de arrasto ( $F_i$ ), sendo uma perpendicular à outra.

A figura 4 mostra as principais forças atuantes em uma pá do aerogerador. A força de sustentação é perpendicular ao fluxo do vento resultante visto pela pá ( $v_{res}$ ), resultado da subtração vetorial da velocidade do vento incidente ( $v_w$ ) com a velocidade tangencial da pá do aerogerador ( $v_{tan}$ ). A força de arrasto é produzida na mesma direção de  $v_{res}$ . A resultante das componentes da força de sustentação e de arrasto na direção  $v_{tan}$  produz o torque do aerogerador (DUTRA, 2009).

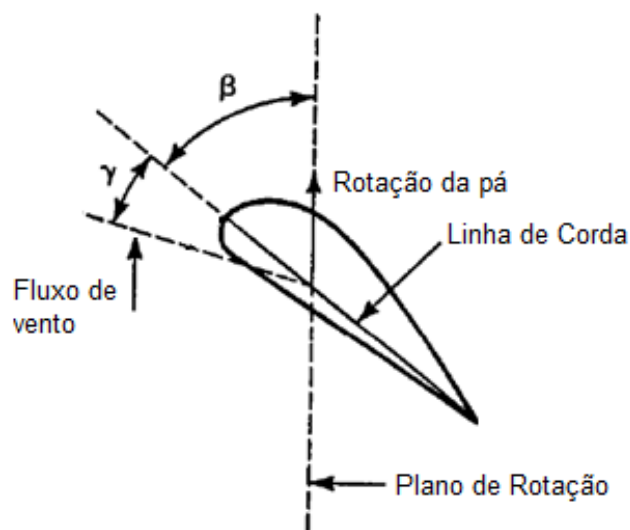
Figura 4 - Forças atuantes em uma pá do aerogerador



Fonte: Adaptado de Dutra (2009, página 26).

Essas forças e o desempenho geral da turbina dependem da construção e orientação das pás. Um parâmetro importante de uma pá é o ângulo entre a pá da hélice e seu plano rotacional chamado de ângulo de passo ( $\beta$ ). A “linha de corda” conecta uma ponta a outra da pá. O ângulo de passo é um ângulo estático, dependendo apenas da orientação da pá. Outro parâmetro importante é o ângulo de ataque ( $\gamma$ ) que é o ângulo entre a linha de corda e a velocidade relativa do vento. O ângulo de ataque é um ângulo dinâmico, dependendo tanto da velocidade da pá quanto da velocidade do vento (JOHNSON, 2006) Estes ângulos estão apresentados na figura 5.

Figura 5 - Definição do ângulo de arrasto e de ataque



Fonte: Adaptado de Johnson (2006, página 141).

#### 2.1.4 Controle Aerodinâmico de Potência

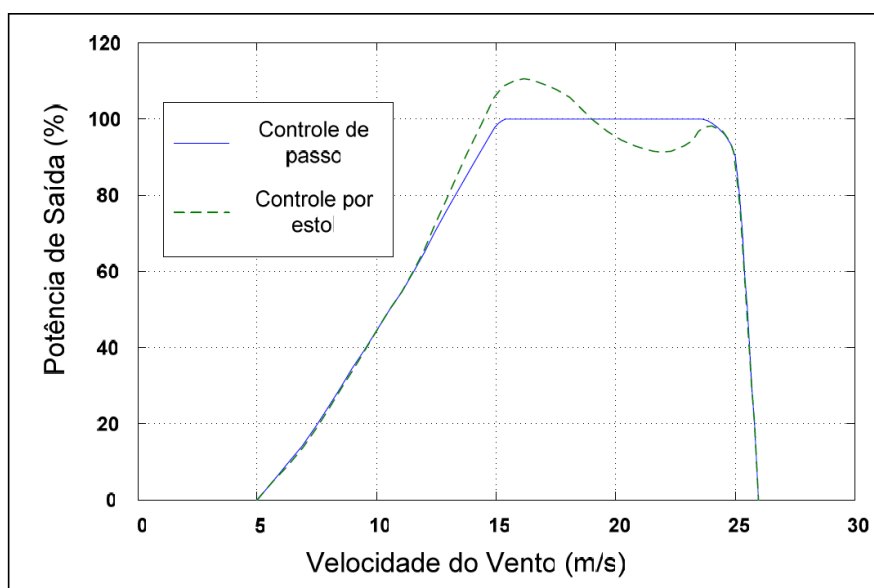
Segundo ROCHA (2008), as turbinas eólicas são projetadas de maneira que atinjam e mantenham a potência nominal de saída para diversos valores distintos de velocidades do vento. Da mesma forma devem ser previstos dispositivos de limitação para se evitar esforços excessivos nos componentes mecânicos para ventos de velocidade elevada. Para isto, o atual estágio de desenvolvimento das turbinas eólicas oferece três formas construtivas que permitem o controle da potência produzida no rotor. São chamados de controle por estol, controle de passo e controle ativo de estol, que é uma combinação dos dois anteriores.

##### 2.1.4.1 Controle de passo

O controle de passo é um sistema ativo que normalmente necessita de uma informação vinda do sistema de controle. Sempre que a potência nominal do gerador é ultrapassada, devido a um aumento da velocidade do vento, as pás do rotor giram em torno do seu eixo longitudinal. Em outras palavras, as pás mudam o seu ângulo de passo para reduzir o ângulo de ataque. Esta redução do ângulo de ataque diminui as forças aerodinâmicas atuantes e, conseqüentemente, a extração de potência do vento. Para todas as velocidades superiores à velocidade nominal, o ângulo é escolhido de forma que o aerogerador produza apenas a potência nominal.

Sob todas as condições de vento, o escoamento em torno dos perfis das pás do rotor é bastante aderente à superfície, produzindo, portanto, sustentação aerodinâmica e pequenas forças de arrasto (DUTRA, 2009). Na figura 6 é demonstrado como a potência se comporta de acordo com a velocidade de vento tanto para o controle de passo quanto para o controle por estol, o qual é apresentado no próximo tópico.

Figura 6 - Curva característica de Potência *versus* Velocidade para controle de passo e por estol



Fonte: ROCHA (2008, página 18).

#### 2.1.4.2 Controle por Estol

O controle por estol é um sistema passivo e reage à velocidade do vento. As pás do rotor são fixas em seu ângulo de passo e não podem girar em torno de seu eixo longitudinal. O ângulo de passo é escolhido de forma que, para velocidades de vento superiores a velocidade nominal, o escoamento em torno do perfil da pá do rotor descola da superfície da pá (estol), reduzindo as forças de sustentação e aumentando as forças de arrasto. Menos sustentações e maiores arrastos atuam contra um aumento da potência do rotor. Devido a este fenômeno, o sistema de controle atua como um freio aerodinâmico, limitando a potência de saída da turbina. Para evitar que o efeito estol ocorra em todas as posições radiais das pás ao mesmo tempo, o que reduziria significativamente a potência do rotor, as pás possuem uma pequena torção longitudinal que as levam a um suave desenvolvimento deste efeito (DUTRA, 2009).

#### 2.1.4.3 Controle ativo de estol

É um sistema de controle que consiste na junção das técnicas de controle de passo e por estol. É muito semelhante às máquinas de controle de passo, já que possui as lâminas de passo variáveis. Com o objetivo de obter um alto torque para baixas velocidades, a máquina é programada do mesmo jeito que é feito no controle de passo em baixas velocidades. Entretanto, quando a máquina atinge a potência nominal, percebe-se uma grande diferença desta com as turbinas com controle de

passo. Se o gerador está prestes a sobrecarregar, a máquina irá posicionar suas lâminas no sentido oposto do que ocorre no controle de passo. Em outras palavras, o ângulo de ataque das pás irá aumentar, com o intuito de que elas entrem em um profundo efeito por estol, desperdiçando o excesso de energia do vento. Uma das vantagens de se utilizar este tipo de controle ao invés do controle por estol passivo é que se pode controlar a potência de saída com maior precisão, de modo que seja evitada que essa potência ultrapasse a nominal da máquina no início de uma rajada de vento (ROCHA, 2008).

#### 2.1.5 Potencial Eólico

Qualquer objeto em movimento possui energia. Esse tipo de energia é chamado de energia cinética. Quando um carro, uma bicicleta ou uma bola estão em movimento, todos possuem energia cinética. Se eles pararem, a energia se vai. O mesmo ocorre para o ar em movimento, no caso, o vento. A quantidade de energia de um objeto em movimento depende de dois fatores, sua massa e sua velocidade (JOHNSON, 2006). Usando as unidades apropriadas para medir massa e velocidade, a relação que determina a energia de um objeto em movimento se dá por:

$$E_c = \frac{1}{2} * m * v^2 \quad \text{(Equação 1)}$$

Sendo:

$E_c$ = Energia Cinética (J);

$m$ = Massa (Kg);

$v$ = Velocidade (m/s).

Para que se possa determinar a energia de produção total, é necessário conhecer a potência de saída. Neste caso, na equação anterior, pode-se substituir a massa de ar que flui em 1 segundo, e a partir desse ponto, determinar a potência de vento. Note que:

$$m = \rho * V \quad \text{(Equação 2)}$$

Sendo:

$\rho$ = densidade do ar (Kg/m<sup>3</sup>);

$V$ = Volume (m<sup>3</sup>).

O volume que se move em 1 segundo pode ser dado por:

$$V(1s) = A * v \quad \text{(Equação 3)}$$

Sendo:

$A$  = Área da secção ( $m^2$ ).

Substituindo as equações 2 e 3 na equação 1 pode ser encontrada a potência de um fluido em movimento, como mostrado a seguir:

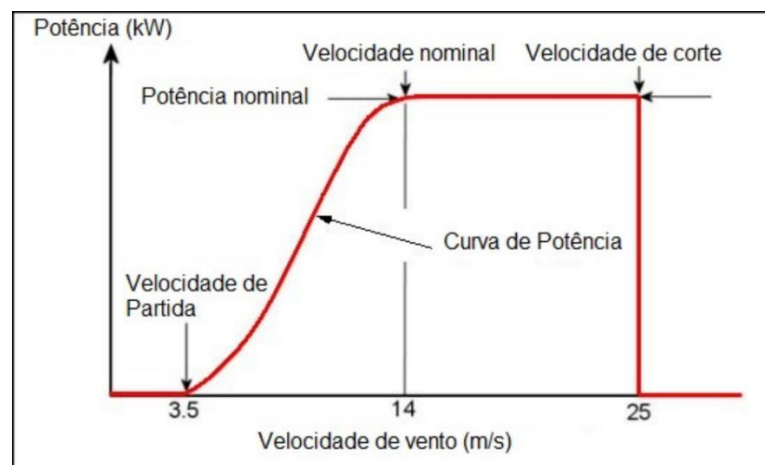
$$P_v = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 \quad (\text{Equação 4})$$

Sendo:

$P_v$  = Potência de Vento (W).

Na figura 7 é apresentado o gráfico do comportamento geral da potência de uma turbina eólica ideal em relação à velocidade de vento, variando do modelo apresentado as turbinas que apresentam sistemas de controle distintos, bem como diferentes velocidades de partida, nominal e corte.

Figura 7 - Gráfico da potência vs velocidade de vento para uma turbina eólica ideal.

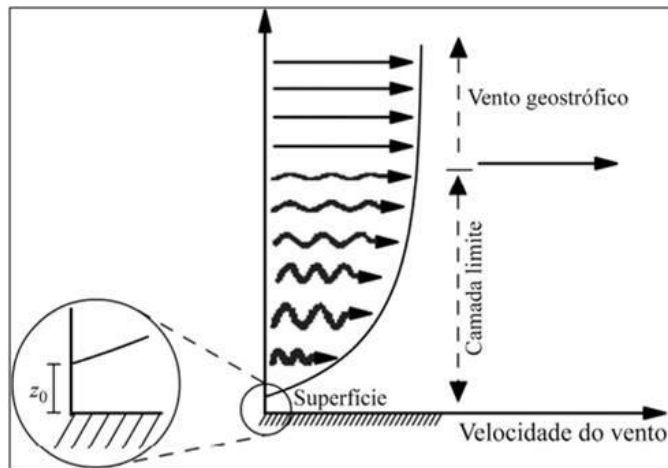


Fonte: Adaptado de <http://www.wind-power-program.com/popups/powercurve.htm>

Da equação 4, é perceptível que existem três influências fundamentais, sendo a principal a variação em função do cubo da velocidade de vento. A segunda em relação à área de escoamento do fluido. E a terceira em relação à massa específica do ar, ou densidade (TOLMASQUIM, 2016).

Ainda assim, a velocidade é a variável mais importante e vai depender do regime de ventos da região, das influências de obstáculos e da rugosidade do terreno. Em geral, a influência dos obstáculos de rugosidade diminui em função da altura acima do solo, sendo observadas maiores velocidades quanto maior a altura, como visto na figura 8. Por este motivo, procura-se instalar aerogeradores nas maiores alturas possíveis e/ou em locais com baixa rugosidade, como próximos de espelhos de água (na costa) e em terrenos descobertos (TOLMASQUIM, 2016).

Figura 8 - Rugosidade *versus* Velocidade do Vento



Fonte: Disponível em < <https://www.ufrgs.br> > (2017).

A camada limite é a região onde importa o efeito da rugosidade. Por outro lado, a região de vento geostrófico é caracterizada por não sofrer este efeito. (SOUZA et al., 2011)

Na falta de um local alto de instalação de um aerogerador, a equação a seguir pode servir de auxílio para estimar a velocidade de vento para uma determinada altura, levando em conta a rugosidade do ambiente em que é visto a velocidade de vento:

$$v(h) = v_{ref} * \frac{\ln(h/Z_0)}{\ln(h_{ref}/Z_0)} \quad (\text{Equação 5})$$

Sendo:

$v(h)$ =velocidade de vento estimada à uma determinada altura (m/s);

$v_{ref}$ =velocidade de vento medida na altura de referência;

$h$ =altura que se deseja determinar a velocidade de vento;

$h_{ref}$ =altura de medição de velocidade de vento;

$Z_0$ =rugosidade (altura no qual a velocidade do vento é zero).

A área de varredura também é um fator importante, procurando terem-se cada vez maiores áreas varridas para aumentar e estabilizar a eficiência da transformação de energia contida no vento em eletricidade. Já a densidade específica do ar é influenciada pela pressão, umidade e temperatura. Porém, não se pode descartar a altura do recurso eólico, que também influencia estes três fatores. A pressão influencia a energia do vento de forma diretamente proporcional, enquanto que a umidade e a temperatura influenciam de forma inversamente proporcional. Dessa forma, constata-se que o melhor aproveitamento do recurso

eólico requer maiores alturas e maiores áreas de varredura pelas pás dos aerogeradores (TOLMASQUIM, 2016).

A potência de vento é analisada de acordo com a velocidade de vento, tamanho da turbina e a densidade do ar. Essa potência, entretanto, é a potência existente no ar quando flui. Uma turbina não absorve totalmente essa potência, só se pode extrair uma fração dela. Isso depende do tipo de turbina, da eficiência, e outras condições de operação da turbina. A fração da potência extraída do vento por uma turbina eólica é usualmente representada por  $C_p$  (coeficiente de potência, ou coeficiente de performance). Esse coeficiente não é um valor fixo, mas varia de acordo com a velocidade do vento, a rotação da turbina e os parâmetros da pá da turbina, como o ângulo de inclinação. O  $C_p$  é uma função de duas variáveis:  $\lambda$  ( $\lambda$ ), que é a razão entre a velocidade tangencial da ponta da pá e a velocidade do vento incidente, e o ângulo de passo  $\beta$  (CUNHA e NICOLOTTE, 2015):

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 * \left( \frac{c_2}{\lambda} - c_3\beta - c_4\beta^{c_5} - c_6 \right) * e^{-\frac{c_7}{\lambda}} \quad (\text{Equação 6})$$

Sendo:

$\lambda$ = Variável  $\lambda$  – relação de velocidade da ponta da pá e velocidade de vento incidente (rad);

$\beta$ = Ângulo de passo ( $^\circ$ ).

$\lambda$  é uma variável, que depende da velocidade angular  $w_m$  do rotor nas extremidades das pás da turbina, do raio máximo de rotação da turbina  $r_m$  e da velocidade do vento  $v$ :

$$\lambda = \frac{r_m w_m}{v} \quad (\text{Equação 7})$$

Sendo:

$r_m$ = Raio máximo de rotação da turbina (m);

$w_m$ = Velocidade angular do rotor (rad/s).

A velocidade angular  $w_m$  pode ser calculada através da seguinte equação:

$$w_m = \frac{2\pi n_r}{60} \quad (\text{Equação 8})$$

Sendo:

$n_r$ = Velocidade do rotor (rpm).

O  $\lambda$  também pode ser calculado através da equação 9, a qual depende também do ângulo de passo  $\beta$ :

$$\lambda = \frac{1}{\frac{1}{1-c_8*\beta} \frac{c_9}{\beta^3+1}} \quad (\text{Equação 9})$$

A seguir é apresentada a tabela com valores de referência dos coeficientes para as equações 6 e 9:

Tabela 1 – Valores de referência dos coeficientes  $c_i$ .

$C_i$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$	$C_9$
Referência	0,5	116,0	0,4	0,0	-	5,0	21,0	0,08	0,035

Fonte: Adaptado de CARVALHO (2010).

A potência extraída do vento pode ser calculada através da potência total contida no vento multiplicada pelo  $C_p$ :

$$P_t = P_v * C_p \quad (\text{Equação 10})$$

Sendo:

$P_t$ =Potência da Turbina (W).

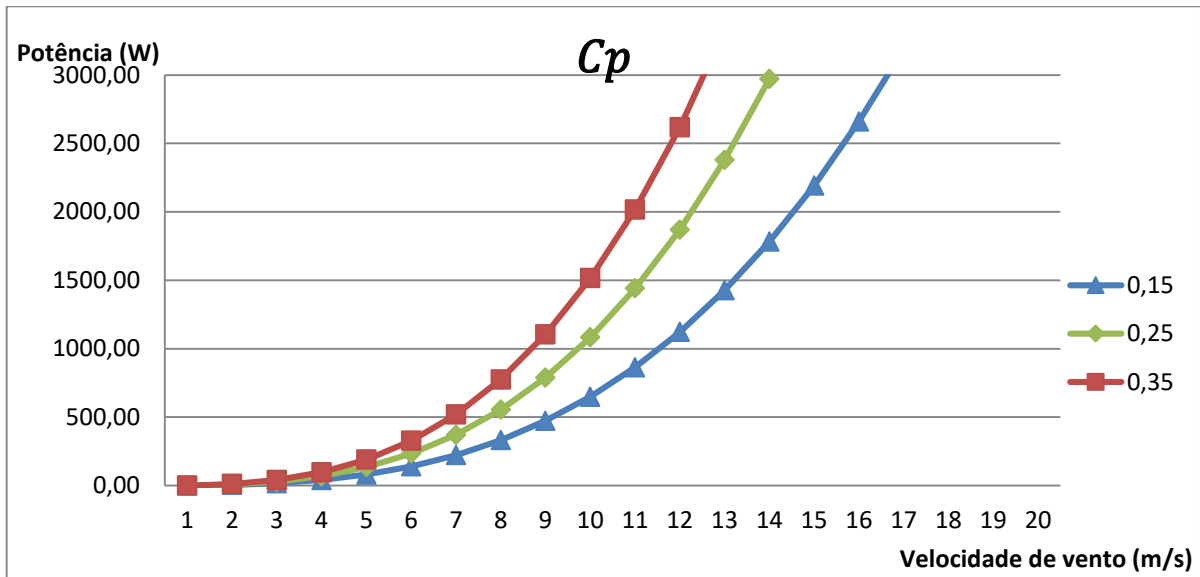
Logo, a potência de saída da turbina pode ser calculada através da seguinte equação:

$$P_t = \frac{1}{2} \rho * A * v^3 * C_p \quad (\text{Equação 11})$$

O limite de Betz determina que o máximo coeficiente de performance possível é  $C_p = 16/27$ , o que significa que a máxima eficiência atingida por uma turbina eólica é de 59%, o que só seria possível caso a turbina trabalhasse em máxima potência com velocidade constante em situações ideais. Mas ainda assim, é possível que turbinas bem projetadas atinjam um valor de 50%. Para outros modelos, a eficiência é ainda menor, sendo de 20 a 25%. Quando um protótipo apresenta um valor de eficiência maior que o limite de Betz, pode-se considera-lo irreal e rejeitá-lo imediatamente (AL-SHEMMERI,2010).

Através da equação 11, é possível analisar o comportamento de cada parâmetro dependendo da variação de velocidade de vento. Por exemplo, para determinados valores de  $C_p$ , e considerando a densidade do ar a mesma a nível do mar, ou seja,  $1,225 \text{ kg/m}^3$ , e um diâmetro para a área de varredura de 3 m, comumente encontrado no mercado para microgeração eólica, obtém-se o seguinte gráfico, apresentado na figura 9.

Figura 9 – Curvas de potência de  $C_p$ s variadas

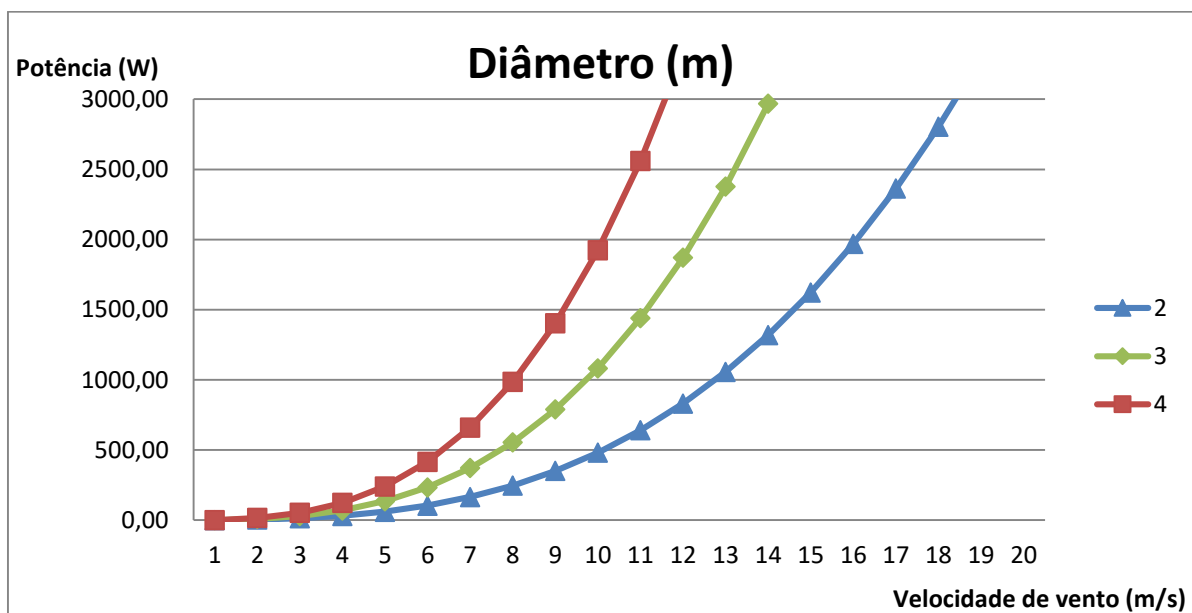


Fonte: Autoria Própria.

Observa-se que para maiores  $C_p$ s, atinge-se a potência nominal em uma velocidade de vento inferior se comparada com valores diferentes de  $C_p$ .

Outro parâmetro que pode ser avaliado é a área de varredura de uma turbina. Para diferentes turbinas disponíveis no mercado, considerando um mesmo  $C_p$ , para este exemplo, de 0,25, e a mesma densidade do ar utilizada anteriormente, os diferentes diâmetros também influenciam na potência mecânica obtida, bem como observado na figura 10.

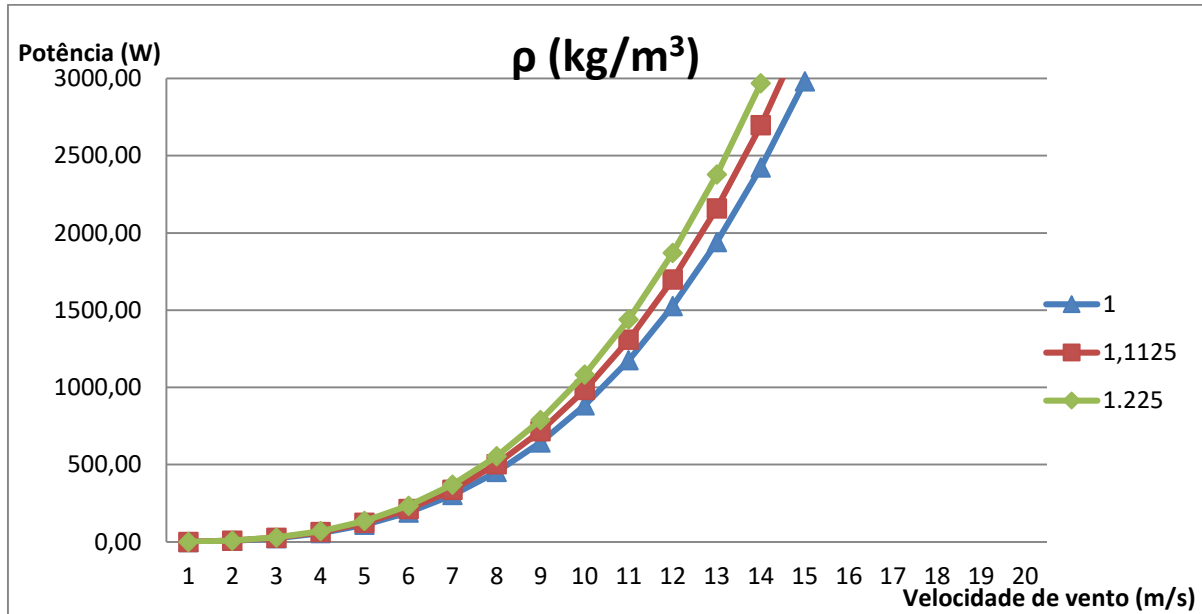
Figura 10 – Curvas de potência de diâmetros variadas



Fonte: Autoria Própria.

O último parâmetro de referência que pode ser analisado depende de diferentes locais e altitudes, a densidade do ar. Para este exemplo, mostrado na figura 11, será considerado um  $C_p$  de 0,25 e diâmetro de 3 m.

Figura 11 – Curvas de potência de densidades variadas



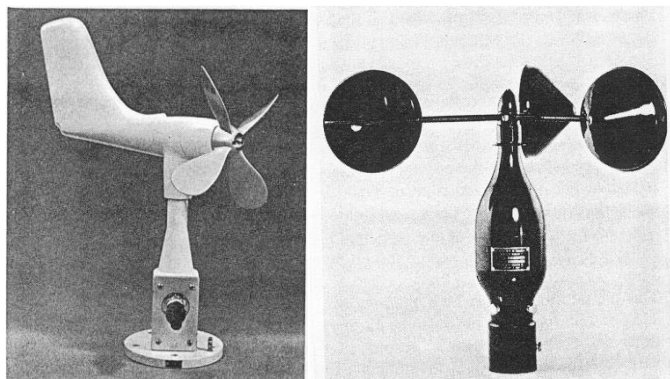
Fonte: Autoria Própria.

Nota-se que a variação de qualquer dos parâmetros tem grande influência da potência da turbina, em relação a determinada velocidade. São estes os parâmetros considerados para a execução deste trabalho.

## 2.2 Anemômetro

A velocidade do vento é o fator mais importante, o qual está diretamente relacionado à potência de saída da turbina. O anemômetro é o instrumento usado para medir essa velocidade. Há vários tipos de anemômetros disponíveis no mercado, os principais são mostrados na figura 12. Cada tipo tem suas vantagens e desvantagens. Pode-se encontrar no mercado anemômetros tipo hélice, copo (ou concha), sônico, a fio quente, entre outros (JOHNSON, 2006).

Figura 12 - Anemômetros tipo hélice e copo



Fonte: Johnson (2006, página 98).

### 2.2.1 Funcionamento

Um dos fatores mais importantes para a determinação da velocidade de vento é a altura, já que em maiores altitudes é possível encontrar maiores velocidades de vento. Os instrumentos de medição de vento fornecem, com maior ou menor precisão, as velocidades alcançadas. Isto é feito em geral através da geração de um sinal, analógico ou digital, proporcional à velocidade do vento. Anemômetros são instrumentos utilizados para medir a velocidade de vento. Inspirados nos cata-ventos, eles são calibrados de forma que o total de voltas dadas por suas pás seja equivalente a uma velocidade específica. Ou seja, se no túnel de vento em que o anemômetro é ajustado a corrente de ar sopra a 10 km/h, e as pás do instrumento giram 100 vezes por minuto, ele é programado para indicar 10 km/h sempre que o anemômetro atingir 100 rotações por minuto (ALMEIDA, 2011).

### 2.2.2 Anemômetro tipo concha

Este medidor de velocidade do vento pode ser compreendido como um pequeno rotor eólico com eixo de rotação vertical. Ao eixo, são fixados braços que sustentam conchas. Através da rotação do eixo pode ser gerada uma tensão proporcional à rotação via tacômetro, ou podem ser gerados pulsos por rotação que são contados em um determinado intervalo de tempo. As principais vantagens deste equipamento são a robustez, o custo e por não sofrer influência da mudança da direção do vento, que faz com que este medidor seja o mais utilizado em nível mundial, e também o escolhido para o seguimento deste projeto.

### 2.2.3 Anemômetro tipo hélice

O anemômetro tipo hélice possui um rotor no eixo horizontal, o qual o atrito ocorrido no mancal através da rotação é equivalente à velocidade do vento de forma

proporcional. Este tipo de anemômetro pode possuir uma, duas ou até três hélices. Um dos pontos positivos sobre este dispositivo é que se pode medir tanto a direção quanto a velocidade de vento. Entretanto, com anemômetros tipo hélice com apenas uma ou duas hélices, pode ocorrer uma instabilidade quando houver turbulência, já que as hélices acompanham a mudança de direção do vento (CARVALHO, 2003).

### 2.3 Motor

O motor elétrico tem como objetivo transformar energia elétrica em energia mecânica, que é o giro no seu próprio eixo. Características como custo reduzido, facilidade de transporte, limpeza, entre outras, fazem com que o motor elétrico seja o mais utilizado dentre todos os tipos de motores que existem (RÊGO SEGUNDO, 2015).

Há dois grupos de motores aos quais podemos dividir os mais variados tipos de motores existentes, que são: Corrente contínua e corrente alternada. As vantagens dos motores de corrente contínua (CC) são, o alto torque em relação às pequenas dimensões do motor, controle de alta flexibilidade e precisão pela elevada gama de valores de ajuste de velocidade. São raros os casos em que se utiliza esse tipo de motor. Somente quando a situação em questão é justificativa para a sua aplicação por conta do seu custo elevado (RÊGO SEGUNDO, 2015).

Hoje, os motores CC são utilizados em situações pontuais devido ao baixo custo dos motores de corrente alternada (CA) e o desenvolvimento da eletrônica industrial, que tornou possível o controle em corrente alternada, fazendo com que os motores CA sejam mais utilizados em aplicações industriais. As vantagens do motor CA sobre o motor CC são: a baixa manutenção, a ausência de escovas comutadoras, a ausência de faíscas, o baixo ruído elétrico, o custo inferior, a velocidade de rotação superior, entre outras (RÊGO SEGUNDO, 2015).

Dentro dos motores CA, têm-se os motores síncronos e os motores assíncronos. O motor síncrono funciona com velocidade fixa. Este tipo de motor é utilizado normalmente em sistemas de grandes potências ou quando a aplicação exige velocidade constante. Para sistemas de baixa potência, estes motores não são muito utilizados, devido seu alto custo em tamanhos menores. Porém, os motores síncronos, como trabalham com fatores de potência reguláveis, podem ajudar a reduzir os custos de energia elétrica e melhorar o rendimento do sistema de energia (RÊGO SEGUNDO, 2015).

O motor assíncrono, também chamado de motor de indução, é utilizado na grande maioria das máquinas e equipamentos encontrados nas indústrias. É o mais utilizado devido à sua simplicidade, robustez e baixo custo. Sua velocidade sofre ligeiras variações em função da variação da carga mecânica aplicada ao eixo. No entanto, o desenvolvimento dos controladores de frequência, facilitou o controle de velocidade e torque desses motores (RÊGO SEGUNDO, 2015).

### 2.3.1 Torque

Torque é a medida do esforço necessário para o giro de um eixo. Frequentemente é confundido com a Força, que na verdade é um dos seus componentes. O torque é o produto da força tangencial pela distância radial do eixo onde essa força é aplicada, como mostrado na figura 13 (RÊGO SEGUNDO, 2015).

Ou seja:

$$T = F * r * \text{sen}\theta \quad (\text{Equação 12})$$

Sendo:

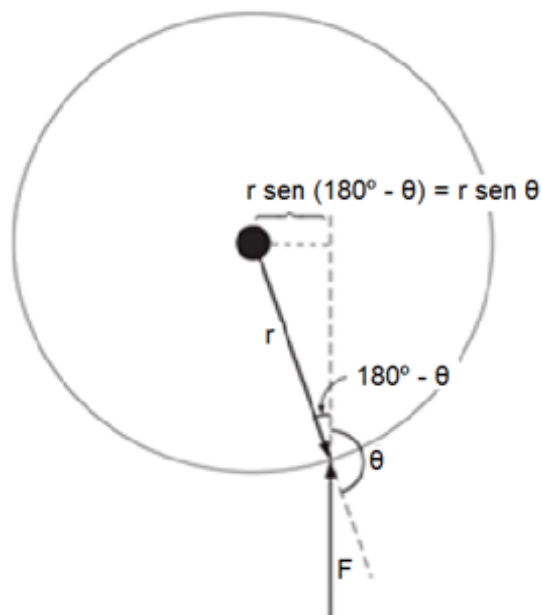
$T$  = Torque (N.m);

$F$  = Força (N);

$r$  = Distância Radial (m).

$\theta$  = ângulo entre a distância radial e a força (°)

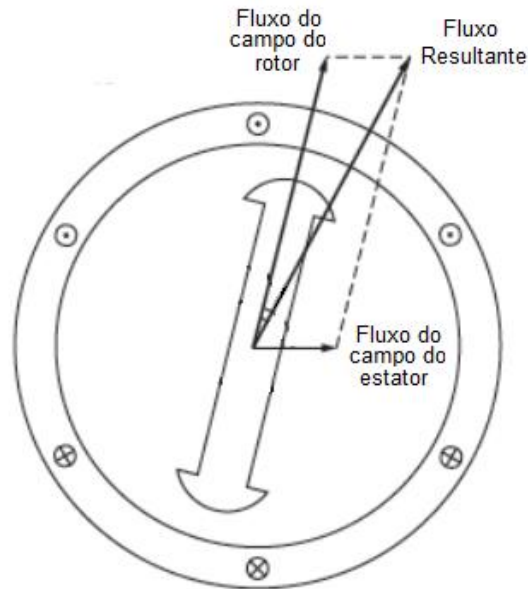
Figura 13 - Dedução da equação do torque



Fonte: Chapman, (2013, página 6).

Há dois campos magnéticos atuando em máquinas CA, um no circuito do rotor e outro no circuito do estator. A interação desses dois campos magnéticos produz o torque da máquina, como mostra na figura 14 (CHAPMAN, 2013).

Figura 14 - Campos magnéticos do rotor e do estator.



Fonte: Chapman (2013, página 181).

### 2.3.2 Potência Mecânica

A potência é a velocidade com que a energia é aplicada ou consumida, logo, para se calcular o seu valor, divide-se a energia mecânica pelo tempo necessário para a realização do trabalho em questão. E a energia mecânica é calculada pelo produto da força aplicada pelo deslocamento (RÊGO SEGUNDO, 2015).

$$E_{mec} = F * d \quad (\text{Equação 13})$$

Sendo:

$E_{mec}$  = Energia Mecânica (J);

$d$  = Deslocamento (m).

Logo,

$$P_{mec} = \frac{E_{mec}}{t} \quad (\text{Equação 14})$$

Sendo:

$P_{mec}$  = Potência Mecânica (J/s ou W);

$t$  = Tempo (s).

A potência mecânica também pode ser expressa na unidade CV ou HP onde elas valem 736W e 746W respectivamente. A relação entre a potência mecânica e o torque se dá pela fórmula:

$$P_{mec} = T * \omega \quad (\text{Equação 15})$$

Sendo:

$\omega$  = Velocidade Angular do Eixo do Motor (rad/s).

Assim, tendo uma potência mecânica constante trabalhando com altas velocidades, o torque tende a ser pequeno.

### 2.3.3 Potência Elétrica

Para um motor equilibrado trifásico, a potência elétrica ativa é a soma das potências de cada fase do motor. Então, a potência elétrica obedece a seguinte fórmula:

$$P_{ele} = \sqrt{3} * V_L * I_L * \cos\varphi \quad (\text{Equação 16})$$

Sendo:

$V_L$  = Tensão de linha do motor (V);

$I_L$  = Corrente de linha do motor (A);

$\cos\varphi$  = Fator de Potência.

## 2.4 Conversor de frequência

O conversor de frequência (CF) é um dispositivo eletrônico que converte a tensão alternada senoidal da rede convencional, em uma tensão contínua e logo após, converte ela mais uma vez em uma tensão com amplitude e frequência variáveis (RÊGO SEGUNDO, 2015).

A velocidade de rotação de um motor de indução depende da frequência da alimentação que ele recebe. Quanto maior for a frequência, maior será a rotação e vice-versa. Dessa forma, se um motor é alimentado por um CF, pode-se controlar a velocidade do eixo do motor de forma fácil, através da variação de frequência imposta pelo CF (RÊGO SEGUNDO, 2015).

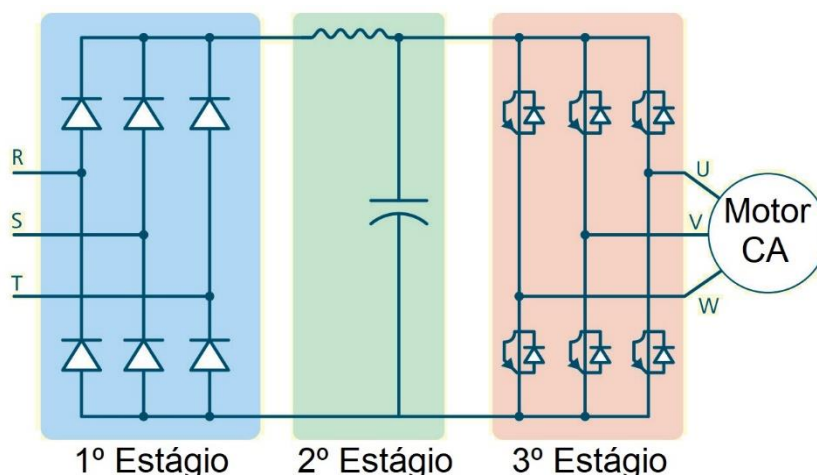
Além de controlar a velocidade do eixo do motor, o CF controla outros parâmetros do motor elétrico, como por exemplo, o torque. No entanto, deve-se notar que quando a velocidade do motor de indução é alterada pela variação de frequência, seu torque também muda. No motor de indução, o torque desenvolvido é proporcional à tensão aplicada no estator e inversamente proporcional à frequência dessa tensão. Logo, para manter o torque constante, a relação tensão/frequência, ou V/F, deve ser constante (RÊGO SEGUNDO, 2015).

O CF tem 3 estágios do seu funcionamento, desde sua alimentação da rede convencional, até ele alimentar o motor desejado. O primeiro estágio é um circuito

retificador, responsável por transformar a tensão alternada em contínua. O segundo estágio é composto por um banco de capacitores eletrolíticos e circuitos de filtragem de alta frequência, denominado barramento CC, onde é filtrado a tensão contínua que veio do circuito retificador. O terceiro e último estágio é a transformação inversa do retificador, ou seja, transformar a tensão contínua proveniente do segundo estágio em uma tensão alternada e com a frequência e tensão desejadas, esse estágio é composto de transistores IGBT (RÊGO SEGUNDO, 2015).

Na figura 15, estão representados os estágios do CF, ordenados do primeiro ao terceiro estágio da esquerda para direita, separados pelas cores: azul, representando o primeiro estágio; verde, o segundo estágio e vermelho, o terceiro estágio, como explicado cada um anteriormente.

Figura 15 - Diagrama resumido de um CF



Fonte: Rêgo Segundo (2015, página 48).

A maioria dos conversores pode ser comandada por meio de dois tipos de sinais: analógicos ou digitais. Normalmente para o controle de velocidade, se utiliza tensões analógicas entre 0 e 10 Vcc. Pode-se também configurar o CF para receber dados de corrente (0-20 mA ou 4-20 mA) nas entradas analógica. As entradas digitais podem ser configuradas para comandar o giro e o parar do motor, assim como o sentido do giro (RÊGO SEGUNDO, 2015).

Para o funcionamento adequado do CF não é suficiente somente a instalação. Além disso, é necessário informar as condições em que o CF irá trabalhar, isso é justamente a parametrização do CF.

### 3 Materiais e Métodos

#### 3.1 Metodologia Proposta

Neste capítulo, será apresentada a implementação da bancada de emulação de uma turbina eólica. Esta bancada tem como base a emulação da dinâmica dominante do rotor retratando características aerodinâmicas que o envolvem e, desta forma, analisando o seu comportamento. O sistema completo é apresentado na figura 16.

Figura 16 – Equipamentos utilizados para a montagem da bancada.



Fonte: Autoria Própria.

A emulação de uma turbina eólica em bancada de testes é obtida pelo controle de um motor de indução tipo gaiola de esquilo, cuja finalidade é reproduzir em seu eixo uma potência similar à que uma turbina eólica real iria produzir para determinadas condições de operação e velocidade de vento. O acionamento deste motor é efetuado através de um conversor de frequência (CF), o qual será comandado por sinais analógicos provenientes de um microcontrolador. O microcontrolador selecionado foi o ATmega328, pois nele foi possível programar as entradas no CF, bem como condicionar o sinal estocástico proveniente do anemômetro. O motor deve funcionar de forma equivalente aos dados obtidos através do anemômetro, semelhantemente ao comportamento de uma turbina eólica real.

#### 3.2. Motor de Indução

Assim como apresentado no tópico 2.3, o motor de indução possui diversas vantagens para este projeto, sendo seu controle feito mais facilmente através de um CF, onde será necessário um controle de velocidade. O motor de indução escolhido

(figura 17) é um modelo de fabricação WEG, e seus dados técnicos são mostrados na tabela 2.

Figura 17 – Motor trifásico de indução.



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 2 – Dados técnicos do motor trifásico de indução.

<b>Motor Trifásico de Indução</b>	
<b>Potência</b>	2CV ou 1,5kW
<b>Frequência (Hz)</b>	60
<b>Rpm</b>	855
<b>Tensão (V)</b>	220/380
<b>In (A)</b>	7,75/4,49
<b>Ip/In</b>	4,6
<b>Rendimento em % a plena carga</b>	74,7
<b>Fator de potência a plena carga</b>	0,68
<b>Fator de serviço</b>	1,15
<b>Peso (kg)</b>	37

Fonte: Dados de placa do motor.

### 3.3 Conversor de Frequência

Abordado no tópico 2.4 deste trabalho, sabe-se que o CF possui diversas funções, tais como o controle de velocidade de motores. O CF selecionado para este trabalho é de fabricação da WEG, modelo CFW-10 (figura 18). Este modelo possui o tipo de controle linear ( $P202 = 0$ ), o qual foi utilizado no presente projeto. Este CF é alimentado pela rede trifásica, como mostra a figura 16. Os parâmetros do conversor relevantes para este trabalho são apresentados na tabela 3. Os demais parâmetros não apresentados foram os que já vieram determinados de fábrica.

Figura 18 – Conversor de frequência.



Fonte: Manual do conversor de frequência CFW-10.

Tabela 3 – Parametrização do Conversor de Frequência.

Parametrização do Conversor de Frequência		
Parâmetro	Valor	Explicação
P000	5	Para alterar valores do inversor
P100	1,5	Tempo de delay entre o sinal recebido e o sinal enviado pelo inversor no momento de subida do sinal
P101	1,5	Tempo de delay entre o sinal recebido e o sinal enviado pelo inversor no momento de descida do sinal
P133	0	Frequência Mínima
P134	60	Frequência Máxima
P136	0	Boost de Torque Manual
P145	60	Frequência Nominal
P151	410	Nível de atuação da regulação de tensão do circuito intermediário
P202	0	Tipo de Controle Controle V/F Linear (Escalar)
P203	0	Seleção de Funções Especiais: Nenhuma
P206	30	Tempo em que o Inversor gera um reset automaticamente após um erro
P222	1	Define a entrada como sendo a da entrada analógica AI1

P230	1	Habilita os Bornes
P231	2	Define o sentido de giro. Nesse caso, depende do parâmetro P230
P234	206	Ganho da Entrada Analógica A1
P235	0	Define o tipo do sinal da entrada analógica. Nesse caso, de 0 a 10V
P236	0	Offset da Entrada Analógica A1
P263	1	Ent. Dig: Sem Função ou Habilita Geral
P264	5	Ent. Dig: Sentido de Giro
P265	6	Ent. Dig: Local/Remoto
P266	4	Ent. Dig: Gira/Pára
P297	3,5	Frequência de chaveamento em kHz

Fonte: Autoria Própria.

### 3.4 Anemômetro

Levando em conta as informações do tópico 2.2, o anemômetro tipo concha apresenta condições mais adequadas para este trabalho, já que independente da direção do fluxo de vento, ele irá rotacionar. O anemômetro adotado neste trabalho é de fabricação da empresa austríaca *Fronius*, apresentado na figura 19. Tal equipamento já estava disponível e possui as especificações apresentadas na tabela 4, que, por exemplo, nos mostra que a distância máxima entre o ponto de instalação e a bancada deve ser de 30 m.

Figura 19 – Anemômetro tipo concha.



Fonte: [www.fronius.com](http://www.fronius.com).

Tabela 4 – Dados técnicos do anemômetro.

<b>Dados técnicos</b>	
<b>Sensor</b>	Anemômetro em copo com contato reed
<b>Sinal de saída</b>	Retangular: Baixo $\leq 0,5$ V / Alto $\geq 4,5$ V
<b>Fator de calibração</b>	5,22 Hz = 1 km/h
	1,45 Hz = 1 m/s
<b>Valor limiar</b>	2,5 m/s Velocidade do vento
<b>Resolução</b>	1 m/s; 1 km/h
<b>Tolerância</b>	$\pm 5\%$ a partir de 5 m/s
<b>Grau de proteção</b>	IP 54
<b>Temperatura ambiente permitida</b>	de $-20$ °C até $+60$ °C
<b>Dimensões</b>	85 x 93 x 115 mm
<b>Cabo de conexão</b>	2 m de fio de cobre, extremidades livres, ponteiros, resistente aos raios UV
<b>Max. comprimento do cabo (Distância: Sensor Card/Box para o Sensor)</b>	30 m

Fonte: Datasheet do anemômetro.

O anemômetro foi submetido a um teste de comparação, com o auxílio de um anemômetro digital ITAN-720 de fabricação da Instrutemp. Submetendo os dois anemômetros a três fluxos de vento diferentes por um minuto cada, foi possível realizar o levantamento de dados para fins comparativos entre eles. Esses três fluxos serão chamados de fluxos de nível 1, 2 e 3. Pela questão estrutural do anemômetro utilizado neste projeto e da sua precisão, seus valores variaram muito mais, comparados com os do anemômetro digital. Por isso foi adotado na coluna do anemômetro os valores mínimos e máximos em cada teste, bem como a média dos valores naquele minuto de teste, como mostra a tabela 5. Além disso, a última coluna mostra a razão entre os valores médios dos anemômetros, valor da coluna média do anemômetro tipo concha em razão da média dos respectivos valores do anemômetro digital, demonstrando que a variação entre suas medições é proporcionalmente parecida.

Tabela 5 – Dados comparativos dos anemômetros

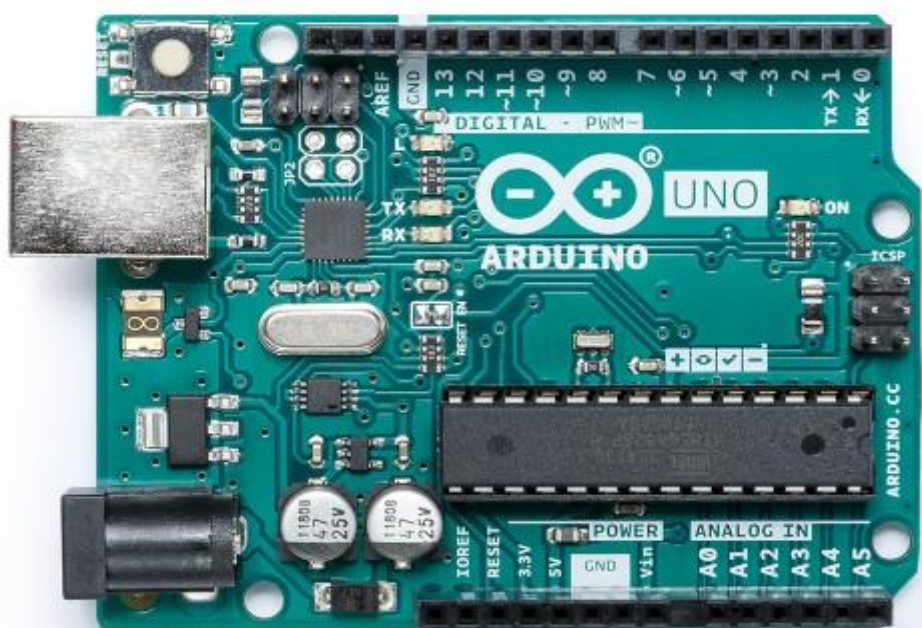
Tabela Comparativa dos Anemômetros					
Nível do Fluxo de Vento	Anemômetro Concha			Anemômetro Digital	Percentual de precisão das medições (%)
	Mínima	Média	Máxima		
1	2,3	3,1	3,98	3,6-3,7	84,93
2	2,73	3,7	4,5	4,3-4,4	85,06
3	3,98	4,82	5,75	5,5-5,6	86,85

Fonte: Autoria Própria.

### 3.5 Microcontrolador

Dentre as várias opções de mercado para controladores, a placa Arduino UNO, que possui o microcontrolador ATmega328P, foi selecionado para este projeto por sua fácil aquisição, forma de programação acessível, além de sua implementação facilitada neste trabalho. A placa Arduino UNO é mostrada na figura 20, bem como as suas especificações na tabela 6.

Figura 20 – Arduino UNO.



Fonte: [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc).

Tabela 6 – Dados técnicos do Arduino UNO

Arduino UNO	
Microcontrolador	ATmega328P
Tensão de Operação	5V
Tensão de Alimentação (Recomendada)	7-12V
Tensão Limite de Alimentação	6-20V
Quantidade de portas digitais	14 (das quais 6 fornecem sinal PWM)
Quantidade de portas analógicas	6
Corrente contínua por porta digital	20 mA
Corrente contínua na porta 3,3V	50 mA
Memória Flash	32 KB (ATmega328P) dos quais 0,5 KB utilizado pelo bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Velocidade do clock	16 MHz

Fonte: Autoria Própria.

### 3.6 Determinação dos parâmetros da Turbina Eólica

Após analisar os diferentes tipos de turbinas, como apresentado no tópico 2.1.1, e pelo funcionamento similar ao do anemômetro utilizado neste projeto, as turbinas eólicas de eixo horizontal se mostram ideais para os estudos pretendidos, além de serem mais facilmente encontradas no mercado.

O principal fator para a determinação de uma referência foi a limitação da potência do motor utilizado neste trabalho. Logo, as pesquisas se basearam em uma turbina eólica que possuísse até 1500 W. A microturbina eólica, apresentada na figura 21, que foi utilizada como referência é a de modelo E300I, da empresa Krestel, e possui as seguintes especificações:

- Marca: Krestel.
- Modelo: E300I.

- Potência elétrica nominal: 1KW.
- Pico de potência: 1,15 KW.
- Tensão do sistema: 12, 24, 48, 110, 200 Vcc.
- Velocidade de partida: 2,5 m/s.
- Velocidade nominal do vento: 11 m/s.
- Diâmetro do rotor: 3 m.
- Área de varredura das pás: 7,07 m<sup>2</sup>.
- Rotação nominal: 650 rpm.

Figura 21 – Aerogerador de referência E300I.



Fonte: Disponível em: <[www.kestrelwind.co.za](http://www.kestrelwind.co.za)>

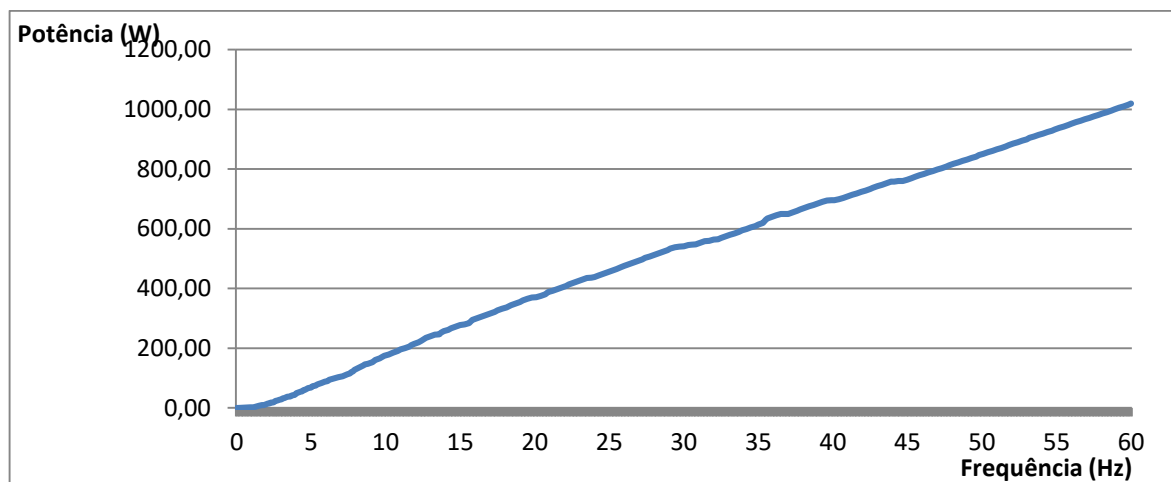
Os parâmetros da turbina que foram utilizados como referência para o trabalho foram o diâmetro do rotor, a velocidade partida e a velocidade nominal.

### 3.7 Equacionamento da Turbina

Previamente à montagem da bancada, foram realizados testes apenas com a conexão CF-Motor, já que era necessário saber quais parâmetros seriam determinados para este conjunto, bem como mostrado na tabela 3. Os dados de entrada foram inseridos pelo controle de frequência determinado pelo usuário mediante a IHM do CF, com a variação de 0,1 Hz, para a determinação da potência mecânica de saída do motor. Esta potência foi determinada com a leitura de tensão, corrente, fator de potência, encontrando assim a potência elétrica enviada ao motor, como na equação 16. A potência elétrica é então multiplicada pelo rendimento do motor de 74,7%, obtendo-se a potência mecânica de saída. A figura 22 mostra o

comportamento da potência mecânica lida em relação à frequência inserida no CF. Todos estes valores foram armazenados em um banco de dados, o qual se encontra no apêndice I, para correlação posterior.

Figura 22 – Potência mecânica *versus* frequência armazenadas no banco de dados.



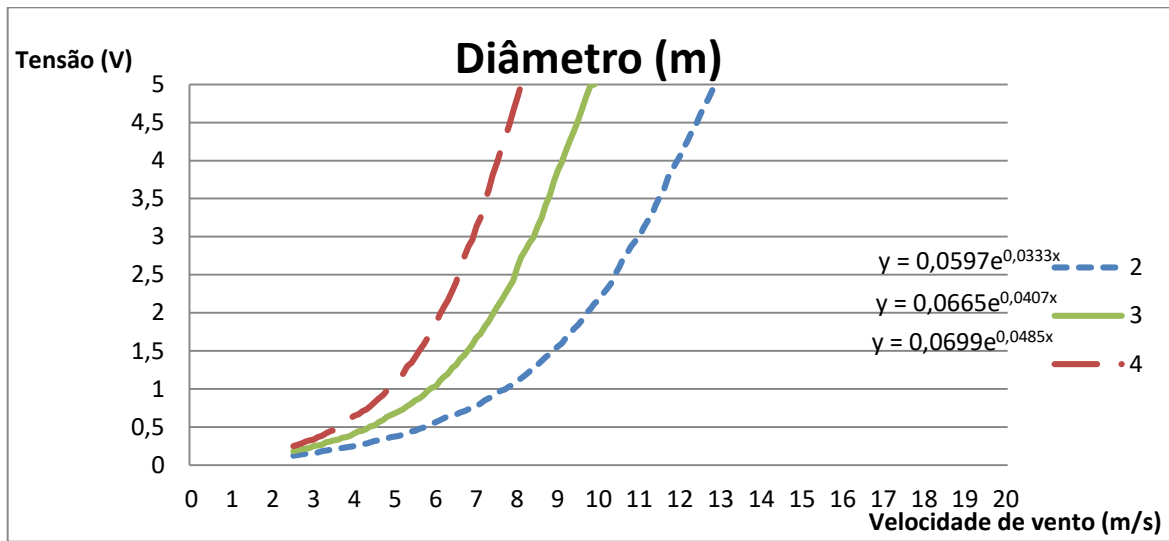
Fonte: Autoria Própria.

Os valores de potência podem ser diretamente relacionados com a equação 11, a qual depende, além de outros parâmetros, do cubo da velocidade de vento. A relação entre a potência mecânica da turbina e a velocidade de vento é então analisada. Há uma busca de valores no banco de dados relacionados à potência, podendo relacionar assim a frequência que deve ser inserida no CF com a velocidade de vento. Para esta relação, podem ser alterados os valores de parâmetros ainda da equação 11.

O CF está configurado para uma relação de  $V/F$  de forma linear, ou seja, a frequência é diretamente proporcional à tensão. Os valores de frequência foram relacionados à tensão de 5 V, sabendo que esta é a tensão máxima de saída do microcontrolador. Ou seja, uma relação de frequência de 0 a 60 Hz pode ser vista aqui como uma relação de tensão de 0 a 5 V. Então, com todos os parâmetros da turbina determinados, sabe-se o valor de potência da turbina para a velocidade de vento lida em tempo real. Busca-se esse valor de potência nos valores guardados no apêndice I, e assim, um valor de frequência, também lido como valor de tensão, é usado como parâmetro de equacionamento.

As curvas de tensão em relação à velocidade de vento são apresentadas na figura 23, para uma variação de diâmetro, com um  $C_p$  fixo de 0,18, e densidade de vento  $1,225 \text{ kg/m}^3$ , considerando a nível do mar.

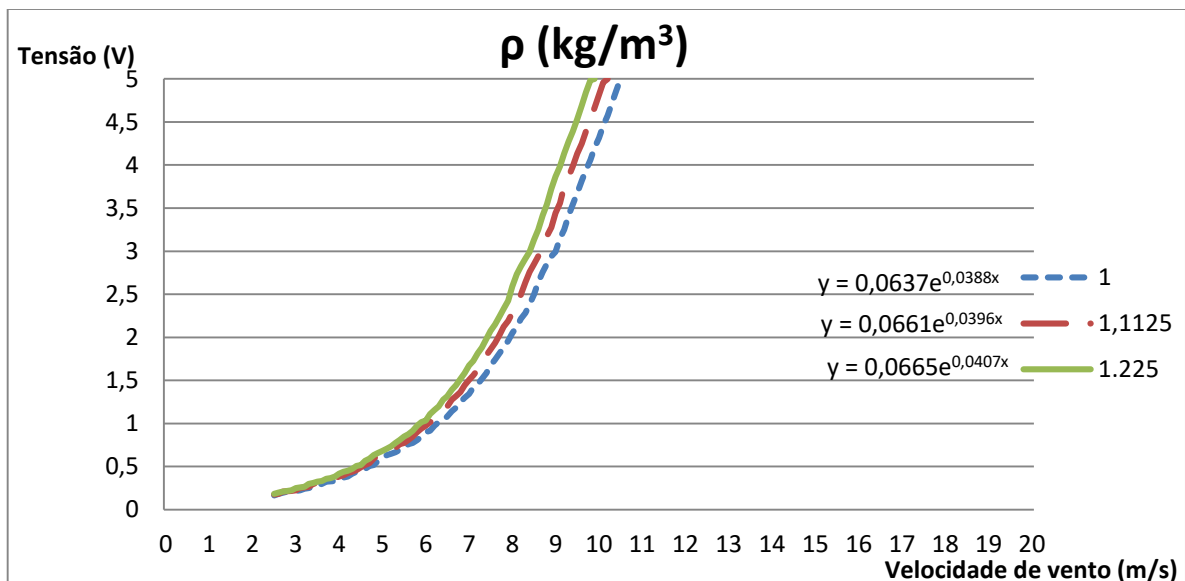
Figura 23 – Curvas de tensão de diâmetros diferentes com um  $C_p$  fixo de 0,18, e densidade de vento 1,225 kg/m<sup>3</sup>



Fonte: Autoria Própria.

As equações apresentadas na figura 23 foram inseridas no microcontrolador para as características de cada curva. A equação específica para cada diâmetro demonstra que qualquer alteração de parâmetro modifica a programação no microcontrolador, ou seja, a tensão de saída depende da equação inserida no microcontrolador. Sendo assim, as equações para a variação de densidade de vento, para um diâmetro de valor de 3 metros e o mesmo  $C_p$  determinado anteriormente, são apresentadas na figura 24.

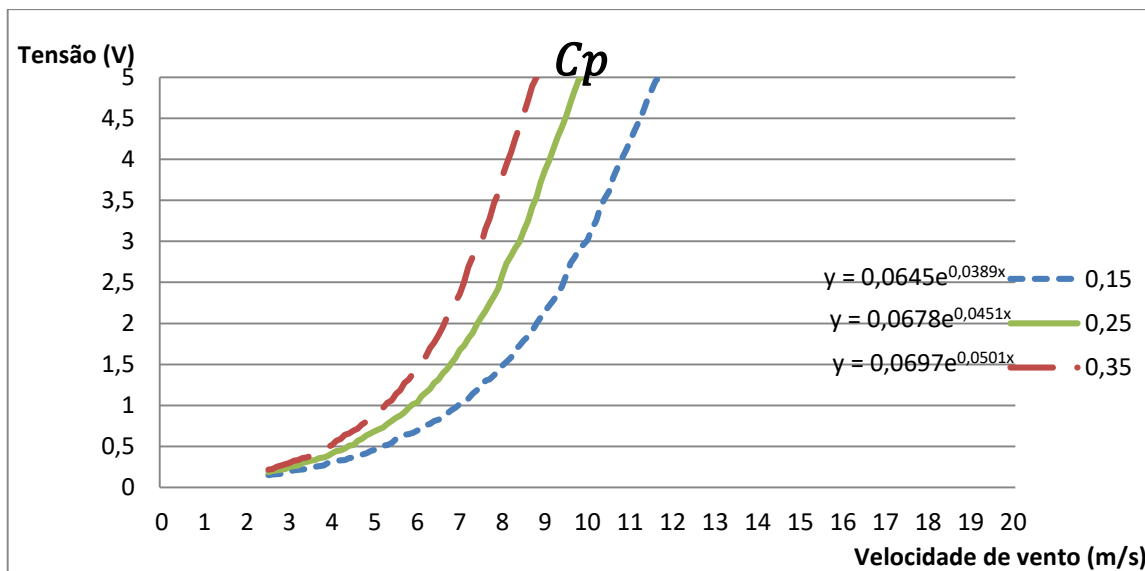
Figura 24 – Curvas de tensão de diferentes densidades de vento para um diâmetro de 3 metros e  $C_p$  de 0,18



Fonte: Autoria Própria.

De modo equivalente, para o mesmo diâmetro, com a densidade do vento igual a  $1,225 \text{ kg/m}^3$  e para diferentes valores de  $C_p$ , a figura 25 apresenta as curvas de tensão, bem como suas equações.

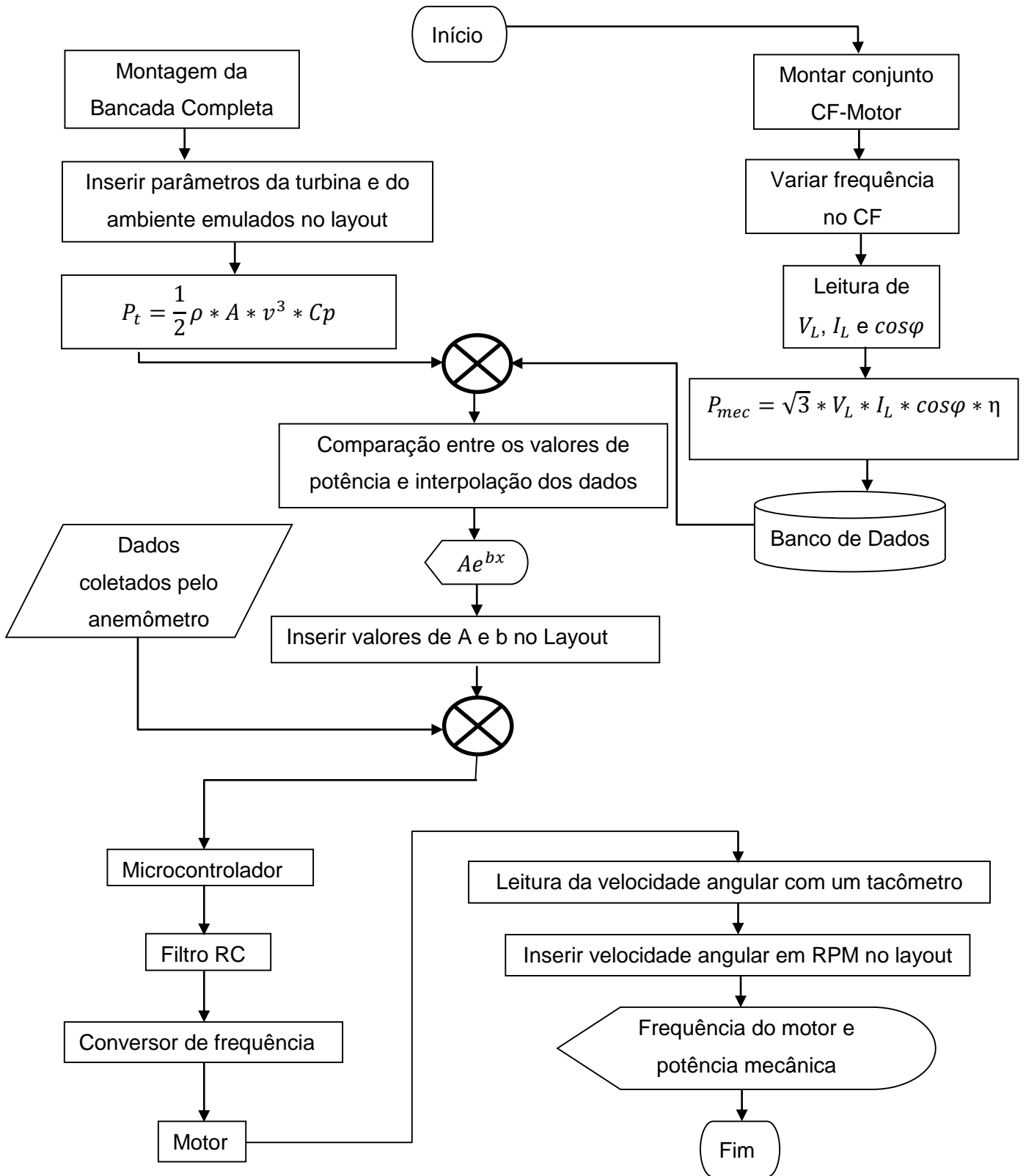
Figura 25 – Curvas de tensão de diferentes  $C_p$  com densidade de vento de  $1,225 \text{ kg/m}^3$  e diâmetro de 3 m



Fonte: Autoria Própria.

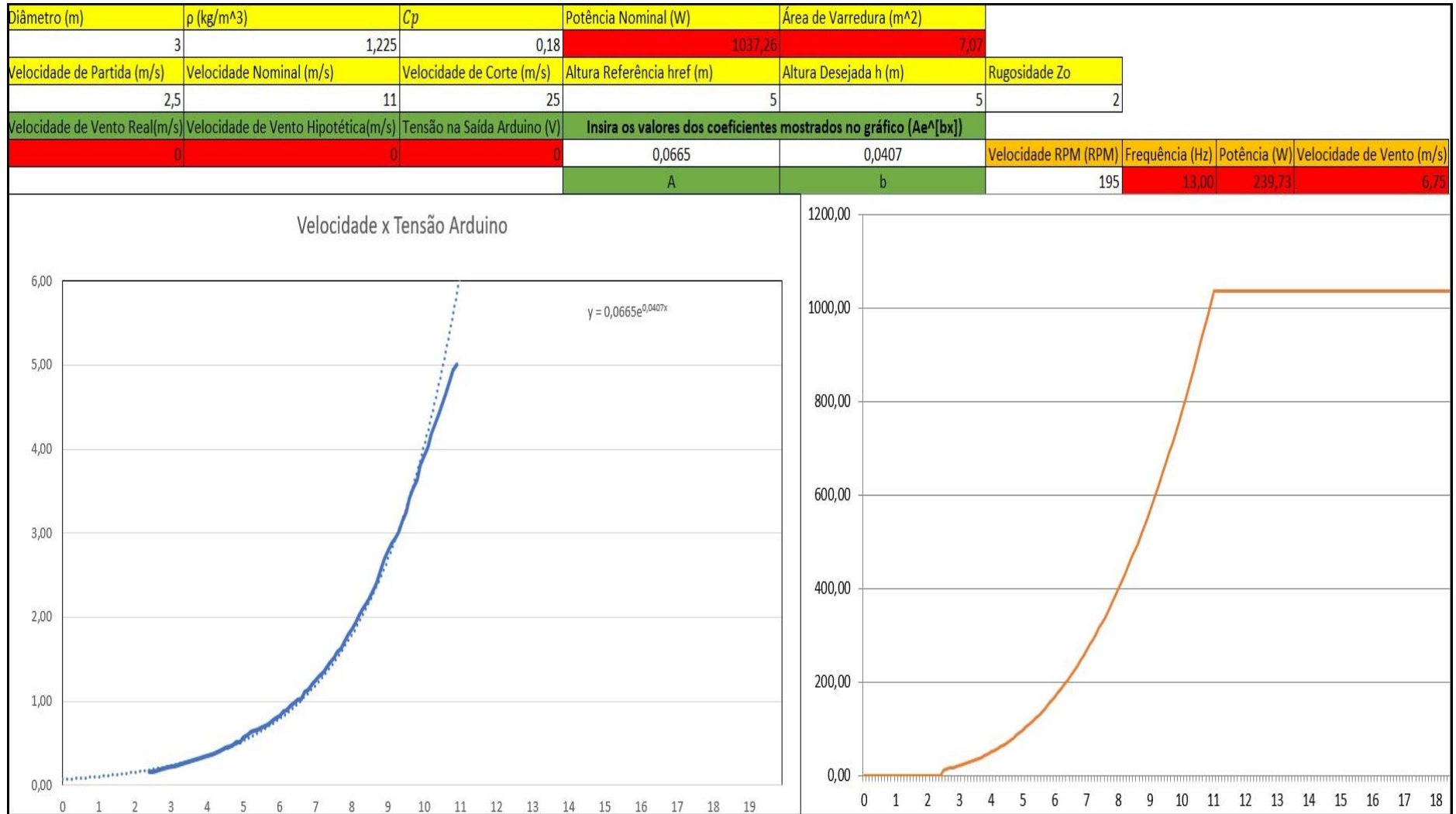
Desse modo, turbinas com parâmetros diferentes podem ser emuladas, necessitando apenas a inserção da equação no microcontrolador. Para este trabalho, todas as equações foram parametrizadas para equações exponenciais, já que foi o tipo de equacionamento que mais se aproximou do esperado. Foi criado um layout, apresentado na figura 27, para que o usuário da bancada insira os parâmetros da turbina e os valores dos coeficientes da equação exponencial. O microcontrolador faz a leitura dos dados que foram inseridos no layout pelo usuário para a emulação desejada. Para a aplicação da equação 5, há a possibilidade de o usuário determinar em que altura deseja que seja estimada a velocidade de vento, determinando também a rugosidade do local onde se encontra o anemômetro. Para um melhor entendimento dos processos de montagem, a figura 26 possui um fluxograma de todo o funcionamento da bancada juntamente ao layout.

Figura 26 - Fluxograma Geral da Bancada



Fonte: Autoria Própria.

Figura 27 – Layout para a parametrização



Fonte: Autoria própria.

### 3.8. Montagem da Bancada

Os dados fornecidos do anemômetro são o sinal de entrada. O anemômetro se encontra instalado no prédio de Engenharia Elétrica e Ciência da Computação da Universidade Federal do Amapá. A haste está apoiada no segundo andar do bloco (figura 28), e a distância entre seu ponto e a base da bancada de testes é menor que 10 m, o que é ideal para o equipamento utilizado.

Figura 28 - Local de instalação do anemômetro

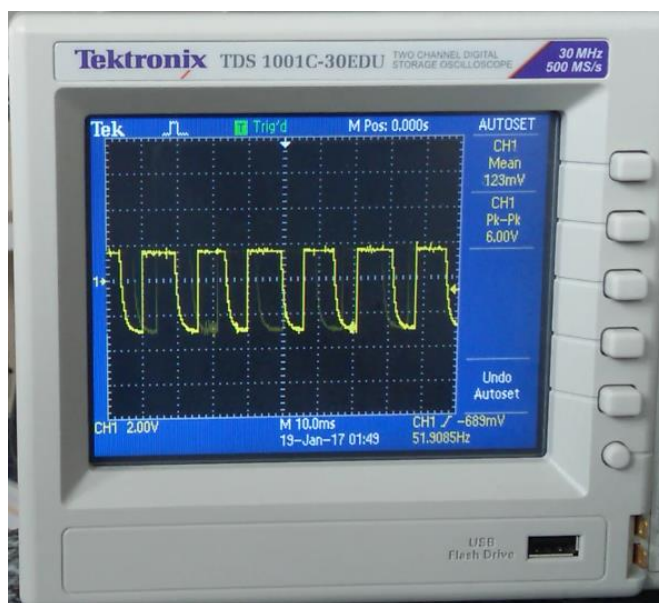


Fonte: Autoria Própria.

É importante lembrar que o ponto de instalação não é o ideal, já que ele sofre influência da estrutura do prédio, bem como não está em uma altura tão elevada. Entretanto, o objetivo do anemômetro não é a coleta de dados, mas sim o teste do funcionamento da bancada. Por isso, leva-se em conta a distância do anemômetro para o laboratório, para facilitar a observação do seu comportamento, e se é equivalente aos dados lidos.

O anemômetro possui dois cabos: um para sua alimentação, feita através de uma fonte de 5V; e outro é o sinal de saída da velocidade de vento, sendo este sinal em forma de trem de pulsos, como apresentado na figura 29.

Figura 29 – Sinal de Saída do Anemômetro em um Osciloscópio.



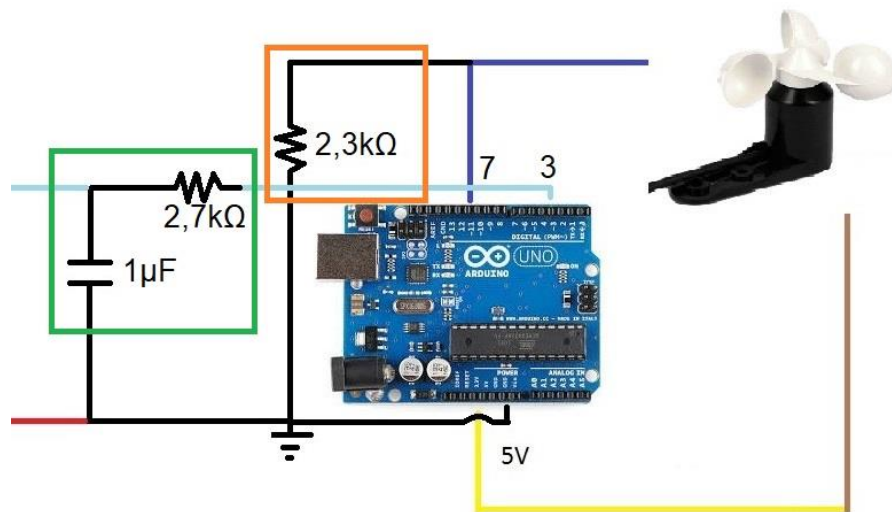
Fonte: Autorial Própria.

A alimentação é feita pela porta 5V do próprio microcontrolador, e a conexão do sinal de saída é feita, também no microcontrolador, em paralelo com um resistor de 2,3 k $\Omega$  conectado à porta terra para a estabilidade da leitura. Tais conexões podem ser visualizadas através das figuras 30 e 31. O microcontrolador recebe o perfil de velocidade de vento na porta de número 7, e o transforma em perfil de potência de vento, utilizando a equação dependente dos parâmetros, como já explicado no tópico 3.7. O sinal de saída do anemômetro é transformado em um sinal PWM através do microcontrolador e enviado para a porta de número 3.

O sinal PWM é um sinal periódico que possui dois níveis, um em 0 e outro em 5V, variando o tempo em que este permanece em cada nível. A porcentagem do período em que o sinal permanece no nível de 5V é o que chamamos de *duty cycle* e a tensão eficaz do sinal será a multiplicação do *duty cycle* e a tensão máxima. Logo, para um *duty cycle* de 50%, a tensão eficaz será de 2,5V enquanto para um *duty cycle* de 100%, a tensão eficaz será de 5V.

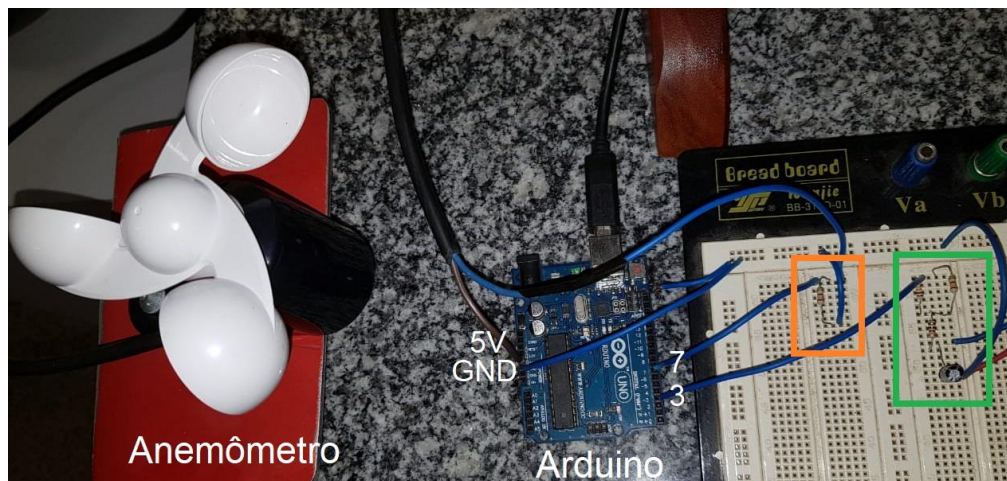
Este sinal passa por um filtro RC, para que o sinal PWM carregue o capacitor, havendo uma leve queda de tensão causada pelo resistor do filtro. A tensão armazenada no capacitor é a tensão eficaz do sinal PWM, logo, a tensão medida nos terminais do capacitor é uma tensão de comportamento linear de 0 a 5V. Foi observado em laboratório que os valores de 2,7k $\Omega$  para a resistência e 1  $\mu$ F para a capacitância melhor se adequaram para o filtro deste trabalho.

Figura 30 – Conexão do anemômetro com o Microcontrolador



Fonte: Autoria Própria.

Figura 31 - Conexão do anemômetro com o microcontrolador real



Fonte: Autoria Própria.

Sendo,

 O resistor para estabilizar o sinal do anemômetro;

 O filtro RC;

Porta 7 - entrada do sinal do anemômetro;

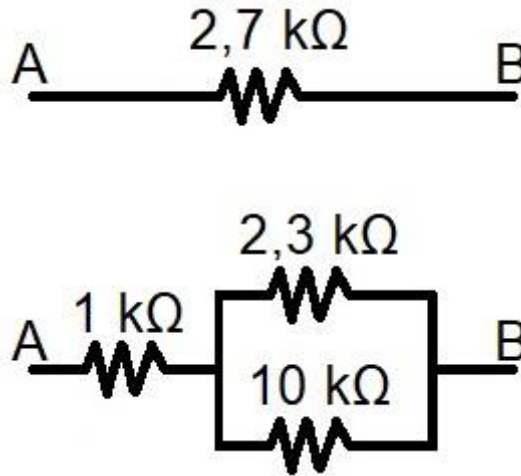
Porta 3 - saída do sinal PWM;

Porta GND - referência terra do circuito;

Porta 5V - Alimentação do anemômetro em 5 V.

Para obter o valor de resistência de 2,7 kΩ, já que não há um resistor com esse valor, foi necessário a utilização de três resistores com valores de, 2,3 kΩ, 10 kΩ e 1 kΩ, conectando-os como demonstra a figura 32.

Figura 32 – Resistência equivalente



Fonte: Autoria Própria.

Entretanto, no filtro RC, há uma leve queda de tensão, causada pelo resistor. Essa queda de tensão foi medida variando a tensão de saída do microcontrolador em 0,5 V, medindo-se a tensão no capacitor. A tabela 6 apresenta os valores de queda de tensão, comparando-os com a frequência aplicada no motor.

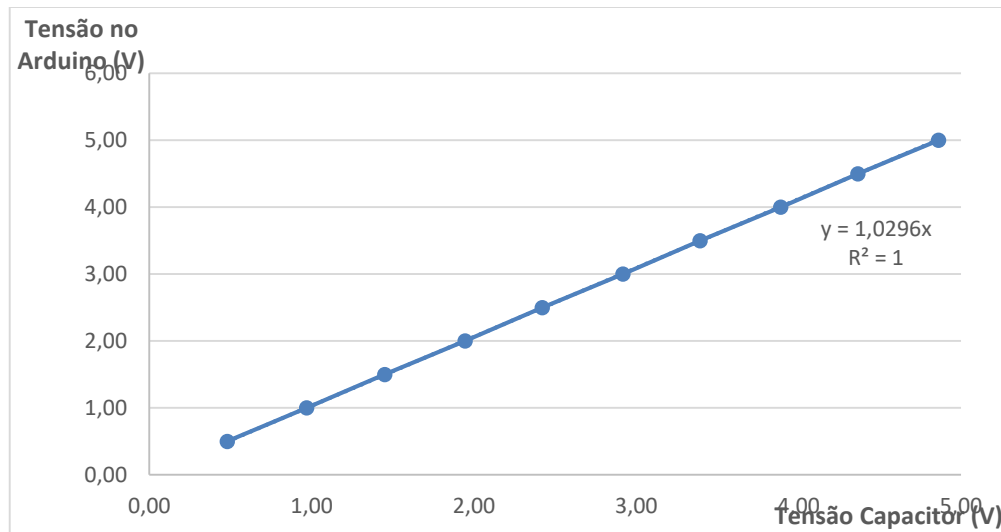
Tabela 6 – Valores de Tensão antes e depois do capacitor.

Tensão programada no microcontrolador (V)	Tensão no Capacitor (V)
0,50	0,48
1,00	0,97
1,50	1,45
2,00	1,95
2,50	2,42
3,00	2,92
3,50	3,39
4,00	3,89
4,50	4,37
5,00	4,86

Fonte: Autoria Própria.

A partir da análise da tabela 6, é possível verificar a necessidade de corrigir a tensão, para que a tensão recebida no CF seja equivalente à tensão programada no microcontrolador. Sendo assim, obteve-se o gráfico da figura 33 e a equação 18 para esta correção.

Figura 33 – Gráfico de correção de tensão.



Fonte: Autoria Própria.

$$y = 1,03 * x$$

(Equação 18)

Esse valor é inserido no CF como ganho de tensão. Este ganho serve para corrigir a perda de tensão no filtro RC. O valor aproximado foi utilizado pelo fato do CF só receber até duas casas decimais. A tabela 7 demonstra a comparação das tensões programada no microcontrolador, de saída do capacitor e após ganho no CF.

Tabela 7 – Valores de Tensão sem e com ganho de 1,03.

Tensão programada no microcontrolador (V)	Tensão no Capacitor (V)	Tensão após o Ganho (V)
0,50	0,48	0,49
1,00	0,97	1,00
1,50	1,45	1,49
2,00	1,95	2,00
2,50	2,42	2,49
3,00	2,92	3,00
3,50	3,39	3,49
4,00	3,89	4,01
4,50	4,37	4,50
5,00	4,86	5,01

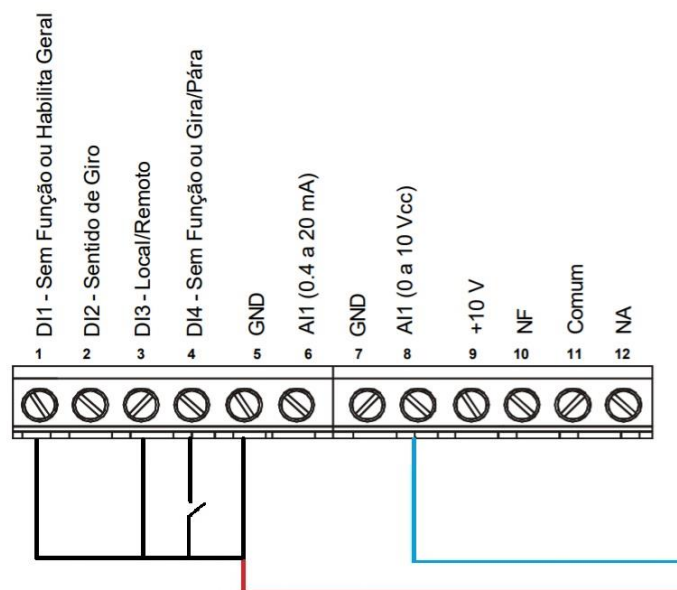
Fonte: Autoria Própria.

Para limitar-se a potência com os valores da turbina eólica de referência, há na programação o valor da velocidade de partida da turbina, onde a tensão enviada para a porta 3 para valores abaixo de 2,5 m/s é igual a 0 V. Bem como o valor de

velocidade nominal que será o momento de potência máxima do sistema. Logo, para valores iguais ou acima de 11 m/s e menores de 25 m/s, o microcontrolador envia uma tensão igual a 5 V para sua porta de saída. Além disso, no caso de velocidades acima de 25 m/s, o microcontrolador volta a enviar uma tensão de 0 V, por ser a velocidade de corte da turbina.

O sinal de saída do microcontrolador é então conectado ao borne de número 8 do CF, o qual recebe o sinal analógico de tensão. Além desta, para o devido funcionamento do CF, é necessário que se habilite os bornes com a porta de número 1, bem como configurar as portas 3 e 4 para o recebimento de dados remotos e o controle de girar e parar o motor, respectivamente. As portas 1, 3 e 4 serão conectadas ao terra, que corresponde a porta de número 5 como mostrado na figura 34. As informações aqui presentes são referentes à tabela 3 nos parâmetros P263 a P266.

Figura 34 – Conexões no Conversor de Frequência.



Fonte: Adaptado manual do usuário do CFW-10.

O CF é responsável pelo controle de tensão e frequência do motor. Assim sendo, estas grandezas são diretamente proporcionais ao sinal recebido pelo CF, sendo também responsáveis pelo torque do motor de indução. Vale ressaltar que a tensão de entrada no CF tem que ser de 0 a 10 V, onde este intervalo é proporcional ao intervalo de frequência determinado pelos parâmetros de frequência mínima e máxima do CF, os quais são 0 e 60 Hz, respectivamente. Como o valor máximo de tensão enviado ao conversor é de 5 V, é necessário ser aplicado um ganho para que

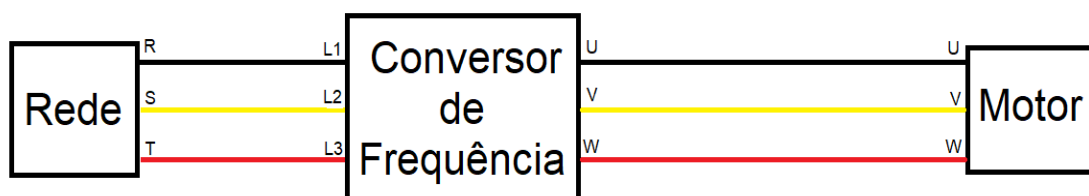
se duplique esse valor. Esse ganho será feito no próprio CF através do parâmetro P234. Como há dois ganhos, o parâmetro P234 será configurado pela multiplicação deles e multiplicado por 100, pois este parâmetro é dado em porcentagem. Logo, será:

$$P234 = 1,03 \cdot 2 \cdot 100$$

$$P234 = 206 \quad \text{(Equação 19)}$$

O motor está conectado em triângulo paralelo, onde a tensão de linha para seu melhor desempenho é de 220 V. O CF aciona o motor de indução através da conexão dos terminais de ambos, como mostrado na figura 35.

Figura 35 – Conexão Conversor-Motor.



Fonte: Autoria Própria.

Com o acionamento do motor, feito através do CF, é realizada a leitura da velocidade angular no eixo de saída da máquina assíncrona com a utilização de um tacômetro, que nos mostra valores variando de 0 a 900 rpm, para o motor usado neste projeto. A velocidade angular se relaciona diretamente com a tensão, e utilizando o layout da figura 36, infere-se o valor da potência mecânica inserindo o valor lido no tacômetro onde se encontra “Velocidade RPM”. Nesse momento, há uma busca de frequência ao banco de dados que determina o valor da velocidade de vento relacionada à potência, e, da mesma forma, a velocidade de vento enviada ao microcontrolador pelo anemômetro.

Figura 36 – Layout do conversor de RPM para velocidade de vento

Velocidade RPM	Frequência	Potência	Vel Vento
900	60,00	1019,55	10,94

Fonte: Autoria Própria.

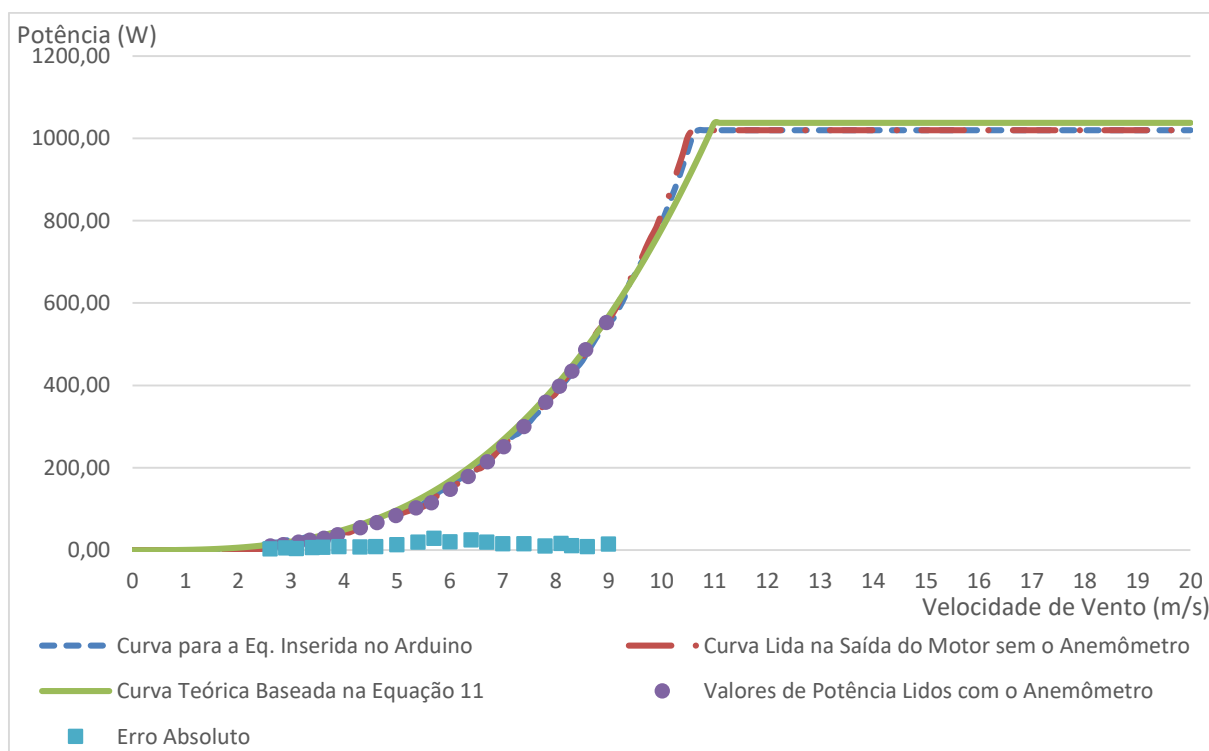
Toda a metodologia apresentada no presente capítulo foi posta em prática, e seus resultados, análises e conclusões são mostrados no capítulo seguinte.

#### 4. Emulação e Análise de Resultados.

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados obtidos para emular as equações apresentadas no tópico 3.7 e o comportamento dos variados parâmetros apresentados no Capítulo 2. Para se avaliar o comportamento da bancada para todos os valores de velocidade de vento, não era viável a utilização do anemômetro pelo fato da velocidade de vento não ser constante. Com isso, alguns valores foram lidos com o uso do anemômetro, mas para uma maior precisão de resultados, valores de velocidade de vento foram inseridos diretamente no microcontrolador. Os gráficos apresentados neste capítulo possuem tanto os valores de entrada manualmente inserida quando os lidos com o anemômetro.

Na fase de testes, para os parâmetros da turbina de referência, considerando a densidade do ar a mesma a nível do mar, ou seja  $1,225 \text{ kg/m}^3$ , constatou-se que para um  $C_p$  de 0,18, os valores de potência mecânica atingiam a potência nominal do motor na velocidade nominal da turbina de referência, bem como apresentado na figura 37, na qual é perceptível que o comportamento gráfico das 3 curvas é muito semelhante entre elas. Por este motivo, o valor de 0,18 será considerado o padrão para os resultados.

Figura 37 – Curvas comparativas com  $C_p$  de 0,18.



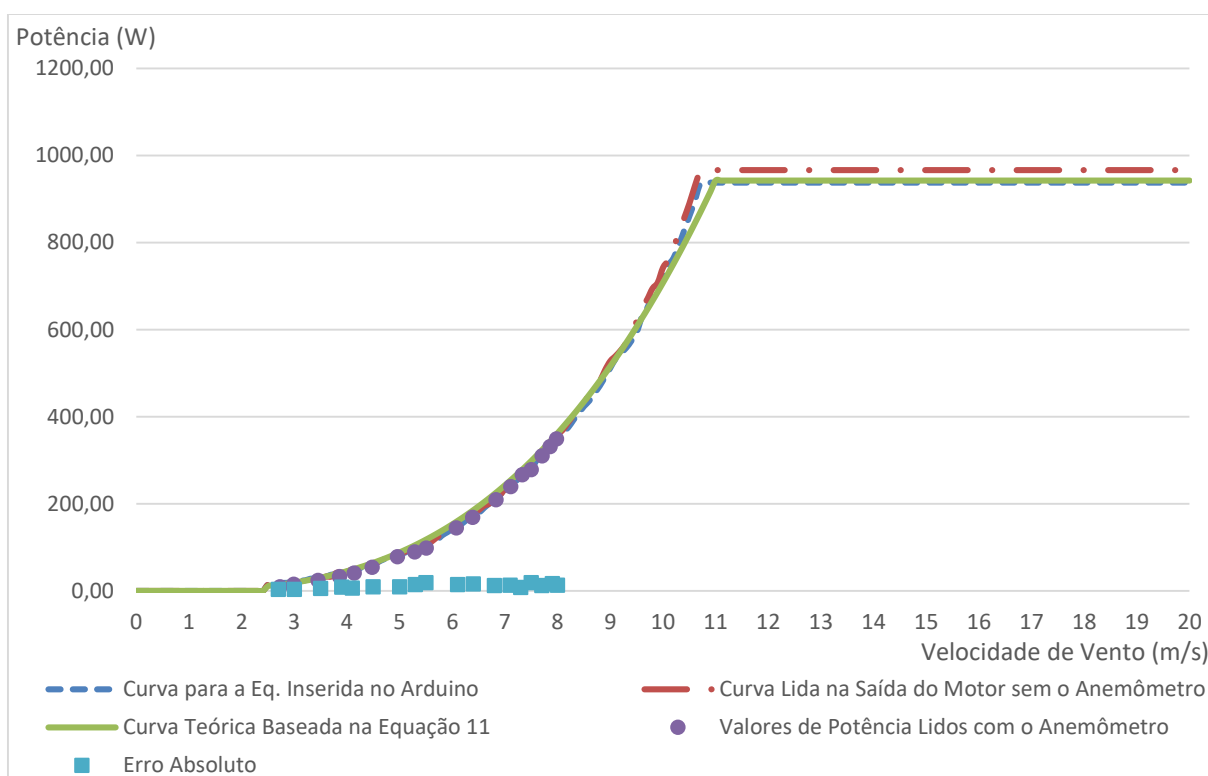
Fonte: Autoria Própria.

Na figura 37, a diferença entre os valores de potência lidos na saída do motor utilizando o anemômetro e os valores esperados baseados na equação da potência teve uma média absoluta de 13,01 W, sendo que a maior diferença entre estes dados para uma determinada velocidade de vento é de 28,9 W, o que corresponde a 20% para o ponto de leitura. Esse número se deve por ser lido a uma baixa velocidade de vento, em que, por menor que seja a diferença em Watts, a porcentagem terá um valor elevado. São apresentados graficamente os pontos no valor absoluto, observando-se que os valores são baixos em relação à potência nominal em que se está trabalhando. Nota-se com isso que a bancada é eficiente e que possui um erro considerado aceitável para este tipo de projeto.

Assim como a figura 37, os gráficos apresentam três curvas, as quais foram obtidas baseadas em: 1) Os valores de potência em relação à velocidade para a equação 11, a qual calcula a potência da turbina a partir de características próprias de cada turbina e do local de instalação; 2) As equações obtidas com a modificação dos parâmetros e inseridas no microcontrolador correlacionadas aos valores de potência do banco de dados e 3) Os valores de velocidade angular lidos na saída do motor de indução e correlacionados ao banco de dados, sendo estes os resultados do trabalho.

Variando-se a densidade do ar, simulando variações de alturas, já que quanto mais alto o ponto de instalação, menor a densidade do ar, foi feita a análise de três valores de densidade: 1) a nível do mar, já apresentado na figura 37, no valor de  $1,225 \text{ kg/m}^3$ ; 2)  $1,1125 \text{ kg/m}^3$  e 3)  $1 \text{ kg/m}^3$ , para demonstrar o comportamento sob a variação destes valores. Para a turbina de referência, considerando a densidade do ar de  $1,1125 \text{ kg/m}^3$ , a figura 38 apresenta os seguintes resultados:

Figura 38 - Curvas comparativas com densidade do ar de 1,1125 kg/m<sup>3</sup>.

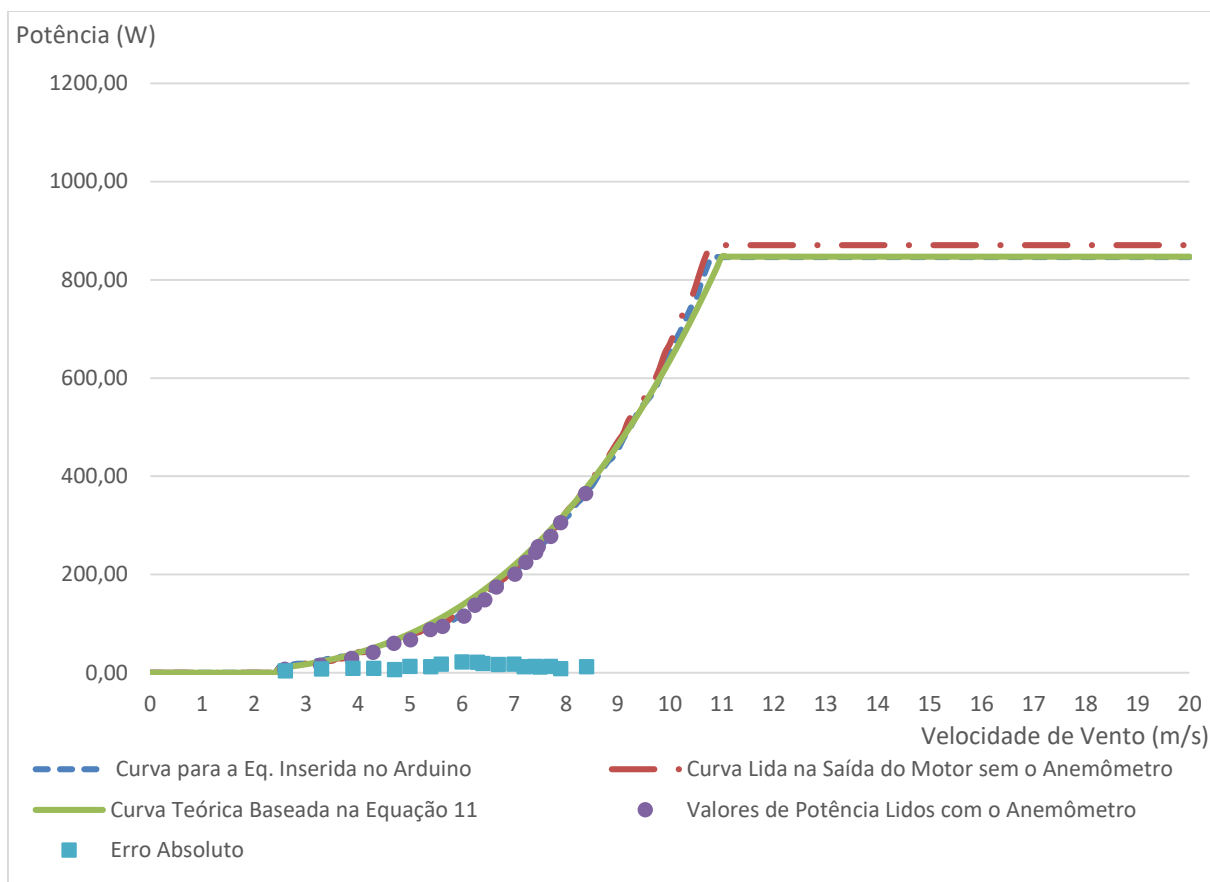


Fonte: Autoria Própria.

Somente ao chegar no ponto de velocidade nominal, pode-se perceber uma diferença notável entre as curvas. A diferença entre os valores de potência lidos na saída do motor utilizando o anemômetro e os valores esperados baseados na equação da potência teve uma média absoluta de 11,82 W, sendo que a maior diferença entre estes dados para uma determinada velocidade de vento é de 19,45 W, o que corresponde a 7% para o ponto de leitura. A curva para a equação de potência da turbina para estes parâmetros é menor do que os resultados obtidos. Acredita-se que o ganho inserido para a correção da queda de tensão influencia, para certos valores de frequência, no aumento de potência nominal.

De semelhante modo, os resultados obtidos para a densidade do ar igual a 1 kg/m<sup>3</sup> são apresentados na figura 39.

Figura 39 - Curvas comparativas com densidade do ar de 1 kg/m<sup>3</sup>.

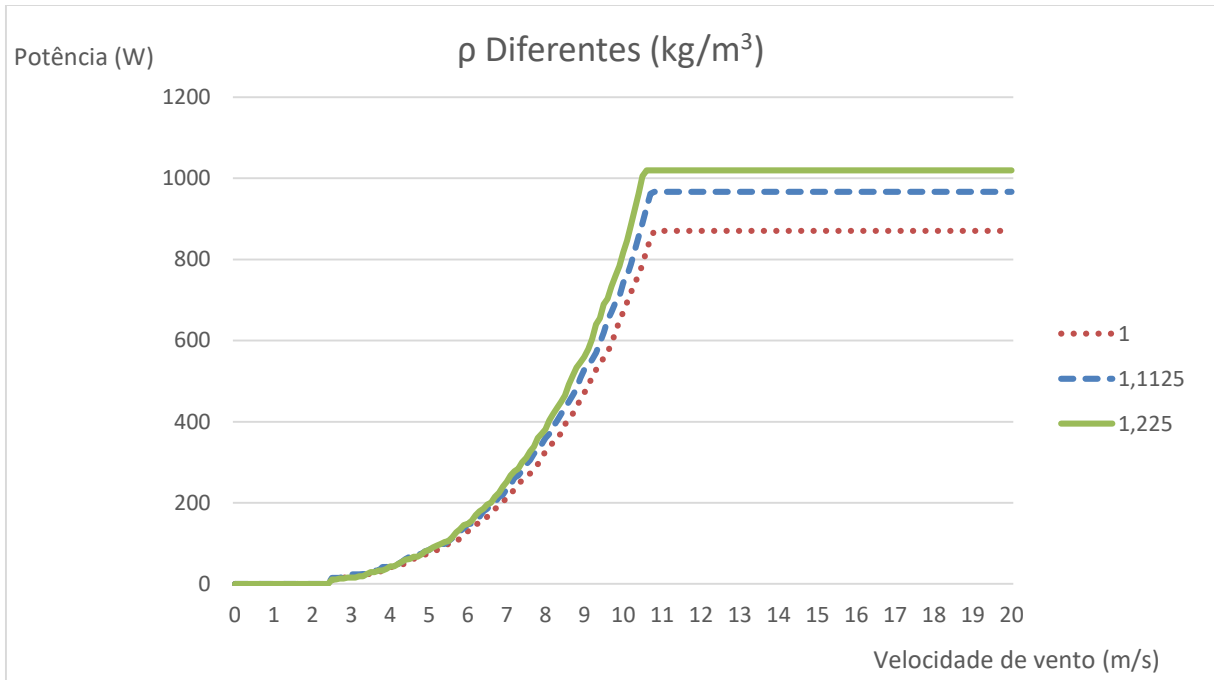


Fonte: Autoria Própria.

Neste caso da figura 39, a diferença entre os valores de potência lidos na saída do motor utilizando o anemômetro e os valores esperados baseados na equação da potência teve uma média absoluta de 12,88 W, sendo que a maior diferença entre estes dados para uma determinada velocidade de vento é de 21,99 W, o que corresponde a 16% para o ponto de leitura.

Todos os valores medidos ao final de cada teste foram comparados de acordo com o parâmetro analisado. Para a variação de densidade do ar, os valores medidos na saída da máquina assíncrona são apresentados na Figura 40.

Figura 40 - Curvas comparativas para variados valores de densidade de ar.

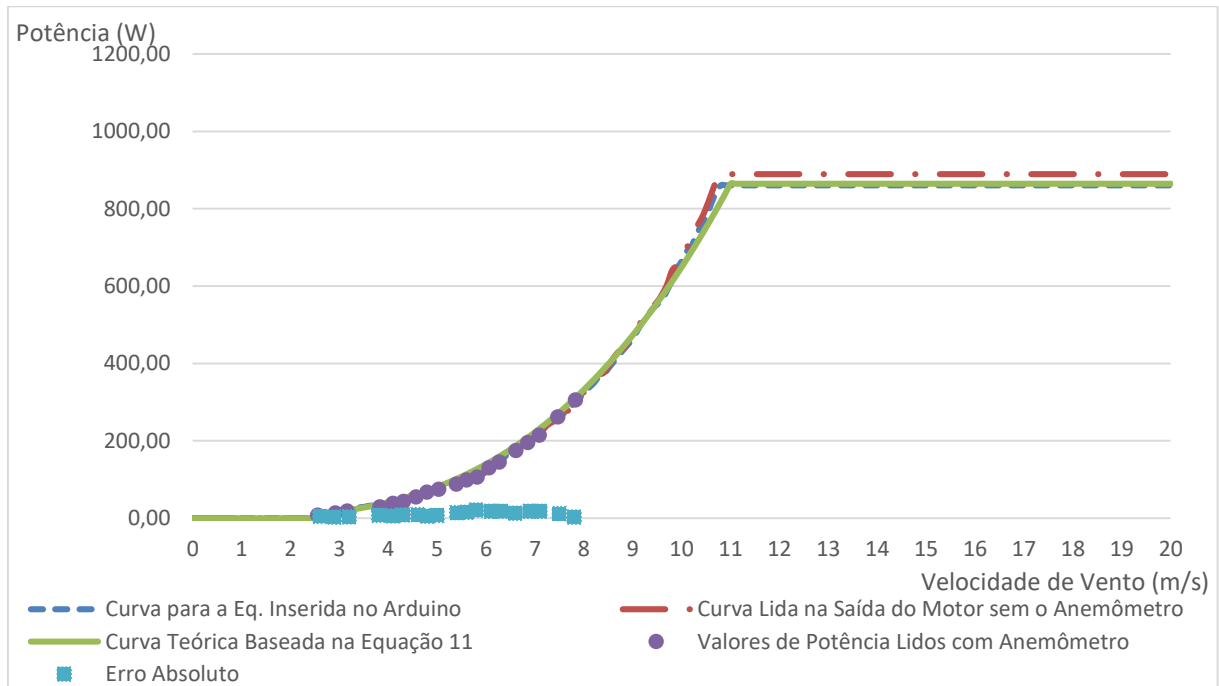


Fonte: Autoria Própria.

A comparação da variação de densidade do ar demonstra que os valores de densidade influenciam no momento em que a potência nominal é alcançada, e que para a densidade do ar, para as características já apresentadas, igual a 1 kg/m<sup>3</sup>, a potência nominal da turbina é menor do que para outros valores, pela influência da densidade na equação 11.

Ainda que o gráfico para um  $C_p$  de 0,18 tenha atingido um ótimo resultado, o objetivo deste projeto é de emular turbinas em várias condições, ou seja, para as variações de densidade, como mostrado anteriormente, assim como para variações de  $C_p$ . Para fins de demonstração do método, além do  $C_p$  igual a 0,18, foram considerados os  $C_p$ s de: 1) 0,15; 2) 0,25 e 3) 0,35. A figura 41 mostra os resultados para um  $C_p$  de 0,15.

Figura 41 - Curvas comparativas com  $C_p$  de 0,15.



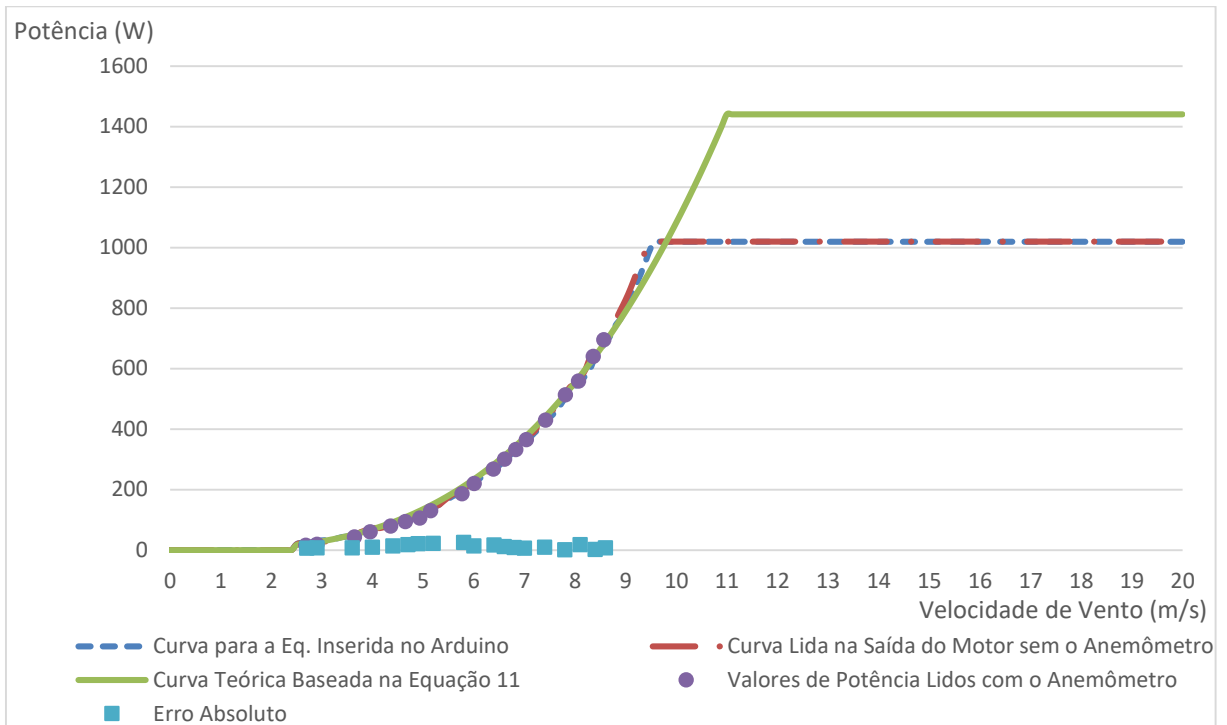
Fonte: Autoria Própria.

Neste caso da figura 41, a diferença entre os valores de potência lidos na saída do motor utilizando o anemômetro e os valores esperados baseados na equação da potência teve uma média absoluta de 10,51 W, sendo que a maior diferença entre estes dados para uma determinada velocidade de vento é de 20,77 W, o que corresponde a 16% para o ponto de leitura.

Para estas características, o valor de  $C_p$  influencia no fato de que a potência nominal desta turbina chega a ser menor do que a máxima potência que o motor pode atingir, ou seja, pode-se dizer que a eficiência desta turbina é menor do que a ideal. Outros valores de  $C_p$  abaixo de 0,15 atingem uma potência nominal ainda menor, sendo esta bancada eficiente em emular o comportamento de todas, com exceção daquelas que possuem parâmetros dos quais sua potência nominal seria acima da fornecida pela máquina assíncrona.

De semelhante modo, os valores obtidos para um  $C_p$  de 0,25 são apresentados na figura 42. Nota-se que, de acordo com a equação de potência da turbina, a potência nominal atinge um valor superior à potência máxima de saída do motor. Ainda assim, o comportamento até que se atinja a potência máxima do motor é bastante satisfatório para o objetivo. Pode-se inferir também que, para uma pequena alteração de  $C_p$ , a potência nominal da turbina aumenta consideravelmente.

Figura 42 - Curvas comparativas com  $C_p$  de 0,25.

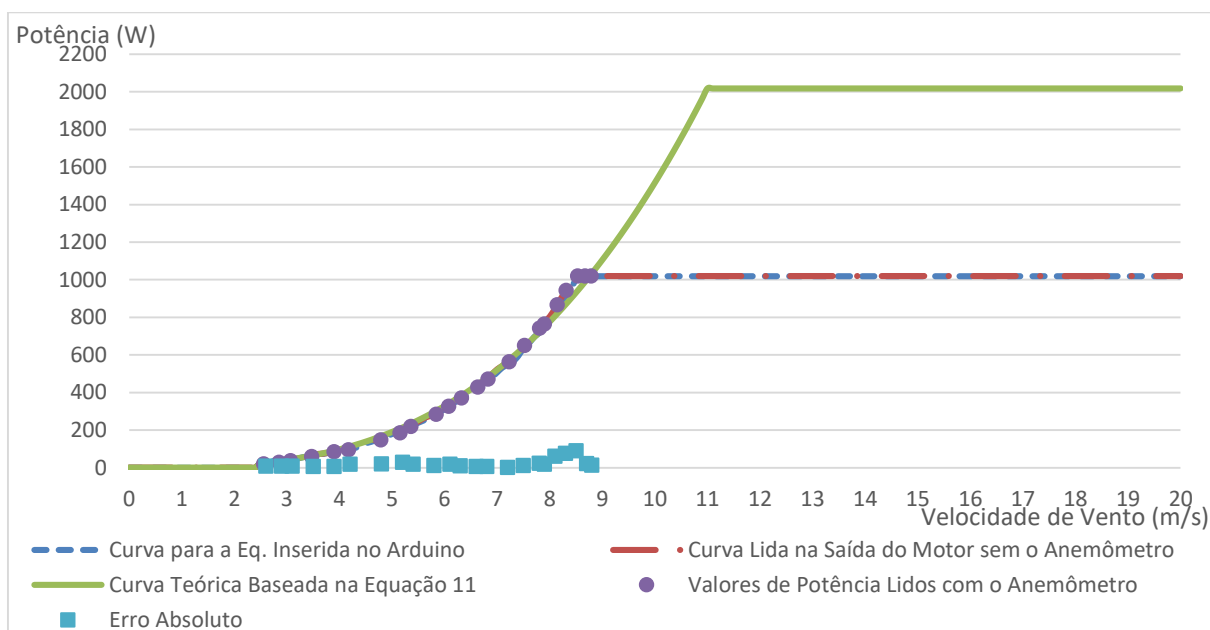


Fonte: Autoria Própria.

Para a figura 42, a diferença entre os valores de potência lidos na saída do motor utilizando o anemômetro e os valores esperados baseados na equação da potência teve uma média absoluta de 11,78 W, sendo que a maior diferença entre estes dados para uma determinada velocidade de vento é de 25,67 W, o que corresponde a 12% para o ponto de leitura.

De semelhante modo, para um  $C_p$  de 0,35, a emulação teve o comportamento conforme a figura 43. Para este  $C_p$ , a potência nominal, de acordo com a equação 11, é o dobro do que o motor produz o que significa que, para estes parâmetros, o máximo valor simulado para o  $C_p$ , a fim de que se atinja a potência nominal, é o de 0,18. Os valores de  $C_p$  abaixo de 0,18 conseguem emular a turbina até a condição nominal.

Figura 43 - Curvas comparativas com  $C_p$  de 0,35.



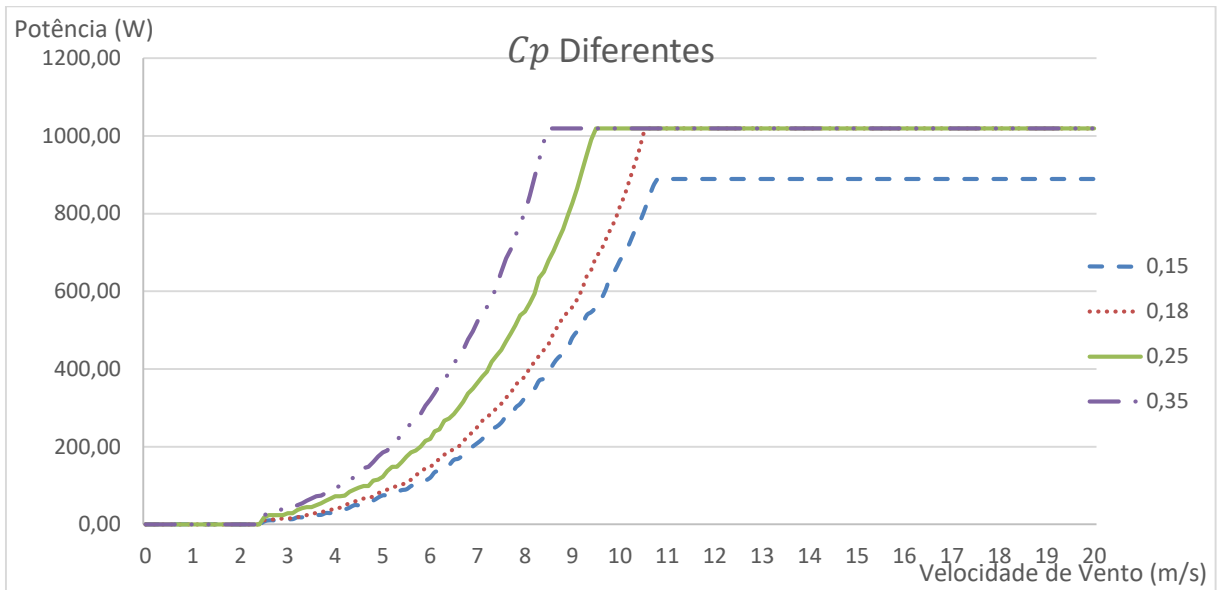
Fonte: Autoria Própria.

Para a figura, 43, a diferença entre os valores de potência lidos na saída do motor utilizando o anemômetro e os valores esperados baseados na equação da potência teve uma média absoluta de 20,89 W, sendo que a maior diferença entre estes dados para uma determinada velocidade de vento é de 88,77 W, o que corresponde a 10% para o ponto de leitura.

Nota-se em todos os casos que a curva de resultados lidos na saída do motor se sobrepõe a curva da equação inserida no microcontrolador, tornando-a de difícil visualização nas figuras 37 a 39 e 41 a 43. A curva de potência de saída do motor segue quase que perfeitamente a curva da equação inserida no microcontrolador, podendo-se concluir que a aproximação da interpolação feita para obtenção da curva da equação inserida no microcontrolador ocasionou as diferenças das figuras 38, 39 e 41.

Assim como foi feito com os valores de densidade do ar, a Figura 44 apresenta os valores da potência de saída do motor de acordo com a variação dos valores de  $C_p$ . Infere-se que os maiores valores de  $C_p$  atingem a potência nominal em uma velocidade de vento menor do que para valores inferiores. O único valor que não atinge a potência máxima de saída do motor é o relacionado ao  $C_p$  de 0,15, pois sua potência nominal é menor do que a de saída do motor.

Figura 44 - Curvas comparativas para variados valores de  $C_p$ .

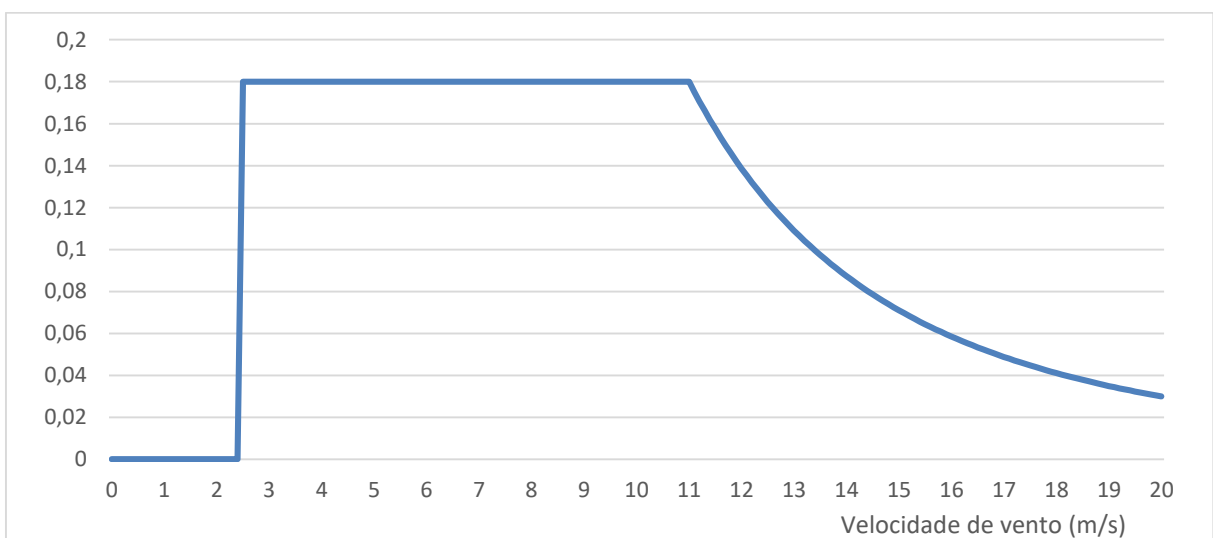


Fonte: Autoria Própria.

É importante lembrar que, devido à limitação de potência determinada tanto pela potência nominal do CF quanto do motor, esta emulação foca em microturbinas, trazendo valores de potência da turbina consideravelmente baixos em relação a uma turbina eólica de grande porte. Isto é perceptível no momento em que os valores atingidos para potências maiores que a nominal do rotor são limitados a esta.

A seguir, na figura 45, se tem o comportamento do  $C_p$  em relação à velocidade de vento.

Figura 45 – Curva de  $C_p$  versus Velocidade de vento, para um  $C_p$  de 0,18.



Fonte: Autoria Própria.

Para um  $C_p$  de valor fixo, ele atinge esse valor no momento da velocidade de partida e mantém-se constante. Nota-se que, a partir do momento em que se

alcança a velocidade nominal, em 11 m/s, o  $C_p$  começa a decair até que atingirá um valor nulo, equivalente à velocidade de corte da turbina, já que a turbina é desligada por questões de segurança, entretanto, a turbina de referência não possui definida qual a sua velocidade de corte pelo fabricante, mas para fins de demonstração, foi considerada uma velocidade de corte de 25 m/s.

Com a conexão do anemômetro, se fez a leitura de velocidade angular em vários momentos, para saber tanto a velocidade de vento lida pelo equipamento quanto a potência mecânica semelhante à da turbina. As leituras equivaleram-se com todos os valores inseridos no microcontrolador, mostrando a eficácia do projeto, sendo assim, todas as curvas de potência para os mais variados parâmetros se apresentaram satisfatórias para o objetivo deste trabalho, se comportando de forma semelhante à esperada.

## 5. Conclusão

Neste trabalho de conclusão de curso foi proposto um recurso a fim de se emular uma turbina eólica real, sabendo da importância de estudos mais profundos na área de energias renováveis, além de explorar uma fonte de energia que vem crescendo tanto nos últimos tempos. A emulação da turbina foi baseada em suas características dominantes, visando assim se aproximar ao máximo de seus parâmetros de funcionamento. Para este trabalho, foi preferível trabalhar em regime permanente, não levando em consideração os atrasos em decorrência dos dispositivos utilizados, como atraso de resposta do filtro, nem considerando características transitórias como a inércia do motor.

Com o avanço tecnológico e as pesquisas na área de energia eólica fez com que os campos acadêmico e profissional despertassem ainda mais interesse para estudos a respeito deste tema. Devido ao alto custo de aquisição, além das características físicas de um aerogerador real, o estudo na área se torna mais difícil, podendo se utilizar da inserção de softwares e bancadas de simulação e emulação, como o caso deste projeto, contribuindo para estes estudos na geração eólica.

Portanto, a metodologia proposta utilizou um motor de indução tipo gaiola de esquilo acionado pelo conversor de frequência CFW-10. Este motor tem como objetivo emular a rotação de uma turbina eólica real. Os dados de potência foram acoplados a um banco de dados, do qual compara-se os valores de frequência diretamente proporcionais à velocidade angular de saída do motor com a potência. O perfil de vento foi obtido através de dados de velocidade de vento lidos em tempo real provenientes de um anemômetro. Estes dados, por possuírem um perfil de trem de pulsos, foram transformados em forma de tensão através de um microcontrolador, juntamente com um filtro RC. Os dados de velocidade de vento são a variável de entrada da bancada de emulação.

Através da análise de potência obtida com os testes finais, este trabalho apresentou resultados satisfatórios, pois suas curvas de potência muito se assemelham com as desejadas, podendo-se considerar possível análises e estudos sobre energia eólica por conta deste projeto. Além disso, a análise de erro, ou seja, da diferença dos valores esperados e obtidos possui, em módulo, um valor baixo em relação a potência nominal que está sendo analisada, satisfazendo o objetivo da aproximação da realidade. Pode-se dizer então, que o conjunto de equipamentos

cumprir a função estabelecida de emular turbinas eólicas reais, como conseguiu emular o comportamento das características dominantes da turbina eólica selecionada como referência.

Constatou-se que a limitação de tensão de saída na programação do microcontrolador comportou-se similarmente ao controle de passo, pertencente em muitas turbinas no mercado, sendo um método eficaz para situações em que a velocidade de vento é superior à nominal, não sobrecarregando a turbina.

O estudante ou profissional de engenharia elétrica, bem como qualquer interessado na área, pode, ainda, emular o comportamento de outras turbinas encontradas no mercado que possuam uma potência nominal superior à máxima potência de saída da máquina assíncrona, bem como uma turbina em desenvolvimento, tendo apenas que se adaptar os equipamentos às novas turbinas emuladas, e outros parâmetros relevantes para estudos posteriores. Logo, a bancada se tornou viável não somente para a emulação de um aerogerador específico, mas para diferentes modelos com as inserções dos parâmetros específicos do modelo desejado. Além disso, é possível analisar o comportamento de um aerogerador em diferentes modos de operação quando submetidos a variações de velocidade de vento.

Entretanto, para que os resultados sejam ainda mais precisos, é necessário que se tenha um levantamento de características específicas, com mais informações técnicas com foco no objetivo. Por este motivo, propõe-se para trabalhos futuros que se conecte um gerador e analise o seu comportamento em conexão com uma carga. Ademais, pode-se aprimorar o comportamento de um aerogerador trazendo à tona o efeito de sombreamento sobre a turbina e sua influência na potência, além de se testar o controle de Yawing, pertencente em algumas turbinas encontradas no mercado. Há também a análise dos ângulos da pá, sendo de suma importância para a melhoria deste projeto. Em geral, espera-se que futuramente sejam feitas análises em regime transitório, para uma maior aproximação com a realidade possível, considerando atrasos de resposta do sistema, e todas as características que não foram incluídas neste trabalho.

Inferiu-se deste projeto, não apenas o funcionamento de turbinas eólicas, como também a importância de estudos sobre fontes alternativas, para que se possa conscientizar sobre o meio ambiente e saber que a Engenharia Elétrica proporciona

e incentiva que busquemos novos meios de solucionar os problemas mundiais, como é o caso do aquecimento global. Quanto mais estudos nessas áreas, mais opções de minimizar os impactos causados pelo uso indevido da energia se têm.

## Referências Bibliográficas

ALMEIDA, W.J.S., **Sistema Autônomo de Aquisição de Dados para Monitoramento Ambiental com Modem GSM**. Monografia de Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, 2011.

AL-SHEMMERI, T. **Wind Turbines**. Stoke-on-Trent, Staffordshire, 2010.

CARVALHO, P.C.M., **Geração eólica**. 1ª ed. Fortaleza: Imprensa Universitária, Fortaleza, CE, 2003.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Porto Alegre, RS, 2013.

CRESESB, DUTRA, R., **Energia Eólica: Princípios e Tecnologia**. Rio de Janeiro, RJ, 2009.

CUNHA, A. L. S., NOCILOTTE, J. H., **Implementação de Uma Bancada para um Simulador de Microgerador Eólico**. Monografia de graduação em engenharia elétrica, Universidade Tecnológica do Paraná, Curitiba, PR, 2015.

DOLAN, D. S. L., LEHN, P. W., **Real-Time Wind Turbine Emulator suitable for Power Quality and Dynamic Control Studies**, Montreal, 2005.

FRONIUS. **Fronius**. Disponível em <[www.fronius.com](http://www.fronius.com)>. Acessado em 10 de fevereiro de 2018

HEMAMI, A. **Wind Turbine Technology**. Clifton Park, NY, 2012.

JOHNSON, G.L., **Wind Energy Systems**. Manhattan, KS, 2006.

KESTREL. **Kestrelwind**. Disponível em <[www.kestrelwind.co.za](http://www.kestrelwind.co.za)> Acessado em 15 de março de 2018.

Lathi, B. P., **Sinais e sistemas lineares**. Tradução por Gustavo Guimarães Parma. 2ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2007.

PINHO, J. T., et al., **Sistemas híbridos: Soluções Energéticas para a Amazônia**. 1ª ed. Brasília: Ministério de Minas e Energia, Brasília, DF, 2008.

RÊGO SEGUNDO, A. K., RODRIGUES, C. L. C. **Eletrônica de Potência e Acionamento Elétricos**. Minas Gerais, 2015.

ROCHA, R. V., **Simulação de Aerogerador em uma Bancada Experimental**, Rio de Janeiro, 2008.

SOUZA, J. F. A. et al., **Uma revisão sobre a turbulência e sua modelagem**, São Paulo, 2011.

TOLMASQUIM, M.T. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro, 2016.

TRIGUEIRO, A. **Brasil pode se tornar o primeiro país do mundo a cobrar royalties do vento**. G1, Rio de Janeiro, 2017.

## Apêndice I

Banco de dados das medições de variáveis da relação CF-motor.

Frequência	Tensão	Corrente	Fator de Potência	Potência Elétrica	Potência Mecânica
0	0	0	0	0	0
0,1	0	0	0	0,00	0,00
0,2	0	0	0	0,00	0,00
0,3	1	0	0	0,00	0,00
0,4	1	0	0	0,00	0,00
0,5	1	0	0	0,00	0,00
0,6	2	0	0	0,00	0,00
0,7	2	0	0	0,00	0,00
0,8	2	0	0	0,00	0,00
0,9	3	0,54	0,81	2,27	1,70
1	3	0,54	0,81	2,27	1,70
1,1	3	0,57	0,81	2,40	1,79
1,2	4	0,83	0,81	4,66	3,48
1,3	4	0,83	0,81	4,66	3,48
1,4	4	0,83	0,81	4,66	3,48
1,5	5	1,4	0,81	9,82	7,34
1,6	5	1,4	0,81	9,82	7,34
1,7	6	1,5	0,81	12,63	9,43
1,8	6	1,6	0,81	13,47	10,06
1,9	6	1,7	0,81	14,31	10,69
2	7	1,8	0,81	17,68	13,20
2,1	7	2	0,81	19,64	14,67
2,2	7	2,1	0,81	20,62	15,41
2,3	8	2,15	0,81	24,13	18,03
2,4	8	2,2	0,81	24,69	18,45
2,5	8	2,3	0,81	25,81	19,28
2,6	9	2,5	0,81	31,57	23,58
2,7	9	2,6	0,8	32,42	24,22
2,8	9	2,6	0,8	32,42	24,22
2,9	10	2,7	0,8	37,41	27,95
3	10	2,8	0,8	38,80	28,98
3,1	11	2,8	0,8	42,68	31,88
3,2	11	2,9	0,8	44,20	33,02
3,3	11	2,9	0,8	44,20	33,02
3,4	12	3	0,8	49,88	37,26
3,5	12	3	0,8	49,88	37,26
3,6	12	3,1	0,8	51,55	38,50
3,7	13	3,1	0,8	55,84	41,71
3,8	13	3,2	0,8	57,64	43,06
3,9	13	3,3	0,8	59,44	44,40
4	14	3,4	0,8	65,96	49,27

4,1	14	3,4	0,8	65,96	49,27
4,2	14	3,4	0,8	65,96	49,27
4,3	15	3,5	0,8	72,75	54,34
4,4	15	3,6	0,8	74,82	55,89
4,5	16	3,6	0,8	79,81	59,62
4,6	16	3,7	0,8	82,03	61,28
4,7	16	3,7	0,8	82,03	61,28
4,8	17	3,8	0,8	89,51	66,87
4,9	17	3,8	0,8	89,51	66,87
5	17	3,9	0,8	91,87	68,63
5,1	18	3,9	0,8	97,27	72,66
5,2	18	3,9	0,8	97,27	72,66
5,3	18	4	0,8	99,77	74,53
5,4	19	4	0,8	105,31	78,67
5,5	19	4,1	0,8	107,94	80,63
5,6	19	4,1	0,8	107,94	80,63
5,7	20	4,1	0,79	112,20	83,82
5,8	20	4,1	0,79	112,20	83,82
5,9	21	4,1	0,79	117,81	88,01
6	21	4,1	0,79	117,81	88,01
6,1	21	4,2	0,79	120,69	90,15
6,2	22	4,2	0,79	126,43	94,45
6,3	22	4,2	0,79	126,43	94,45
6,4	22	4,2	0,79	126,43	94,45
6,5	23	4,2	0,79	132,18	98,74
6,6	23	4,2	0,79	132,18	98,74
6,7	23	4,2	0,79	132,18	98,74
6,8	24	4,2	0,79	137,93	103,03
6,9	24	4,2	0,79	137,93	103,03
7	24	4,2	0,79	137,93	103,03
7,1	25	4,2	0,78	141,85	105,97
7,2	25	4,2	0,78	141,85	105,97
7,3	25	4,2	0,78	141,85	105,97
7,4	26	4,3	0,78	151,04	112,83
7,5	26	4,3	0,78	151,04	112,83
7,6	26	4,4	0,78	154,55	115,45
7,7	27	4,4	0,78	160,50	119,89
7,8	27	4,5	0,78	164,15	122,62
7,9	28	4,5	0,78	170,23	127,16
8	28	4,6	0,78	174,01	129,98
8,1	28	4,6	0,78	174,01	129,98
8,2	29	4,6	0,78	180,22	134,63
8,3	29	4,7	0,78	184,14	137,55
8,4	29	4,7	0,78	184,14	137,55
8,5	30	4,7	0,78	190,49	142,30
8,6	30	4,8	0,78	194,54	145,32

<b>8,7</b>	30	4,8	0,78	194,54	145,32
<b>8,8</b>	31	4,8	0,77	198,45	148,24
<b>8,9</b>	31	4,8	0,77	198,45	148,24
<b>9</b>	31	4,8	0,77	198,45	148,24
<b>9,1</b>	32	4,8	0,77	204,85	153,03
<b>9,2</b>	32	4,9	0,77	209,12	156,21
<b>9,3</b>	33	4,9	0,77	215,66	161,09
<b>9,4</b>	33	4,9	0,77	215,66	161,09
<b>9,5</b>	33	4,9	0,77	215,66	161,09
<b>9,6</b>	34	4,9	0,77	222,19	165,98
<b>9,7</b>	34	5	0,77	226,73	169,36
<b>9,8</b>	34	5	0,77	226,73	169,36
<b>9,9</b>	35	5	0,77	233,39	174,35
<b>10</b>	35	5	0,77	233,39	174,35
<b>10,1</b>	35	5	0,77	233,39	174,35
<b>10,2</b>	36	5	0,77	240,06	179,33
<b>10,3</b>	36	5	0,77	240,06	179,33
<b>10,4</b>	36	5	0,77	240,06	179,33
<b>10,5</b>	37	5,1	0,76	248,40	185,55
<b>10,6</b>	37	5,1	0,76	248,40	185,55
<b>10,7</b>	37	5,1	0,76	248,40	185,55
<b>10,8</b>	38	5,1	0,76	255,11	190,57
<b>10,9</b>	38	5,1	0,76	255,11	190,57
<b>11</b>	39	5,1	0,76	261,82	195,58
<b>11,1</b>	39	5,1	0,76	261,82	195,58
<b>11,2</b>	39	5,1	0,76	261,82	195,58
<b>11,3</b>	40	5,1	0,76	268,54	200,60
<b>11,4</b>	40	5,1	0,76	268,54	200,60
<b>11,5</b>	40	5,1	0,76	268,54	200,60
<b>11,6</b>	41	5,1	0,76	275,25	205,61
<b>11,7</b>	41	5,2	0,76	280,65	209,64
<b>11,8</b>	41	5,2	0,76	280,65	209,64
<b>11,9</b>	42	5,2	0,76	287,49	214,76
<b>12</b>	42	5,2	0,76	287,49	214,76
<b>12,1</b>	42	5,2	0,76	287,49	214,76
<b>12,2</b>	43	5,2	0,76	294,34	219,87
<b>12,3</b>	43	5,2	0,76	294,34	219,87
<b>12,4</b>	44	5,2	0,76	301,18	224,98
<b>12,5</b>	44	5,2	0,76	301,18	224,98
<b>12,6</b>	44	5,2	0,76	301,18	224,98
<b>12,7</b>	45	5,3	0,76	313,95	234,52
<b>12,8</b>	45	5,3	0,76	313,95	234,52
<b>12,9</b>	45	5,3	0,76	313,95	234,52
<b>13</b>	46	5,3	0,76	320,93	239,73
<b>13,1</b>	46	5,3	0,76	320,93	239,73
<b>13,2</b>	46	5,3	0,76	320,93	239,73

<b>13,3</b>	47	5,3	0,76	327,90	244,94
<b>13,4</b>	47	5,3	0,76	327,90	244,94
<b>13,5</b>	47	5,3	0,76	327,90	244,94
<b>13,6</b>	48	5,3	0,75	330,48	246,87
<b>13,7</b>	48	5,4	0,75	336,71	251,52
<b>13,8</b>	48	5,4	0,75	336,71	251,52
<b>13,9</b>	49	5,4	0,75	343,73	256,76
<b>14</b>	49	5,4	0,75	343,73	256,76
<b>14,1</b>	49	5,4	0,75	343,73	256,76
<b>14,2</b>	50	5,4	0,75	350,74	262,00
<b>14,3</b>	50	5,4	0,75	350,74	262,00
<b>14,4</b>	51	5,4	0,75	357,76	267,24
<b>14,5</b>	51	5,4	0,75	357,76	267,24
<b>14,6</b>	51	5,4	0,75	357,76	267,24
<b>14,7</b>	52	5,4	0,75	364,77	272,48
<b>14,8</b>	52	5,4	0,75	364,77	272,48
<b>14,9</b>	52	5,4	0,75	364,77	272,48
<b>15</b>	53	5,4	0,75	371,78	277,72
<b>15,1</b>	53	5,4	0,75	371,78	277,72
<b>15,2</b>	53	5,4	0,75	371,78	277,72
<b>15,3</b>	54	5,4	0,74	373,75	279,19
<b>15,4</b>	54	5,4	0,74	373,75	279,19
<b>15,5</b>	54	5,4	0,74	373,75	279,19
<b>15,6</b>	55	5,4	0,74	380,67	284,36
<b>15,7</b>	55	5,4	0,74	380,67	284,36
<b>15,8</b>	56	5,5	0,74	394,77	294,89
<b>15,9</b>	56	5,5	0,74	394,77	294,89
<b>16</b>	56	5,5	0,74	394,77	294,89
<b>16,1</b>	57	5,5	0,74	401,82	300,16
<b>16,2</b>	57	5,5	0,74	401,82	300,16
<b>16,3</b>	57	5,5	0,74	401,82	300,16
<b>16,4</b>	58	5,5	0,74	408,87	305,42
<b>16,5</b>	58	5,5	0,74	408,87	305,42
<b>16,6</b>	58	5,5	0,74	408,87	305,42
<b>16,7</b>	59	5,5	0,74	415,92	310,69
<b>16,8</b>	59	5,5	0,74	415,92	310,69
<b>16,9</b>	59	5,5	0,74	415,92	310,69
<b>17</b>	60	5,5	0,74	422,97	315,96
<b>17,1</b>	60	5,5	0,74	422,97	315,96
<b>17,2</b>	60	5,5	0,74	422,97	315,96
<b>17,3</b>	61	5,5	0,74	430,02	321,22
<b>17,4</b>	61	5,5	0,74	430,02	321,22
<b>17,5</b>	62	5,5	0,74	437,07	326,49
<b>17,6</b>	62	5,5	0,74	437,07	326,49
<b>17,7</b>	62	5,5	0,74	437,07	326,49
<b>17,8</b>	63	5,5	0,74	444,12	331,75

<b>17,9</b>	63	5,5	0,74	444,12	331,75
<b>18</b>	63	5,5	0,74	444,12	331,75
<b>18,1</b>	64	5,5	0,74	451,16	337,02
<b>18,2</b>	64	5,6	0,73	453,16	338,51
<b>18,3</b>	64	5,6	0,73	453,16	338,51
<b>18,4</b>	65	5,6	0,73	460,24	343,80
<b>18,5</b>	65	5,6	0,73	460,24	343,80
<b>18,6</b>	65	5,6	0,73	460,24	343,80
<b>18,7</b>	66	5,6	0,73	467,32	349,09
<b>18,8</b>	66	5,6	0,73	467,32	349,09
<b>18,9</b>	66	5,6	0,73	467,32	349,09
<b>19</b>	67	5,6	0,73	474,40	354,38
<b>19,1</b>	67	5,6	0,73	474,40	354,38
<b>19,2</b>	68	5,6	0,73	481,48	359,67
<b>19,3</b>	68	5,6	0,73	481,48	359,67
<b>19,4</b>	68	5,6	0,73	481,48	359,67
<b>19,5</b>	69	5,6	0,73	488,56	364,96
<b>19,6</b>	69	5,6	0,73	488,56	364,96
<b>19,7</b>	69	5,6	0,73	488,56	364,96
<b>19,8</b>	70	5,6	0,73	495,64	370,25
<b>19,9</b>	70	5,6	0,73	495,64	370,25
<b>20</b>	70	5,6	0,73	495,64	370,25
<b>20,1</b>	71	5,6	0,72	495,84	370,39
<b>20,2</b>	71	5,6	0,72	495,84	370,39
<b>20,3</b>	71	5,6	0,72	495,84	370,39
<b>20,4</b>	72	5,6	0,72	502,82	375,61
<b>20,5</b>	72	5,6	0,72	502,82	375,61
<b>20,6</b>	72	5,6	0,72	502,82	375,61
<b>20,7</b>	73	5,6	0,72	509,80	380,82
<b>20,8</b>	73	5,6	0,72	509,80	380,82
<b>20,9</b>	74	5,7	0,71	518,71	387,48
<b>21</b>	74	5,7	0,71	518,71	387,48
<b>21,1</b>	74	5,7	0,71	518,71	387,48
<b>21,2</b>	75	5,7	0,71	525,72	392,71
<b>21,3</b>	75	5,7	0,71	525,72	392,71
<b>21,4</b>	75	5,7	0,71	525,72	392,71
<b>21,5</b>	76	5,7	0,71	532,73	397,95
<b>21,6</b>	76	5,7	0,71	532,73	397,95
<b>21,7</b>	76	5,7	0,71	532,73	397,95
<b>21,8</b>	77	5,7	0,71	539,74	403,19
<b>21,9</b>	77	5,7	0,71	539,74	403,19
<b>22</b>	77	5,7	0,71	539,74	403,19
<b>22,1</b>	78	5,7	0,71	546,75	408,42
<b>22,2</b>	78	5,7	0,71	546,75	408,42
<b>22,3</b>	79	5,7	0,71	553,76	413,66
<b>22,4</b>	79	5,7	0,71	553,76	413,66

<b>22,5</b>	79	5,7	0,71	553,76	413,66
<b>22,6</b>	80	5,7	0,71	560,77	418,89
<b>22,7</b>	80	5,7	0,71	560,77	418,89
<b>22,8</b>	80	5,7	0,71	560,77	418,89
<b>22,9</b>	81	5,7	0,71	567,78	424,13
<b>23</b>	81	5,7	0,71	567,78	424,13
<b>23,1</b>	81	5,7	0,71	567,78	424,13
<b>23,2</b>	82	5,7	0,71	574,79	429,37
<b>23,3</b>	82	5,7	0,71	574,79	429,37
<b>23,4</b>	82	5,7	0,71	574,79	429,37
<b>23,5</b>	83	5,7	0,71	581,80	434,60
<b>23,6</b>	83	5,7	0,71	581,80	434,60
<b>23,7</b>	83	5,7	0,71	581,80	434,60
<b>23,8</b>	84	5,7	0,705	584,66	436,74
<b>23,9</b>	84	5,7	0,705	584,66	436,74
<b>24</b>	85	5,7	0,7	587,43	438,81
<b>24,1</b>	85	5,7	0,7	587,43	438,81
<b>24,2</b>	85	5,7	0,7	587,43	438,81
<b>24,3</b>	86	5,7	0,7	594,34	443,97
<b>24,4</b>	86	5,7	0,7	594,34	443,97
<b>24,5</b>	86	5,7	0,7	594,34	443,97
<b>24,6</b>	87	5,7	0,7	601,25	449,13
<b>24,7</b>	87	5,7	0,7	601,25	449,13
<b>24,8</b>	87	5,7	0,7	601,25	449,13
<b>24,9</b>	88	5,7	0,7	608,16	454,29
<b>25</b>	88	5,7	0,7	608,16	454,29
<b>25,1</b>	88	5,7	0,7	608,16	454,29
<b>25,2</b>	89	5,7	0,7	615,07	459,46
<b>25,3</b>	89	5,7	0,7	615,07	459,46
<b>25,4</b>	89	5,7	0,7	615,07	459,46
<b>25,5</b>	90	5,7	0,7	621,98	464,62
<b>25,6</b>	90	5,7	0,7	621,98	464,62
<b>25,7</b>	90	5,7	0,7	621,98	464,62
<b>25,8</b>	91	5,8	0,69	630,78	471,19
<b>25,9</b>	91	5,8	0,69	630,78	471,19
<b>26</b>	92	5,8	0,69	637,71	476,37
<b>26,1</b>	92	5,8	0,69	637,71	476,37
<b>26,2</b>	92	5,8	0,69	637,71	476,37
<b>26,3</b>	93	5,8	0,69	644,65	481,55
<b>26,4</b>	93	5,8	0,69	644,65	481,55
<b>26,5</b>	93	5,8	0,69	644,65	481,55
<b>26,6</b>	94	5,8	0,69	651,58	486,73
<b>26,7</b>	94	5,8	0,69	651,58	486,73
<b>26,8</b>	94	5,8	0,69	651,58	486,73
<b>26,9</b>	95	5,8	0,69	658,51	491,91
<b>27</b>	95	5,8	0,69	658,51	491,91

<b>27,1</b>	95	5,8	0,69	658,51	491,91
<b>27,2</b>	96	5,8	0,69	665,44	497,08
<b>27,3</b>	96	5,8	0,69	665,44	497,08
<b>27,4</b>	97	5,8	0,69	672,37	502,26
<b>27,5</b>	97	5,8	0,69	672,37	502,26
<b>27,6</b>	97	5,8	0,69	672,37	502,26
<b>27,7</b>	98	5,8	0,69	679,30	507,44
<b>27,8</b>	98	5,8	0,69	679,30	507,44
<b>27,9</b>	98	5,8	0,69	679,30	507,44
<b>28</b>	99	5,8	0,69	686,24	512,62
<b>28,1</b>	99	5,8	0,69	686,24	512,62
<b>28,2</b>	99	5,8	0,69	686,24	512,62
<b>28,3</b>	100	5,8	0,69	693,17	517,80
<b>28,4</b>	100	5,8	0,69	693,17	517,80
<b>28,5</b>	100	5,8	0,69	693,17	517,80
<b>28,6</b>	101	5,8	0,69	700,10	522,97
<b>28,7</b>	101	5,8	0,69	700,10	522,97
<b>28,8</b>	101	5,8	0,69	700,10	522,97
<b>28,9</b>	102	5,8	0,69	707,03	528,15
<b>29</b>	102	5,8	0,69	707,03	528,15
<b>29,1</b>	103	5,8	0,69	713,96	533,33
<b>29,2</b>	103	5,8	0,69	713,96	533,33
<b>29,3</b>	103	5,8	0,69	713,96	533,33
<b>29,4</b>	104	5,8	0,69	720,89	538,51
<b>29,5</b>	104	5,8	0,69	720,89	538,51
<b>29,6</b>	104	5,8	0,69	720,89	538,51
<b>29,7</b>	105	5,8	0,685	722,55	539,75
<b>29,8</b>	105	5,8	0,685	722,55	539,75
<b>29,9</b>	105	5,8	0,685	722,55	539,75
<b>30</b>	106	5,8	0,68	724,11	540,91
<b>30,1</b>	106	5,8	0,68	724,11	540,91
<b>30,2</b>	106	5,8	0,68	724,11	540,91
<b>30,3</b>	107	5,8	0,68	730,94	546,01
<b>30,4</b>	107	5,8	0,68	730,94	546,01
<b>30,5</b>	108	5,8	0,675	732,35	547,06
<b>30,6</b>	108	5,8	0,675	732,35	547,06
<b>30,7</b>	108	5,8	0,675	732,35	547,06
<b>30,8</b>	109	5,8	0,67	733,65	548,04
<b>30,9</b>	109	5,8	0,67	733,65	548,04
<b>31</b>	109	5,8	0,67	733,65	548,04
<b>31,1</b>	110	5,8	0,67	740,38	553,07
<b>31,2</b>	110	5,8	0,67	740,38	553,07
<b>31,3</b>	110	5,8	0,67	740,38	553,07
<b>31,4</b>	111	5,8	0,67	747,11	558,09
<b>31,5</b>	111	5,8	0,67	747,11	558,09
<b>31,6</b>	111	5,8	0,67	747,11	558,09

<b>31,7</b>	112	5,8	0,666	749,34	559,76
<b>31,8</b>	112	5,8	0,666	749,34	559,76
<b>31,9</b>	112	5,8	0,666	749,34	559,76
<b>32</b>	113	5,8	0,665	754,90	563,91
<b>32,1</b>	113	5,8	0,665	754,90	563,91
<b>32,2</b>	113	5,8	0,665	754,90	563,91
<b>32,3</b>	114	5,8	0,66	755,85	564,62
<b>32,4</b>	114	5,8	0,66	755,85	564,62
<b>32,5</b>	115	5,8	0,66	762,48	569,58
<b>32,6</b>	115	5,8	0,66	762,48	569,58
<b>32,7</b>	115	5,8	0,66	762,48	569,58
<b>32,8</b>	116	5,8	0,66	769,11	574,53
<b>32,9</b>	116	5,8	0,66	769,11	574,53
<b>33</b>	116	5,8	0,66	769,11	574,53
<b>33,1</b>	117	5,8	0,66	775,74	579,48
<b>33,2</b>	117	5,8	0,66	775,74	579,48
<b>33,3</b>	117	5,8	0,66	775,74	579,48
<b>33,4</b>	118	5,8	0,66	782,37	584,43
<b>33,5</b>	118	5,8	0,66	782,37	584,43
<b>33,6</b>	118	5,8	0,66	782,37	584,43
<b>33,7</b>	119	5,8	0,66	789,00	589,39
<b>33,8</b>	119	5,8	0,66	789,00	589,39
<b>33,9</b>	120	5,8	0,66	795,63	594,34
<b>34</b>	120	5,8	0,66	795,63	594,34
<b>34,1</b>	120	5,8	0,66	795,63	594,34
<b>34,2</b>	121	5,8	0,66	802,27	599,29
<b>34,3</b>	121	5,8	0,66	802,27	599,29
<b>34,4</b>	121	5,8	0,66	802,27	599,29
<b>34,5</b>	122	5,8	0,66	808,90	604,24
<b>34,6</b>	122	5,8	0,66	808,90	604,24
<b>34,7</b>	122	5,8	0,66	808,90	604,24
<b>34,8</b>	123	5,8	0,66	815,53	609,20
<b>34,9</b>	123	5,8	0,66	815,53	609,20
<b>35</b>	124	5,8	0,66	822,16	614,15
<b>35,1</b>	124	5,8	0,66	822,16	614,15
<b>35,2</b>	124	5,8	0,66	822,16	614,15
<b>35,3</b>	125	5,8	0,66	828,79	619,10
<b>35,4</b>	125	5,8	0,66	828,79	619,10
<b>35,5</b>	125	5,9	0,66	843,08	629,78
<b>35,6</b>	126	5,9	0,66	849,82	634,82
<b>35,7</b>	126	5,9	0,66	849,82	634,82
<b>35,8</b>	126	5,9	0,66	849,82	634,82
<b>35,9</b>	127	5,9	0,66	856,56	639,85
<b>36</b>	127	5,9	0,66	856,56	639,85
<b>36,1</b>	127	5,9	0,66	856,56	639,85
<b>36,2</b>	128	5,9	0,66	863,31	644,89

<b>36,3</b>	128	5,9	0,66	863,31	644,89
<b>36,4</b>	128	5,9	0,66	863,31	644,89
<b>36,5</b>	129	5,9	0,66	870,05	649,93
<b>36,6</b>	129	5,9	0,66	870,05	649,93
<b>36,7</b>	130	5,9	0,655	870,16	650,01
<b>36,8</b>	130	5,9	0,655	870,16	650,01
<b>36,9</b>	130	5,9	0,655	870,16	650,01
<b>37</b>	131	5,9	0,65	870,16	650,01
<b>37,1</b>	131	5,9	0,65	870,16	650,01
<b>37,2</b>	131	5,9	0,65	870,16	650,01
<b>37,3</b>	132	5,9	0,65	876,80	654,97
<b>37,4</b>	132	5,9	0,65	876,80	654,97
<b>37,5</b>	132	5,9	0,65	876,80	654,97
<b>37,6</b>	133	5,9	0,65	883,44	659,93
<b>37,7</b>	133	5,9	0,65	883,44	659,93
<b>37,8</b>	134	5,9	0,65	890,08	664,89
<b>37,9</b>	134	5,9	0,65	890,08	664,89
<b>38</b>	134	5,9	0,65	890,08	664,89
<b>38,1</b>	135	5,9	0,65	896,73	669,85
<b>38,2</b>	135	5,9	0,65	896,73	669,85
<b>38,3</b>	135	5,9	0,65	896,73	669,85
<b>38,4</b>	136	5,9	0,65	903,37	674,82
<b>38,5</b>	136	5,9	0,65	903,37	674,82
<b>38,6</b>	136	5,9	0,65	903,37	674,82
<b>38,7</b>	137	5,9	0,65	910,01	679,78
<b>38,8</b>	137	5,9	0,65	910,01	679,78
<b>38,9</b>	137	5,9	0,65	910,01	679,78
<b>39</b>	138	5,9	0,65	916,65	684,74
<b>39,1</b>	138	5,9	0,65	916,65	684,74
<b>39,2</b>	138	5,9	0,65	916,65	684,74
<b>39,3</b>	139	5,9	0,65	923,30	689,70
<b>39,4</b>	139	5,9	0,65	923,30	689,70
<b>39,5</b>	139	5,9	0,65	923,30	689,70
<b>39,6</b>	140	5,9	0,65	929,94	694,66
<b>39,7</b>	140	5,9	0,65	929,94	694,66
<b>39,8</b>	140	5,9	0,65	929,94	694,66
<b>39,9</b>	141	5,9	0,646	930,82	695,32
<b>40</b>	141	5,9	0,646	930,82	695,32
<b>40,1</b>	142	5,9	0,642	931,61	695,92
<b>40,2</b>	142	5,9	0,642	931,61	695,92
<b>40,3</b>	142	5,9	0,642	931,61	695,92
<b>40,4</b>	143	5,9	0,64	935,25	698,63
<b>40,5</b>	143	5,9	0,64	935,25	698,63
<b>40,6</b>	143	5,9	0,64	935,25	698,63
<b>40,7</b>	144	5,9	0,64	941,79	703,52
<b>40,8</b>	144	5,9	0,64	941,79	703,52

<b>40,9</b>	144	5,9	0,64	941,79	703,52
<b>41</b>	145	5,9	0,64	948,33	708,40
<b>41,1</b>	145	5,9	0,64	948,33	708,40
<b>41,2</b>	145	5,9	0,64	948,33	708,40
<b>41,3</b>	146	5,9	0,64	954,87	713,29
<b>41,4</b>	146	5,9	0,64	954,87	713,29
<b>41,5</b>	146	5,9	0,64	954,87	713,29
<b>41,6</b>	147	5,9	0,64	961,41	718,18
<b>41,7</b>	147	5,9	0,64	961,41	718,18
<b>41,8</b>	147	5,9	0,64	961,41	718,18
<b>41,9</b>	148	5,9	0,64	967,95	723,06
<b>42</b>	148	5,9	0,64	967,95	723,06
<b>42,1</b>	148	5,9	0,64	967,95	723,06
<b>42,2</b>	149	5,9	0,64	974,49	727,95
<b>42,3</b>	149	5,9	0,64	974,49	727,95
<b>42,4</b>	149	5,9	0,64	974,49	727,95
<b>42,5</b>	150	5,9	0,64	981,03	732,83
<b>42,6</b>	150	5,9	0,64	981,03	732,83
<b>42,7</b>	151	5,9	0,64	987,57	737,72
<b>42,8</b>	151	5,9	0,64	987,57	737,72
<b>42,9</b>	151	5,9	0,64	987,57	737,72
<b>43</b>	152	5,9	0,64	994,11	742,60
<b>43,1</b>	152	5,9	0,64	994,11	742,60
<b>43,2</b>	152	5,9	0,64	994,11	742,60
<b>43,3</b>	153	5,9	0,64	1000,65	747,49
<b>43,4</b>	153	5,9	0,64	1000,65	747,49
<b>43,5</b>	153	5,9	0,64	1000,65	747,49
<b>43,6</b>	154	5,9	0,64	1007,19	752,37
<b>43,7</b>	154	5,9	0,64	1007,19	752,37
<b>43,8</b>	154	5,9	0,64	1007,19	752,37
<b>43,9</b>	155	5,9	0,64	1013,73	757,26
<b>44</b>	155	5,9	0,64	1013,73	757,26
<b>44,1</b>	156	5,9	0,636	1013,90	757,38
<b>44,2</b>	156	5,9	0,636	1013,90	757,38
<b>44,3</b>	156	5,9	0,636	1013,90	757,38
<b>44,4</b>	157	5,9	0,634	1017,19	759,84
<b>44,5</b>	157	5,9	0,634	1017,19	759,84
<b>44,6</b>	157	5,9	0,634	1017,19	759,84
<b>44,7</b>	158	5,9	0,63	1017,21	759,86
<b>44,8</b>	158	5,9	0,63	1017,21	759,86
<b>44,9</b>	158	5,9	0,63	1017,21	759,86
<b>45</b>	159	5,9	0,63	1023,65	764,66
<b>45,1</b>	159	5,9	0,63	1023,65	764,66
<b>45,2</b>	159	5,9	0,63	1023,65	764,66
<b>45,3</b>	160	5,9	0,63	1030,09	769,47
<b>45,4</b>	160	5,9	0,63	1030,09	769,47

<b>45,5</b>	161	5,9	0,63	1036,52	774,28
<b>45,6</b>	161	5,9	0,63	1036,52	774,28
<b>45,7</b>	161	5,9	0,63	1036,52	774,28
<b>45,8</b>	162	5,9	0,63	1042,96	779,09
<b>45,9</b>	162	5,9	0,63	1042,96	779,09
<b>46</b>	162	5,9	0,63	1042,96	779,09
<b>46,1</b>	163	5,9	0,63	1049,40	783,90
<b>46,2</b>	163	5,9	0,63	1049,40	783,90
<b>46,3</b>	163	5,9	0,63	1049,40	783,90
<b>46,4</b>	164	5,9	0,63	1055,84	788,71
<b>46,5</b>	164	5,9	0,63	1055,84	788,71
<b>46,6</b>	164	5,9	0,63	1055,84	788,71
<b>46,7</b>	165	5,9	0,63	1062,28	793,52
<b>46,8</b>	165	5,9	0,63	1062,28	793,52
<b>46,9</b>	165	5,9	0,63	1062,28	793,52
<b>47</b>	166	5,9	0,63	1068,71	798,33
<b>47,1</b>	166	5,9	0,63	1068,71	798,33
<b>47,2</b>	166	5,9	0,63	1068,71	798,33
<b>47,3</b>	167	5,9	0,63	1075,15	803,14
<b>47,4</b>	167	5,9	0,63	1075,15	803,14
<b>47,5</b>	167	5,9	0,63	1075,15	803,14
<b>47,6</b>	168	5,9	0,63	1081,59	807,95
<b>47,7</b>	168	5,9	0,63	1081,59	807,95
<b>47,8</b>	169	5,9	0,63	1088,03	812,76
<b>47,9</b>	169	5,9	0,63	1088,03	812,76
<b>48</b>	169	5,9	0,63	1088,03	812,76
<b>48,1</b>	170	5,9	0,63	1094,47	817,57
<b>48,2</b>	170	5,9	0,63	1094,47	817,57
<b>48,3</b>	170	5,9	0,63	1094,47	817,57
<b>48,4</b>	171	5,9	0,63	1100,90	822,38
<b>48,5</b>	171	5,9	0,63	1100,90	822,38
<b>48,6</b>	171	5,9	0,63	1100,90	822,38
<b>48,7</b>	172	5,9	0,63	1107,34	827,18
<b>48,8</b>	172	5,9	0,63	1107,34	827,18
<b>48,9</b>	172	5,9	0,63	1107,34	827,18
<b>49</b>	173	5,9	0,63	1113,78	831,99
<b>49,1</b>	173	5,9	0,63	1113,78	831,99
<b>49,2</b>	173	5,9	0,63	1113,78	831,99
<b>49,3</b>	174	5,9	0,63	1120,22	836,80
<b>49,4</b>	174	5,9	0,63	1120,22	836,80
<b>49,5</b>	174	5,9	0,63	1120,22	836,80
<b>49,6</b>	175	5,9	0,63	1126,66	841,61
<b>49,7</b>	175	5,9	0,63	1126,66	841,61
<b>49,8</b>	176	5,9	0,63	1133,09	846,42
<b>49,9</b>	176	5,9	0,63	1133,09	846,42
<b>50</b>	176	5,9	0,63	1133,09	846,42

<b>50,1</b>	177	5,9	0,63	1139,53	851,23
<b>50,2</b>	177	5,9	0,63	1139,53	851,23
<b>50,3</b>	177	5,9	0,63	1139,53	851,23
<b>50,4</b>	178	5,9	0,63	1145,97	856,04
<b>50,5</b>	178	5,9	0,63	1145,97	856,04
<b>50,6</b>	178	5,9	0,63	1145,97	856,04
<b>50,7</b>	179	5,9	0,63	1152,41	860,85
<b>50,8</b>	179	5,9	0,63	1152,41	860,85
<b>50,9</b>	179	5,9	0,63	1152,41	860,85
<b>51</b>	180	5,9	0,63	1158,85	865,66
<b>51,1</b>	180	5,9	0,63	1158,85	865,66
<b>51,2</b>	180	5,9	0,63	1158,85	865,66
<b>51,3</b>	181	5,9	0,63	1165,28	870,47
<b>51,4</b>	181	5,9	0,63	1165,28	870,47
<b>51,5</b>	181	5,9	0,63	1165,28	870,47
<b>51,6</b>	182	5,9	0,63	1171,72	875,28
<b>51,7</b>	182	5,9	0,63	1171,72	875,28
<b>51,8</b>	183	5,9	0,63	1178,16	880,09
<b>51,9</b>	183	5,9	0,63	1178,16	880,09
<b>52</b>	183	5,9	0,63	1178,16	880,09
<b>52,1</b>	184	5,9	0,63	1184,60	884,89
<b>52,2</b>	184	5,9	0,63	1184,60	884,89
<b>52,3</b>	184	5,9	0,63	1184,60	884,89
<b>52,4</b>	185	5,9	0,63	1191,04	889,70
<b>52,5</b>	185	5,9	0,63	1191,04	889,70
<b>52,6</b>	185	5,9	0,63	1191,04	889,70
<b>52,7</b>	186	5,9	0,63	1197,47	894,51
<b>52,8</b>	186	5,9	0,63	1197,47	894,51
<b>52,9</b>	186	5,9	0,63	1197,47	894,51
<b>53</b>	187	5,9	0,63	1203,91	899,32
<b>53,1</b>	187	5,9	0,63	1203,91	899,32
<b>53,2</b>	188	5,9	0,63	1210,35	904,13
<b>53,3</b>	188	5,9	0,63	1210,35	904,13
<b>53,4</b>	188	5,9	0,63	1210,35	904,13
<b>53,5</b>	189	5,9	0,63	1216,79	908,94
<b>53,6</b>	189	5,9	0,63	1216,79	908,94
<b>53,7</b>	189	5,9	0,63	1216,79	908,94
<b>53,8</b>	190	5,9	0,63	1223,23	913,75
<b>53,9</b>	190	5,9	0,63	1223,23	913,75
<b>54</b>	190	5,9	0,63	1223,23	913,75
<b>54,1</b>	191	5,9	0,63	1229,66	918,56
<b>54,2</b>	191	5,9	0,63	1229,66	918,56
<b>54,3</b>	191	5,9	0,63	1229,66	918,56
<b>54,4</b>	192	5,9	0,63	1236,10	923,37
<b>54,5</b>	192	5,9	0,63	1236,10	923,37
<b>54,6</b>	192	5,9	0,63	1236,10	923,37

<b>54,7</b>	193	5,9	0,63	1242,54	928,18
<b>54,8</b>	193	5,9	0,63	1242,54	928,18
<b>54,9</b>	194	5,9	0,63	1248,98	932,99
<b>55</b>	194	5,9	0,63	1248,98	932,99
<b>55,1</b>	194	5,9	0,63	1248,98	932,99
<b>55,2</b>	195	5,9	0,63	1255,42	937,80
<b>55,3</b>	195	5,9	0,63	1255,42	937,80
<b>55,4</b>	195	5,9	0,63	1255,42	937,80
<b>55,5</b>	196	5,9	0,63	1261,85	942,61
<b>55,6</b>	196	5,9	0,63	1261,85	942,61
<b>55,7</b>	196	5,9	0,63	1261,85	942,61
<b>55,8</b>	197	5,9	0,63	1268,29	947,41
<b>55,9</b>	197	5,9	0,63	1268,29	947,41
<b>56</b>	198	5,9	0,63	1274,73	952,22
<b>56,1</b>	198	5,9	0,63	1274,73	952,22
<b>56,2</b>	198	5,9	0,63	1274,73	952,22
<b>56,3</b>	199	5,9	0,63	1281,17	957,03
<b>56,4</b>	199	5,9	0,63	1281,17	957,03
<b>56,5</b>	199	5,9	0,63	1281,17	957,03
<b>56,6</b>	200	5,9	0,63	1287,61	961,84
<b>56,7</b>	200	5,9	0,63	1287,61	961,84
<b>56,8</b>	200	5,9	0,63	1287,61	961,84
<b>56,9</b>	201	5,9	0,63	1294,04	966,65
<b>57</b>	201	5,9	0,63	1294,04	966,65
<b>57,1</b>	201	5,9	0,63	1294,04	966,65
<b>57,2</b>	202	5,9	0,63	1300,48	971,46
<b>57,3</b>	202	5,9	0,63	1300,48	971,46
<b>57,4</b>	202	5,9	0,63	1300,48	971,46
<b>57,5</b>	203	5,9	0,63	1306,92	976,27
<b>57,6</b>	203	5,9	0,63	1306,92	976,27
<b>57,7</b>	203	5,9	0,63	1306,92	976,27
<b>57,8</b>	204	5,9	0,63	1313,36	981,08
<b>57,9</b>	204	5,9	0,63	1313,36	981,08
<b>58</b>	204	5,9	0,63	1313,36	981,08
<b>58,1</b>	205	5,9	0,63	1319,80	985,89
<b>58,2</b>	205	5,9	0,63	1319,80	985,89
<b>58,3</b>	205	5,9	0,63	1319,80	985,89
<b>58,4</b>	206	5,9	0,63	1326,23	990,70
<b>58,5</b>	206	5,9	0,63	1326,23	990,70
<b>58,6</b>	206	5,9	0,63	1326,23	990,70
<b>58,7</b>	207	5,9	0,63	1332,67	995,51
<b>58,8</b>	207	5,9	0,63	1332,67	995,51
<b>58,9</b>	208	5,9	0,63	1339,11	1000,32
<b>59</b>	208	5,9	0,63	1339,11	1000,32
<b>59,1</b>	208	5,9	0,63	1339,11	1000,32
<b>59,2</b>	209	5,9	0,63	1345,55	1005,13

<b>59,3</b>	209	5,9	0,63	1345,55	1005,13
<b>59,4</b>	209	5,9	0,63	1345,55	1005,13
<b>59,5</b>	210	5,9	0,63	1351,99	1009,93
<b>59,6</b>	210	5,9	0,63	1351,99	1009,93
<b>59,7</b>	210	5,9	0,63	1351,99	1009,93
<b>59,8</b>	211	5,9	0,63	1358,42	1014,74
<b>59,9</b>	211	5,9	0,63	1358,42	1014,74
<b>60</b>	212	5,9	0,63	1364,86	1019,55

## Apêndice II

Programação feita para o devido funcionamento do arduino com os comentários.

```
#include <elapsedMillis.h>

#include <rExcel.h>

#include <avr/wdt.h>

rExcel    myExcel;

elapsedMillis timeElapsed;

unsigned int interval = 2000; //intervalo de 2s

float counter = 0; //vai contar quantas inversões o sinal sofreu ao longo de 1s

unsigned int ReedSwitch = 0; //vai ler se o sinal está em 1 ou 0

unsigned int counter2 = 0; //vai sentir se o sinal sofreu inversão de 1 pra 0 ou vice-versa

float circumference = 0.1916; //fator de frequência do anemômetro

float mps = 0; //valor recebido em m/s

float tensaoout = 0; //tensão na saída do arduino variando de 0 a 5V (0 a 255)

float pot = 0;

char value[16];

float MinMps = 0; //Velocidade de partida

float NomMps = 0; //Velocidade nominal

float CorMps = 0; //Velocidade de corte

float A = 0;

float b = 0;

float TenNom = 0; //Máxima tensão proporcional a máxima potência da turbina emulada

void setup() {

pinMode(7, INPUT);

pinMode(3, OUTPUT);

Serial.begin(9600);

myExcel.get("Parametrizacao","A4",value);

MinMps = atof(value);

myExcel.get("Parametrizacao","B4",value);

NomMps = atof(value);

myExcel.get("Parametrizacao","C4",value);
```

```

CorMps = atof(value);
myExcel.get("Parametrizacao","D6",value);
A = atof(value);
myExcel.get("Parametrizacao","E6",value);
b = atof(value)*10; //Vezes 10 para correção da interpolação feita pelo excel
myExcel.get("Parametrizacao","I10",value);
TenNom = atof(value);
wdt_enable(WDTO_8S);
}
void loop() {
ReedSwitch = digitalRead(7); //Leitura do nível lógico do sinal
if (timeElapsed < interval) //Etapa 1: Comparação entre níveis lógicos e contagem de
rotações
{
if (counter2 != ReedSwitch) //Comparação
{
counter = counter + 1; //Contagem
counter2 = ReedSwitch;
}
}
if (timeElapsed >= interval) //Etapa 2: Cálculos finais
{
mps = (circunference*counter)/(4*interval/1000); //O 4 é por causa que o anemômetro possui
2 pares de reed switch
if (mps < MinMps || mps >= CorMps)
{
pot = 0; //Valores menores do que a velocidade de partida ou maiores do que a
velocidade de corte não gerarão energia
}
else
{
if (mps > NomMps)

```

```

{
    pot = A*exp(b*NomMps); //Para valores maiores do que a velocidade nominal e menores
do que a de corte
}
else
{
    pot = A*exp(b*mps); //Para valores maiores do que a velocidade de partida e menores
do que a nominal.
}
}
if (pot > TenNom)
{
    pot = TenNom; //Caso o resultado da equação acima seja maior do que a tensão
proporcional a potência nominal da turbina emulada, o resultado da equação será limitada
por essa tensão
}
    tensaoout = pot*255/5;//multiplicado por 255 por causa do conversor A/D de 8bits para as
saídas do arduino (2^8) e dividido por 5 por conta da máxima tensão que é 5V
    if (tensaoout > 255)
    {
        tensaoout = 255;
    }
    analogWrite(3, tensaoout); //aplicação da tensão na porta analógica 3 do arduino
    myExcel.write("Parametrizacao","A6", mps, 2);
    myExcel.write("Parametrizacao","C6", tensaoout*5/255, 2);
    counter = 0;
    timeElapsed = 0;
    wdt_reset();
}
}

```