

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**MARCOS JOSÉ DOS SANTOS JÚNIOR**

**DESENVOLVIMENTO DE BANCADA DIDÁTICA PARA EMULAÇÃO  
DE UMA TURBINA EÓLICA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**GUARAPUAVA**

**2017**

**MARCOS JOSÉ DOS SANTOS JÚNIOR**

**DESENVOLVIMENTO DE BANCADA DIDÁTICA PARA EMULAÇÃO  
DE UMA TURBINA EÓLICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, em Engenharia Mecânica, da Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Me. Vlademir Aparecido Freire Junior

Co-orientador: Prof. Me. Marcelo Henrique Granza

**GUARAPUAVA**

**2017**



---

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **DESENVOLVIMENTO DE BANCADA DIDÁTICA PARA EMULAÇÃO DE UMA TURBINA EÓLICA**

por

**MARCOS JOSÉ DOS SANTOS JÚNIOR**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 27 de junho de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Me. Vlademir Aparecido Freire Junior  
Prof. Orientador

---

Me. João Luiz Dallamuta Lopes  
Membro titular

---

Me. Ricardo Lucas  
Membro titular

“O segredo do sucesso é a moderação,  
ter um dia sim e ter um dia não.”  
(Matanza – Clube dos Canalhas)

## RESUMO

DOS SANTOS JÚNIOR, Marcos José. **Desenvolvimento de Bancada Didática para Emulação de uma Turbina Eólica.** 2017. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2017.

Este trabalho apresenta um estudo teórico e experimental de um sistema de obtenção de energia elétrica através de uma turbina eólica. O sistema em questão foi modelado através de equações que descrevem o comportamento dinâmico de uma turbina eólica. Através dos modelos foram obtidas curvas que demonstram o real rendimento de uma turbina eólica. Essas equações foram implementadas e o sistema simulado em ambiente Matlab/Simulink® para diferentes velocidades de vento com o objetivo de obter-se uma velocidade angular de referência. Foi ainda construída uma bancada com o objetivo de um motor CC emular o comportamento de uma turbina eólica. Através de ensaios de malha aberta foi obtida a função de transferência  $G(s)$  que descreveu o comportamento dinâmico do sistema. A partir da função de transferência foram identificados os ganhos do controlador PI. Ao final do estudo, a bancada ficará disponível no laboratório da universidade para que outros estudos possam ser desenvolvidos aplicando outras estratégias de controle.

**Palavras-chave:** Turbina Eólica; Motor CC; Controlador PI; Bancada Didática.

## ABSTRACT

DOS SANTOS JÚNIOR, Marcos José. **Development of Didactic Workbench for Emulation of a Wind Turbine.** 2017. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2017.

This paper presents a theoretical and experimental study of a system for obtaining electric energy through a wind turbine. The system in question was modeled by equations describing the dynamic behavior of a wind turbine. Through the models curves were obtained that demonstrate the real performance of a wind turbine. These equations were implemented and the simulated system in *Matlab/Simulink®* environment for different wind speeds in order to obtain a reference angular velocity. A bench was also built with the purpose of a DC motor emulating the behavior of a wind turbine. Through open-loop tests the transfer function  $G(s)$  was obtained, which described the dynamic behavior of the system. From the transfer function were identified the PI controller gains. At the end of the study, the bench will be available in the university's laboratory so that other studies can be developed by applying other control strategies.

**Keywords:** Wind Turbine; DC motor; PI Controller; Didactic Bench.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama da bancada.....	9
Figura 2 - Matriz Elétrica Brasileira (GW).....	14
Figura 3 - Geração Eólica Brasileira (MW médio).....	15
Figura 4 - Evolução da Capacidade Eólica Instalada.....	15
Figura 5 - Potência Eólica Instalada no Brasil (MW).....	16
Figura 6 - Potência Eólica Instalada no mundo (GW).....	17
Figura 7 - Turbina eólica de eixo vertical.....	17
Figura 8 - Forças aerodinâmicas resultantes da pá de uma turbina eólica horizontal.....	18
Figura 9 - Diagrama de velocidades e forças atuantes sobre as pás da turbina.....	19
Figura 10 - Conjunto de um aerogerador.....	20
Figura 11 - Coeficiente de potência em função de $\lambda$ e $\beta$ .....	22
Figura 12 - Equação (7) implementada no Simulink.....	23
Figura 13 - Turbina eólica.....	23
Figura 14 - Partes de um motor CC.....	25
Figura 15 - Circuito elétrico do motor CC.....	26
Figura 16 - Modelo Dinâmico do Motor CC.....	29
Figura 17 - Diagrama de blocos do motor CC.....	31
Figura 18 - Configuração básica do chopper de um quadrante.....	32
Figura 19 - Conversor CC-CC e forma de onda da tensão de saída.....	32
Figura 20 - Conversor Abaixador (Step-Down ou Buck).....	33
Figura 21 - Representação em diagrama de blocos de um controlador PID.....	37
Figura 22 - Curva de reação de sistema de primeira ordem sobre a de ordem superior.....	38
Figura 23 - <i>Arduino</i> Mega 2560.....	39
Figura 24 - Equação (8) implementada no Simulink.....	41
Figura 25 - Saída <i>Arduino</i> (PWM).....	42
Figura 26 - Entrada <i>Arduino</i> (Tacogerador).....	42
Figura 27 - Modelo Completo.....	43
Figura 28 - Bancada didática.....	45
Figura 29 - Motor CC e Tacogerador.....	45
Figura 30 - Placas desenvolvidas e <i>Arduino</i> .....	46
Figura 31 - Placa de divisor resistivo.....	47
Figura 32 - Layout do drive.....	47
Figura 33 - Placa de controle.....	48
Figura 34 - Placa de Acionamento.....	48
Figura 35 - Placa de Acionamento.....	49
Figura 36 - Diagrama de blocos da bancada.....	49
Figura 37 - Curva obtida em malha aberta.....	50

Figura 38 - Esquema geral do acionamento e controle do motor CC.....	51
Figura 39 - Resultado obtido .....	52



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de $\beta$ e $\lambda$ para um $C_p$ máximo.....	24
Tabela 2 - Valores de Velocidade Angular [RPM] para dada Velocidade de Vento [m/s] .....	51

## LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

PI	Proporcional e Integral
PD	Proporcional e Derivativo
PID	Proporcional Integral e Derivativo
CC	Corrente Contínua
<i>PWM</i>	<i>Pulse Width Modulation</i>
$\rho$	Massa específica
$\lambda$	Relação de velocidades de ponta
R	Raio da turbina
$\beta$	Ângulo de passo
$C_p$	Coefficiente de potência
A	Área varrida
$P_t$	Potência dos ventos
$P_m$	Potência mecânica
$V_v$	Velocidade do vento
$\omega$	Velocidade angular

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8</b>
1.1 OBJETIVOS.....	10
1.1.1 Objetivo Geral.....	10
1.1.2 Objetivos Específicos.....	10
1.2 JUSTIFICATIVA.....	11
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>12</b>
2.1 ENERGIA EÓLICA.....	12
2.2 IMPACTOS AMBIENTAIS DA GERAÇÃO EÓLICA.....	13
2.3 PANORAMA NACIONAL DA ENERGIA EÓLICA .....	14
2.4 FATOR DE CAPACIDADE.....	16
2.5 TURBINA EÓLICA .....	17
2.5.1 Modelo Matemático da Turbina.....	20
2.6 MOTOR ELÉTRICO CC.....	24
2.6.1 Modelo matemático do motor CC .....	26
2.6.1.1 Força Eletromotriz.....	26
2.6.1.2 Conjugado mecânico .....	27
2.6.1.3 Equação de velocidade.....	28
2.6.1.4 Modelo dinâmico do motor CC.....	28
2.6.2 Acionamento de motores CC.....	31
2.6.2.1 Modulação PWM.....	32
2.7 CONTROLE PID .....	33
2.7.1 Ação de Controle Proporcional .....	34
2.7.2 Ação de Controle Integral .....	35
2.7.3 Ação de Controle Proporcional + Integral (PI) .....	35
2.7.4 Ação de Controle Proporcional + Derivativa (PD).....	36
2.7.5 Controle Proporcional + Integral + Derivativo (PID).....	36
2.8 MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO E SINTONIA DE SISTEMA .....	37
2.9 ARDUÍNO .....	39
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>40</b>
3.1 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DA TURBINA EM AMBIENTE MATLAB/SIMULINK .....	40
3.2 VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO A PARTIR DE TRABALHOS NA LITERATURA.....	43
3.3 BANCADA DIDÁTICA PARA EMULAÇÃO DE UMA TURBINA EÓLICA.....	44
3.3.1 Motor CC .....	45
3.3.2 Arduino e Drive .....	46
3.3.3 Placa de Controle .....	47
3.3.4 Placa de Acionamento .....	48
3.4 IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA ATRAVÉS DE ENSAIOS MALHA ABERTA ..	49

3.5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	50
<b>4 CONCLUSÕES .....</b>	<b>53</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>54</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Ainda no passado usamos a energia mecânica da cinética dos ventos para mover embarcações e descobrir novas terras, até que descobrimos a capacidade de gerar calor com a energia térmica dos combustíveis fósseis, que com o desenvolvimento da máquina a vapor foi possível mover embarcações ainda maiores através dessa fonte de energia. Mas mesmo com essa evolução, o calor era pouco aproveitado e muita energia desperdiçada, foi então necessário desenvolver motores mais eficientes para melhor aproveitamento dessas fontes energéticas.

Essa necessidade de melhoria da eficiência energética, não é exclusividade do ramo de transporte marítimo, é apenas um exemplo dentre os vários processos em que nós humanos desenvolvemos para evoluirmos como sociedade. Nesse sentido o estudo de fontes energéticas está diretamente relacionado ao desenvolvimento econômico e social dos países.

Além das fontes energéticas citadas, outras fontes causaram grande desenvolvimento tecnológico e social ao longa da história humana. Como o carvão durante a revolução industrial, utilizado para mover as máquinas a vapor das indústrias (Rodrigues, 2004).

Essa dependência de uma fonte esgotável de energia, como o petróleo, mostrou-se um grande problema por ser uma fonte energética não renovável e ainda nociva ao meio ambiente. Com o avanço tecnológico permitiu-se a melhoria da eficiência energética, ou seja, gerar mais com menos. Mas ainda não é o suficiente, são necessárias fontes renováveis e menos nocivas ao ambiente em que vivemos para complementar a matriz energética global (Custódio, 2009).

O estudo de fontes de energias renováveis é necessário para a conscientização ambiental e como consequência um desenvolvimento mais sustentável. Assim será possível gerar tecnologia para melhor aproveitar as fontes inesgotáveis que estão disponíveis para nós. Nesse cenário, a energia eólica aparece como uma alternativa de geração, sendo uma fonte renovável de baixo impacto ambiental, pois apenas utiliza-se da cinética dos ventos para gerar energia elétrica.

Porém os altos custos para construção de aerogeradores é uma das dificuldades no estudo da energia eólica. Assim, uma alternativa mais viável é a montagem de bancadas emuladoras de sistemas eólicos. Que se utilizam de modelos

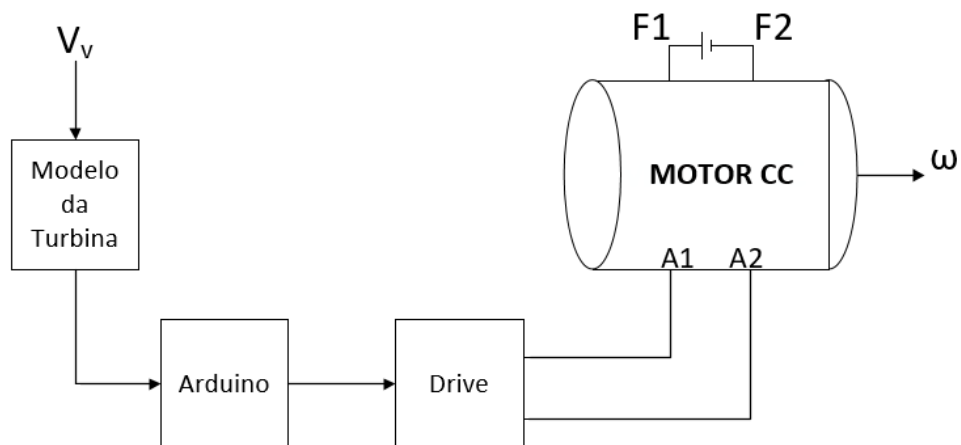
matemáticos de cada aspecto do aerogerador, desde as pás da turbina que fazem o eixo girar até a geração de energia elétrica no gerador, tudo pode ser modelado.

Nesse trabalho serão usadas equações de uma turbina eólica. O modelo será uma função matemática, onde o domínio é a velocidade de vento e o contradomínio a velocidade do eixo da turbina.

A velocidade do vento ( $V_v$ ) será a variável do modelo, pois outros parâmetros como raio da pá e passo de hélice serão constantes dentro da simulação.

Obtendo a velocidade de rotação do eixo da turbina ( $\omega$ ) para determinada intensidade de vento, pode-se emular um motor CC a operar a mesma velocidade da turbina modelada. Como exibido no diagrama da Figura 1.

A Figura 1 ilustra um diagrama da bancada construída, onde F1 e F2 são os conectores para alimentar o campo do motor CC e A1 e A2 são os conectores para a alimentação da armadura.



**Figura 1 - Diagrama da bancada**  
**Fonte: Autoria própria**

Porém, é necessário um controle dessa rotação para que a velocidade angular seja a mesma que uma turbina eólica teria para uma determinada incidência de vento, assim se faz necessário técnicas de controle para que a rotação do emulador da máquina seja a mesma de saída do modelo.

Uma maneira fácil de realizar tal experimento, é a utilização de um motor de corrente contínua, ou motor CC como emulador eólico. O controle de velocidade do motor CC pode ser realizado através do controle de tensão que é aplicado na armadura do mesmo.

Para controlar os níveis de tensão do motor CC foi desenvolvido um sistema eletrônico de acionamento, afim de transformar a tensão alternada da rede em tensão contínua que irá alimentar o motor CC.

Um controlador PI será implementado na plataforma *Simulink* do software *Matlab®*, onde em ambiente de simulação será possível ler a velocidade do motor CC através de um tacogerador. A velocidade lida será comparada com a velocidade de referência do modelo gerando um erro o qual será corrigido por ações de controle que efetuaram o controle de velocidade do motor.

Além de obter resultados experimentais, ao final do trabalho será desenvolvida uma bancada para acomodar o motor CC e as placas de aquisição de sinal e placas de acionamento que ficará no laboratório da Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Guarapuava.

## 1.1 OBJETIVOS

Os principais objetivos do presente trabalho são apresentados a seguir:

### 1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma bancada didática com o intuito de emular o comportamento de uma turbina eólica a partir de seu modelo matemático implementado via *Matlab/Simulink®*. Controlando a velocidade de um motor CC de 10 kW utilizando um controlador PI e um *Arduino* como interface para aquisição de sinais.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos se dividem da seguinte forma:

- Estudo e obtenção de um modelo matemático que descreva o comportamento dinâmico de uma turbina eólica.
- Implementar e validar o modelo obtido a partir de trabalhos que apresentam resultados satisfatórios na literatura via plataforma *Matlab/Simulink®*.

- Estudar e avaliar a estratégia de controle PI que será aplicado no controle de velocidade do motor CC.
- Obter ganhos que permitam que o sistema opere dentro de uma dinâmica aceitável.
- Estabelecer a comunicação entre o *Arduino* e a plataforma *Matlab/Simulink®*.
- Desenvolver placa de aquisição de sinais de velocidade e placa para acionamento e controle do motor CC.
- Montagem da bancada didática.
- Obter resultados experimentais.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A geração eólica está em grande ascensão no cenário nacional, segundo dados da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (2016), de agosto a dezembro de 2015, as usinas eólicas brasileiras aumentaram a capacidade instalada em 23%, com 56 novos parques, totalizando 361 empreendimentos eólicos em todo o país, gerando cerca de 8,9 GW, o que representa 6,15% de toda geração nacional. Podendo ainda atingir 18,8 GW de geração eólica até 2019 a uma taxa de crescimento anual média de 20%, sendo esta taxa de 46% em 2015, valor mais elevado entre as maiores potências eólicas mundiais.

Tal crescimento de geração é necessário para acompanhar a demanda nacional por mais energia. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2014), até 2050 o consumo brasileiro vai triplicar, chegando a 1.624 TW/h.

Portanto é de suma importância desenvolver técnicas para melhorar o aproveitamento e eficiência dessa fonte de energia. Uma maneira barata de se estudar a fonte eólica é o uso de sistemas que emulem a turbina em um modelo fiel ao real. Usando modelos matemáticos que demonstrem a aerodinâmica da turbina.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Existem diversos trabalhos na literatura que evidenciam sistemas emuladores de turbinas eólicas. Alguns deles são descritos a seguir:

Em Granza (2011) é desenvolvido uma bancada que emula uma turbina eólica e implementado um sistema de controle de torque para um motor de indução, como alternativa ao alto custo de máquinas CC.

Em Moreira (2012) é desenvolvido um modelo de sistema aerogerador baseado no controle de torque de motor CC. Foram feitas simulações para diferentes velocidades de vento e o sistema procurava a máxima potência que poderia ser extraída do gerador.

Em Martinello (2013) é feito um estudo referentes ao processo de conversão de energia em sistemas eólicos para geração de energia elétrica. Inicialmente, é feita uma modelagem do sistema eólico, desde a aerodinâmica da turbina ao gerador elétrico, incluindo análise mecânica do gerador. Tal modelagem é realizada com a finalidade de se desenvolver uma ferramenta de simulação para estes sistemas, utilizando o software Matlab/Simulink®. O objetivo desta ferramenta é simular as variáveis elétricas desenvolvidas no estator de um gerador síncrono a imã permanente a partir de diferentes condições de velocidade de vento.

### 2.1 ENERGIA EÓLICA

Devido à necessidade de produção de energia e o estímulo a sustentabilidade ambiental, novas tecnologias relacionadas a energia eólica vêm sendo desenvolvidas e projetos instalados em todo o país, principalmente nas regiões com potencial eólico. Antigamente, esta fonte de energia era bastante utilizada para bombear água ou para moer grãos para obtenção de alimentos derivados. Atualmente, esta fonte de energia ainda serve para estes fins, mas também para gerar eletricidade, sem causar efeitos nocivos para o ambiente.

Para Carapeto (1998), à medida que aumenta o preço das fontes não renováveis, a energia eólica passa a ser mais competitiva, sendo uma tecnologia que está em permanente aperfeiçoamento, com mais de 50.000 novos empregos criados no mundo e uma sólida indústria de componentes e equipamentos, acumulando

crescimento anuais acima de 30% e movimentando cerca de 2 bilhões de dólares em vendas por ano.

A energia dos ventos começou a ser explorada no final do século XIX, quando a demanda de energia elétrica começou a crescer exponencialmente, foi então que surgiram as primeiras turbinas eólicas aplicadas na conversão da energia cinética dos ventos em energia elétrica (Rocha, 2008).

Após a primeira grande crise do petróleo, diversos países se preocuparam em desenvolver tecnologias na utilização da energia eólica como uma fonte alternativa de energia. Em meados da década de 1980, em países como Dinamarca e Alemanha que o aproveitamento da energia eólica como alternativa de geração de energia elétrica atingiu níveis significantes ao sistema elétrico em termos de geração e competitividade.

Devido ao desenvolvimento tecnológico e o incentivo a geração de energia usando fontes alternativas por parte do governo, o setor começou a ser bem visto por empresas do ramo que diante do crescimento da população seria evidente que a demanda por energia elétrica cresceria em escala (Rüncos, 2004).

O desafio seria fazer com que a geração alternativa de energia elétrica pudesse ter custos aproximados a geração de energia elétrica usando fontes finitas e não renováveis. Para tanto, foram necessárias novas técnicas de construção dos aerogeradores usados até então, assim seria possível aumentar a capacidade unitária das turbinas, gerando mais com menos. Somente assim haveria uma redução substancial no custo da geração de energia eólica o que a tornaria viável em termos de custo do quilowatt instalado. (Wenzel, 2007).

## 2.2 IMPACTOS AMBIENTAIS DA GERAÇÃO EÓLICA

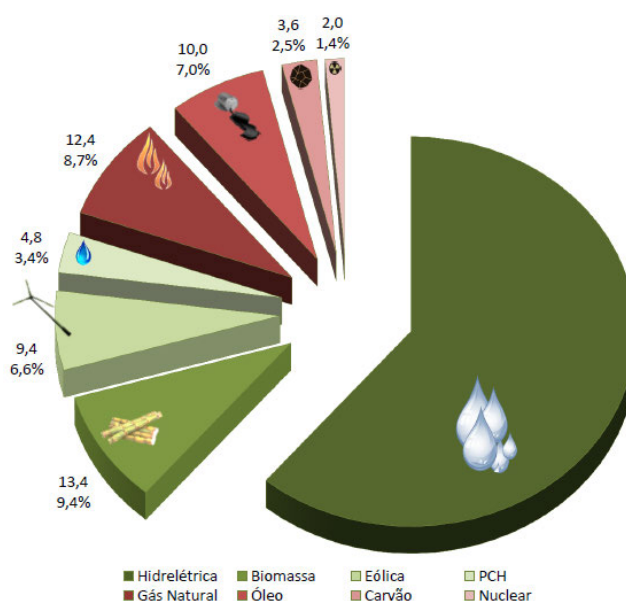
Apesar da energia eólica ser uma fonte de energia infinita e renovável e ser mais ecológica que outras fontes não renováveis, ela não está livre de alguns impactos ambientais. Devido à localização estratégica dos parques eólicos em áreas rurais e de grande incidência de ventos, existe um fluxo pássaros que passam por esses lugares para fazer suas constantes migrações. O impacto se agrava quando os parques eólicos estão perto de locais de repouso das aves migratórias, pois nesses casos as aves voam em grupos compactos e a baixa altitude. (Guimarães, 2008).

De acordo com Batistela (2015), todos os anos parques de geração de energia eólica nos Estados Unidos matam cerca de 7 mil pássaros. Uma solução que está em desenvolvimento e testado no parque eólico Peñascal, localizado no Texas, é um radar capaz de prevenir esse tipo de acidente. O radar detecta a aproximação e altura dos pássaros e analisa se as condições do tempo forem desfavoráveis às aves, as turbinas são desligadas até que os pássaros alcancem uma área segura do céu. Uma solução simples que abaixa ainda mais os impactos dessa fonte de energia ao ambiente.

Por ser uma forma limpa de gerar energia, ao baixo impacto ambiental que seus parques provocam e com custos progressivamente decrescentes existe um forte crescimento na escala industrial de produção e montagem de turbinas, tornando a energia eólica uma fonte energética com uma das maiores taxas de crescimento em capacidade geradora de energia elétrica nos últimos anos, em torno de 28% nos últimos anos.

### 2.3 PANORAMA NACIONAL DA ENERGIA EÓLICA

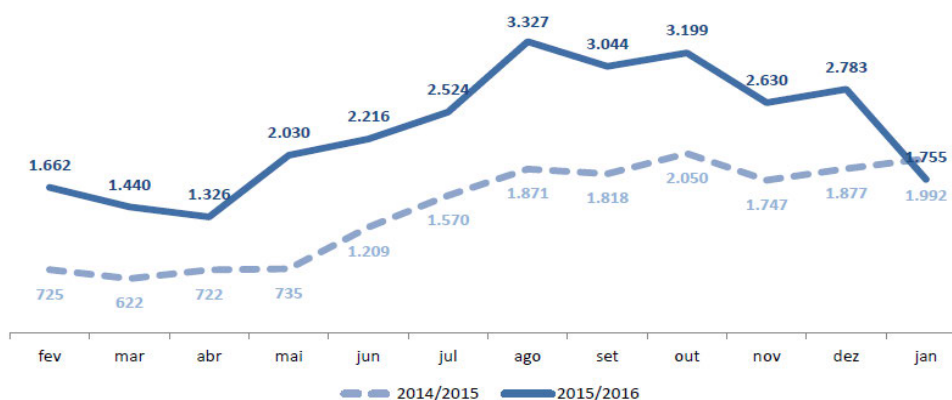
Na Figura 2, são mostrados dados da Associação Brasileira de Energia Eólica (2016), em maio de 2016 a matriz elétrica brasileira possuía uma capacidade eólica instalada de 9,41 GW, o que representa 6,6% dessa fonte na matriz nacional.



**Figura 2 - Matriz Elétrica Brasileira (GW)**  
**Fonte: Associação Brasileira de Energia Eólica (2016)**

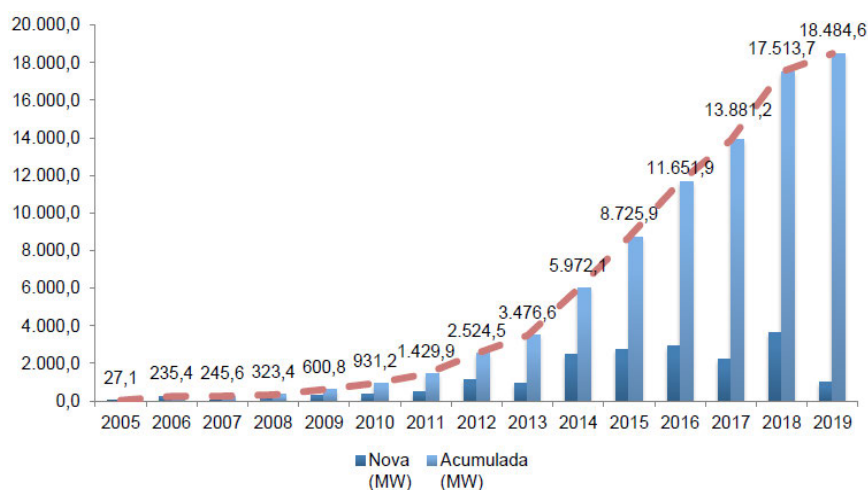
E ainda existe a estimativa de ao final de 2019 o Brasil possuir 18,48 GW instalados em seu território.

Podemos ver o evidente crescimento dessa fonte de energia através da Figura 3, onde é mostrado a geração média brasileira desde fevereiro de 2014, atingindo um pico de 3.327 MW gerados no mês de agosto de 2015, valor esse que representou 52% da capacidade instalada.



**Figura 3 - Geração Eólica Brasileira (MW médio)**  
**Fonte: Associação Brasileira de Energia Eólica (2016)**

Na Figura 4, nota-se o crescimento exponencial da capacidade de geração eólica instalada no país, isso se deve aos recentes investimentos em parques eólicos.



**Figura 4 - Evolução da Capacidade Eólica Instalada**  
**Fonte: Associação Brasileira de Energia Eólica (2016)**

## 2.4 FATOR DE CAPACIDADE

O fator de capacidade de uma usina é a razão entre a produção efetiva da usina em um período de tempo e a capacidade total máxima neste mesmo período.

$$F_c = \frac{E}{P \cdot t} \quad (1)$$

Onde:

$F_c$  é o fator de capacidade;

$E$  é a energia gerada no período considerado;

$P$  é a potência instalada na usina;

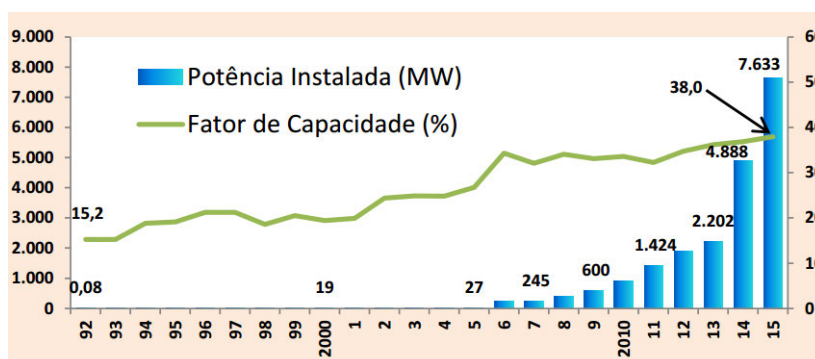
$t$  é o intervalo de tempo considerado em horas.

O fator de capacidade é um importante parâmetro para os estudos de viabilidade econômica de um projeto de uma unidade de geração de energia elétrica e para o planejamento da expansão da geração de longo prazo.

O fator de capacidade é adimensional e pode ser interpretado como sendo o percentual de tempo, no qual a usina operou a plena carga no intervalo de tempo considerado.

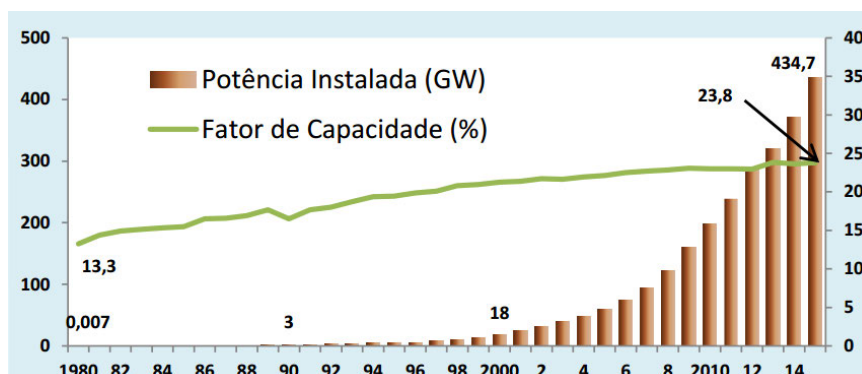
No caso das usinas eólicas, a energia gerada depende do vento e o conceito de fator de capacidade passa a ser estatístico.

A Figura 5, mostra a evolução da potência eólica e do fator de capacidade dessa fonte de energia no Brasil até 2015, atingindo o valor de 38% nos parques eólicos brasileiros.



**Figura 5 - Potência Eólica Instalada no Brasil (MW)**  
 Fonte: Ministério de Minas e Energia (2016)

O fator de capacidade das usinas brasileiras pode-se ser considerado positivo quando comparado com a média global. A Figura 6, mostra o valor médio do fator de capacidade ao redor do mundo até a mesma data é de 23,8%.



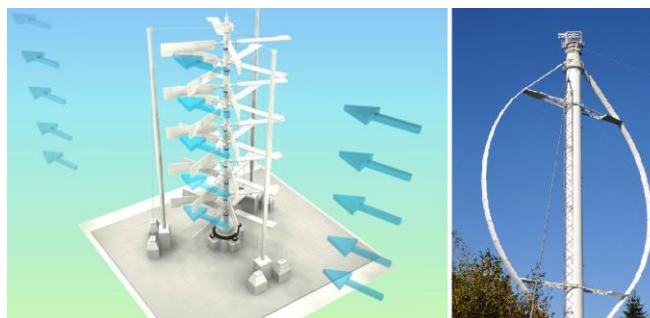
**Figura 6 - Potência Eólica Instalada no mundo (GW)**  
**Fonte: Ministério de Minas e Energia (2016)**

Nota-se também que o fator de capacidade do Brasil aumentou ao longo do tempo, a exemplo do que ocorreu no mundo, como resultado de aumentos sucessivos no porte das instalações, acompanhados de desenvolvimento tecnológico, além da escolha de melhores sítios, fatores que permitem melhor aproveitamento dos ventos (Ministério de Minas e Energia, 2016).

## 2.5 TURBINA EÓLICA

Turbinas eólicas são equipamentos usados na conversão da energia cinética disponível nos ventos em energia elétrica (Rocha, 2008).

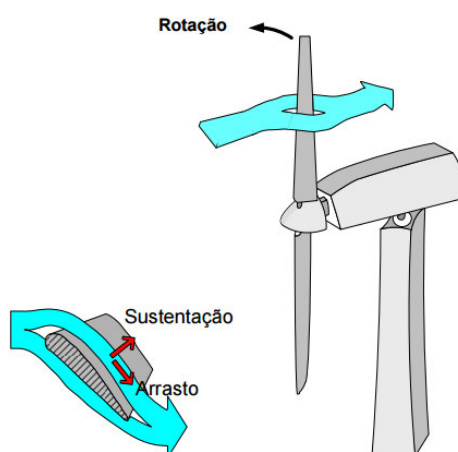
As turbinas são classificadas em função da disposição de seu eixo de rotação e podem ser classificadas de duas formas: Eixo vertical e horizontal (Heier, 1998).



**Figura 7 - Turbina eólica de eixo vertical**  
**Fonte: Wenzel (2007)**

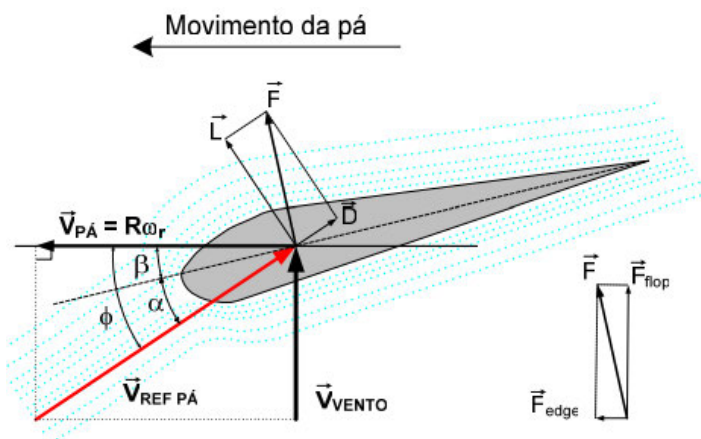
Turbinas de eixo vertical, como a turbina da Figura 7, possuem a vantagem de não necessitem de orientação das pás da turbina conforme direção de incidência do vento, porém sua potência de saída não pode ser controlada em ventos de alta velocidade, o que limita sua eficiência.

Na Figura 8 é exibido o princípio de funcionamento dos aerogeradores é similar ao das asas de aviões, o vento passa com maior velocidade sobre o lado mais comprido da pá, criando uma região de baixa pressão. O diferencial de pressão entre a região de alta e baixa pressão resulta em uma força de sustentação. Fazendo assim que a turbina gire em seu próprio eixo.



**Figura 8 - Forças aerodinâmicas resultantes da pá de uma turbina eólica horizontal**  
**Fonte: Rocha (2008)**

Para determinar a quantidade de energia real convertida de cinética em elétrica por uma turbina eólica, é preciso conhecer as características operacionais do aerogerador. Obtendo assim, dois parâmetros importantes para análise de rendimento de uma turbina, curva de potência, relacionada a potência elétrica de saída do aerogerador e o coeficiente de potência, relacionado a eficiência da conversão da energia cinética dos ventos em energia elétrica, ambos dados em função da velocidade do vento (Heier, 1998).



**Figura 9 - Diagrama de velocidades e forças atuantes sobre as pás da turbina**  
**Fonte: Rocha (2008)**

Podemos observar na Figura 9, algumas variáveis aerodinâmicas da pá relacionada a eficiência de um aerogerador. A rotação da turbina depende da força de sustentação provocada por regiões de baixa e alta pressão, essa força não necessariamente precisa ser o maior valor possível para obter uma maior eficiência do aerogerador, mas sim um valor ideal.

Esse valor de rendimento máximo da turbina é chamado de coeficiente de potência sendo obtido em função do ângulo de passo das pás ( $\beta$ ) e a relação ( $\lambda$ ) entre a velocidade angular das pás ( $\omega$ ) e a velocidade do vento ( $V_v$ ). Todos esses parâmetros serão abordados afundo junto com as equações do modelo matemático de uma turbina eólica apresentado na próxima seção.

Como qualquer outro tipo de turbina, não é possível converter toda a energia cinética dos ventos em energia elétrica. Isso só seria possível se o vento passasse pelas pás e apresenta-se uma velocidade nula de saída, é fato notar que nessa situação não haveria fluxo de vento não sendo possível o movimento das pás. Para ocorrer a rotação das pás é preciso que o vento saia com uma velocidade não nula e consequentemente com energia cinética não aproveitada e não convertida em energia elétrica.

Para obtermos o quanto um aerogerador pode converter de energia eólica em energia elétrica é necessário o uso da lei de Betz, que afirma que o coeficiente de potência ( $C_p$ ) limita a potência total extraída por um aerogerador em 59,3%. Albert Betz concluiu que nenhuma turbina eólica pode converter mais do que 16/27 (59.3%) da energia cinética do vento em energia mecânica no rotor.





**Figura 10 - Conjunto de um aerogerador**  
**Fonte: Autoria própria**

### 2.5.1 Modelo Matemático da Turbina

Um aerogerador é um conjunto de sistemas de transmissões mecânica e elétrica, além de todo o sistema eletrônico embarcado para realizar a variação dos parâmetros citados e obter a máxima extração de potência.

Nota-se através da Figura 10 que até a caixa multiplicadora de velocidade (*gearbox*) temos um sistema totalmente mecânico, esse sistema é modelado através de equações matemáticas que descrevem seu comportamento variando seus parâmetros. Neste trabalho será feito o modelo das pás do rotor em função da velocidade do vento e obtendo o valor de velocidade angular do rotor.

De acordo com Heier (1998), a energia cinética contida nos ventos está em função da densidade do ar ( $\rho = 1,22 \text{ kg/m}^3$ , ao nível do mar) e velocidade ( $V_v$ ) do vento e pode ser obtida através da Equação (1).

$$E_c = \frac{1}{2} \rho V_v^2 \quad (2)$$

Onde:

$E_c$  é a energia cinética contida nos ventos;

$\rho$  é a densidade do ar;

$V_v$  é a velocidade do vento.

A potência total contida nos ventos é dada pela Equação (2), onde além da densidade e velocidade do vento, a potência também é dada em função do raio de circunferência formado pela rotação das pás. E essa circunferência representa a área varrida pelas mesmas, dada pela Equação (3).

$$P_t = \frac{1}{2} \rho A V_v^3 \quad (3)$$

$$A = \pi R^2 \quad (4)$$

Onde:

$P_t$  é a potência total contida nos ventos;

$A$  é a área varrida pelas pás da turbina;

$R$  é o raio das pás da turbina.

Aplicando a lei de Beltz a equação de potência mecânica de um aerogerador temos a Equação (4).

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A C_p (\lambda, \beta) V_v^3 \quad (5)$$

Onde:

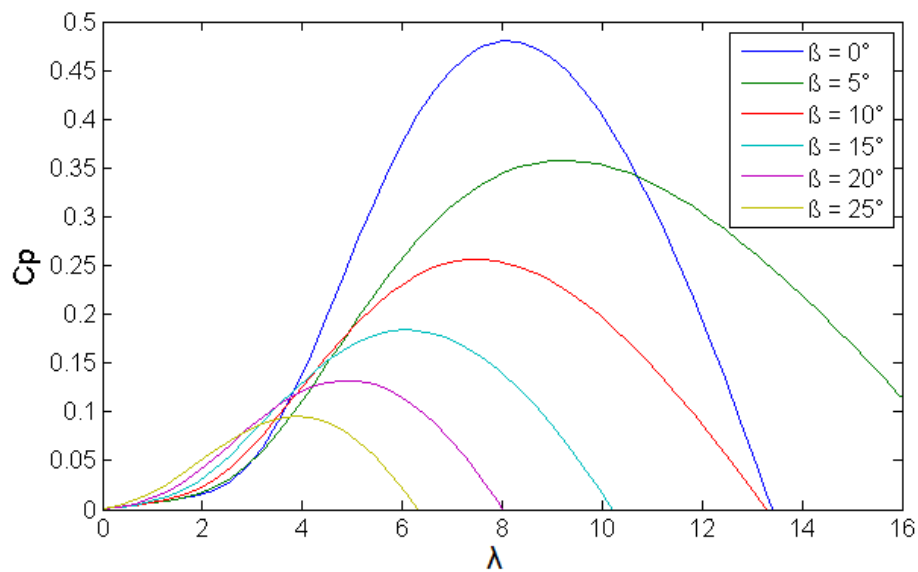
$P_m$  é a potência mecânica extraída pela turbina;

$C_p$  é o coeficiente de potência;

$\lambda$  é a relação entre velocidade angular das pás e velocidade dos ventos;

$\beta$  é a inclinação das pás da turbina.

Os valores do coeficiente de potência ( $C_p$ ) em função do ângulo de passo das pás ( $\beta$ ) e a relação ( $\lambda$ ) entre a velocidade angular das pás e a velocidade do vento, podem ser observados na Figura 11. Sendo notório que não necessariamente para maiores velocidades de vento existe maiores valores de potência extraída.



**Figura 11 - Coeficiente de potência em função de  $\lambda$  e  $\beta$**   
**Fonte: Autoria própria**

A relação entre a velocidade angular das pás e a velocidade do vento é dada pela seguinte equação

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_v} \quad (6)$$

Onde:

$\omega$  é a velocidade angular das pás em rad/s.

Após obter ambos os dados, é possível saber o quanto a turbina poderá extrair de energia mecânica dos ventos calculando o coeficiente de potência ( $C_p$ ).

O coeficiente de potência pode ser calculado a partir da Equação (7), onde os coeficientes  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ ,  $c_4$ ,  $c_5$  e  $c_6$  são valores obtidos empiricamente para uma turbina moderna.

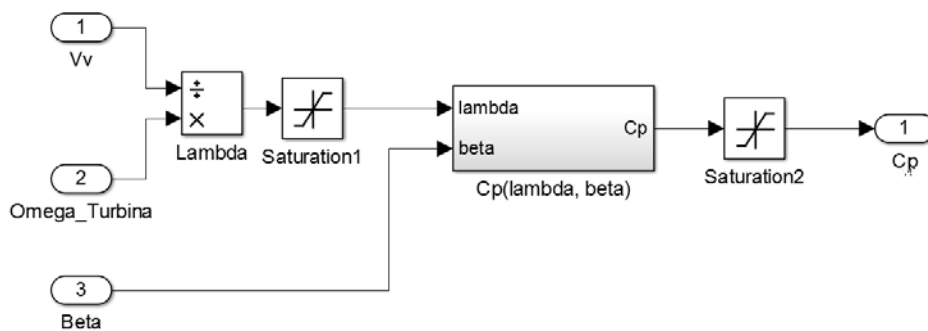
$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda_i} - c_3\beta - c_4 \right) e^{\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6\lambda \quad (7)$$

Onde o valor de  $\lambda_i$  é dado pela Equação (8).

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}} \quad (8)$$

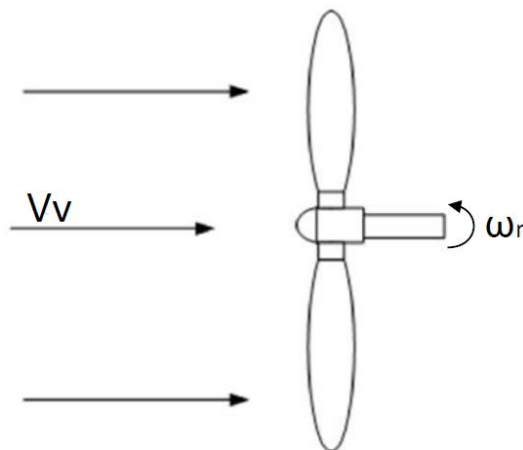
As constantes  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ ,  $c_4$ ,  $c_5$  e  $c_6$  são obtidas empiricamente. Na literatura, é comum usar  $c_1 = 0.5176$ ,  $c_2 = 116$ ,  $c_3 = 0.4$ ,  $c_4 = 5$ ,  $c_5 = 21$  e  $c_6 = 0.0068$  (Matlab®, 2013).

A Figura 12 mostra a Equação (7) implementada no Simulink, equação que foi utilizada para gerar as curvas da Figura 11.



**Figura 12 - Equação (7) implementada no Simulink**  
Fonte: Autoria própria

A velocidade de referência do modelo será a velocidade angular máxima ( $\omega_r$ ) de saída da turbina para dados o ângulo de passo das pás ( $\beta$ ) e velocidade do vento ( $V_v$ ). Como mostrado na Figura 13.



**Figura 13 - Turbina eólica**  
Fonte: Autoria própria

Resolvendo a Equação (6) para  $\omega$ , podemos obter a velocidade angular máxima, que será utilizada como velocidade de referência, em função da velocidade do vento que incide na turbina, raio da turbina e um valor conhecido do ângulo  $\lambda$  para extrair uma máxima potência do gerador. Resultando na Equação (9).

$$\omega_r = \frac{\lambda_{max}}{R} V_v \quad (9)$$

Os valores da relação  $\lambda$  para um  $C_p$  máximo foram obtidos através de simulações para vários ângulos  $\beta$  e podem ser vistos na Tabela 1.

**Tabela 1 - Valores de  $\beta$  e  $\lambda$  para um  $C_p$  máximo**

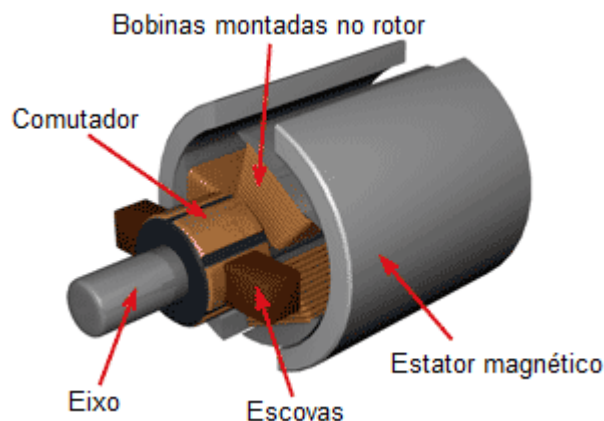
$\beta$	$\lambda_{max}$	$C_p$
0	8,1	0,48
5	9,23	0,3576
10	7,49	0,2561
15	6,08	0,1840
20	4,9	0,1325
25	3,87	0,0952

**Fonte: Autoria própria**

## 2.6 MOTOR ELÉTRICO CC

Um motor de corrente contínua converte energia elétrica em energia mecânica, ao alimentá-lo com corrente contínua ele a transforma em torque eletromagnético. Como a turbina, um motor CC também pode ser modelado matematicamente em função da corrente de campo proporcional a sua velocidade de rotação. Neste trabalho será modelado um motor CC com circuito de campo excitado de forma independente.

De acordo com Patané (2008), um motor CC é constituído por uma armadura ou rotor, bobinas de campo ou polos, comutador e escovas. Esses componentes são exibidos na Figura 14.



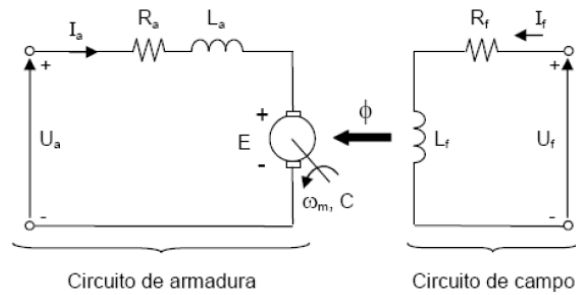
**Figura 14 - Partes de um motor CC**  
Fonte: <<http://www.socialledge.com>> (2017)

A armadura é o elemento rotativo do motor de corrente contínua. É montada sobre um eixo que também gira. Nesse mesmo eixo existe segmentos de cobre isolados entre si todos unidos por um aro de aperto na forma cilíndrica, esse conjunto é chamado de comutador e cada segmento do comutador está unido a um enrolamento da armadura (Fitzgerald, 1999).

O comutador é um tubo de cobre axialmente segmentado no qual estão conectados os terminais das espiras da armadura, e tem a função de inverter sistematicamente o sentido da corrente contínua que circula na armadura (Patané, 2008).

O estator contém um enrolamento, chamado de campo, que é alimentado diretamente por uma fonte de tensão contínua, ou pode ser um ímã permanente no caso de motores pequenos (Patané, 2008).

A rotação do motor ocorre ao aplicar uma corrente elétrica nos enrolamentos da armadura e ocorrendo assim uma interação com o campo magnético do estator do motor. As escovas transmitem energia através de uma fonte de tensão contínua para a armadura e então o comutador inverte o sentido da corrente na armadura. O campo magnético é gerado por eletroímã ou ímã permanente. Dessa forma será produzido um torque que manterá o rotor girando no mesmo sentido.



**Figura 15 - Circuito elétrico do motor CC**  
**Fonte: Serra (2010)**

### 2.6.1 Modelo matemático do motor CC

Um motor CC pode ser modelado pelos parâmetros de força eletromotriz, conjugado mecânico e equação de velocidade (Nasar, 1984).

Que são descritos nos tópicos a seguir:

#### 2.6.1.1 Força Eletromotriz

Para um condutor a tensão induzida ( $e$ ) por um fluxo magnético ( $\phi$ ) em um condutor que gira a uma velocidade angular ( $n$ ) em rotações por minuto ( $rpm$ ) num campo magnético gerado por ( $p$ ) polos é dado pela seguinte equação.

$$e = \frac{p\phi n}{60} \quad (10)$$

Considerando ( $z$ ) condutores na armadura, o número efetivo de condutores é  $z/a$ , onde  $a$  é o número de caminhos paralelos no enrolamento da armadura, que produzem uma tensão ( $E$ ) no enrolamento da armadura. Para o enrolamento inteiro a tensão total é obtida pela Equação (11).

$$E = \frac{p\phi n}{60} \frac{z}{a} = \frac{zp}{2\pi a} \phi \omega_m \quad (11)$$

Onde  $\omega_r$  é a velocidade angular do motor em rad/s.

$$\omega_m = \frac{2\pi n}{60} \quad (12)$$

Substituindo a Equação (12) na Equação (11), temos.

$$E = k_a \phi \omega_m \quad (13)$$

Onde  $k_a$  é uma constante adimensional e  $\phi$  é o fluxo de energia.

### 2.6.1.2 Conjugado mecânico

A potência mecânica transmitida pela armadura é o produto do conjugado eletromagnético ( $T_e$ ) pela velocidade angular ( $\omega_r$ ). Considerando uma máquina ideal, onde a potência elétrica é igual à potência mecânica.

$$T_e \omega_m = E i_a \quad (14)$$

Substituindo a Equação (13) na Equação (14) temos a equação do conjugado, dada pela Equação (15).

$$T_e = k_a \phi i_a \quad (15)$$

E ainda substituindo o valor do fluxo pelo produto da constante de proporcionalidade pela corrente de campo, como na Equação (16), obteremos a Equação (17).

$$\phi = k_f i_f \quad (16)$$

$$T_e = k i_f i_a \quad (17)$$

Onde  $k = k_f k_a$  é a constante de conversão eletromecânica de energia.



### 2.6.1.3 Equação de velocidade

A lei de Kirchhoff das tensões para um circuito de armadura desses motores é exibida na Equação (18).

$$V - E = i_a R_a \quad (18)$$

Se substituirmos a Equação (12) na (18) teremos a velocidade angular em função da tensão aplicada no motor, do fluxo magnético e da corrente de armadura.

$$\omega_m = \frac{V - i_a R_a}{k_a \phi} \quad (19)$$

A resistência de armadura é um valor já estabelecido pois é um aspecto construtivo do motor CC. Assim é notório que somente esses parâmetros poderão ser facilmente variados para obter diferentes velocidades angulares do motor CC.

Neste trabalho o controle da velocidade angular do motor CC será realizado pela variação da tensão aplicada à armadura, a partir da ação de controle de um controlador PI.

### 2.6.1.4 Modelo dinâmico do motor CC

O modelo dinâmico do motor também se baseia em equações elétricas e mecânicas. A Figura 16 mostra uma representação da dinâmica de um motor CC.

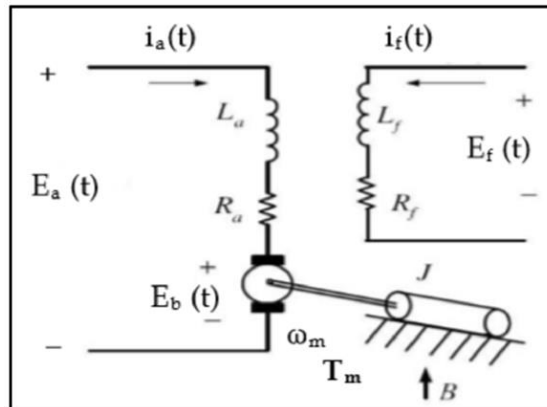


Figura 16 - Modelo Dinâmico do Motor CC  
Fonte: Rosa (2014)

A equação diferencial do circuito de armadura é dada por:

$$E_a(t) = R_a I_a(t) + L_a \frac{dI_a}{dt} + E_b(t) \quad (20)$$

Onde:

$E_a$  é a tensão de armadura;

$R_a$  é a resistência de armadura;

$I_a$  é a corrente de armadura;

$L_a$  é a indutância de armadura;

$E_b$  é a força contra eletromotriz.

A equação do torque é dada por:

$$T_m(t) = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m(t) \quad (21)$$

Onde:

$T_m$  é o torque mecânico;

$J$  é o momento de inércia da máquina;

$B$  é o coeficiente de atrito viscoso;

$\omega_m$  é a velocidade angular.

Como o campo do motor CC é mantido com valor de tensão e corrente constante pode-se afirmar que:

$$T_m(t) = K_t I_a(t) \quad (22)$$

E a força contra eletromotriz do motor é proporcional à velocidade, dada por:

$$E_b(t) = K_b \omega_m(t) \quad (23)$$

Onde:

$K_b$  é a constante de força contra eletromotriz.

Aplicando a transformada de Laplace nas equações anteriores e reorganizando-as, obtêm-se as seguintes equações:

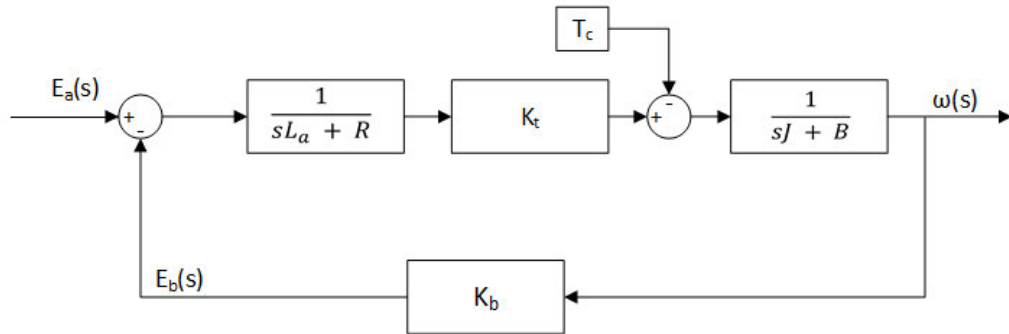
$$I_a(s) = \frac{E_a(s) - E_b(s)}{sL_a + R_a} \quad (24)$$

$$\omega_m(s) = \frac{T_m(s)}{sJ + B} \quad (25)$$

$$T_m(s) = K_t I_a(s) \quad (26)$$

$$E_b(s) = K_b \omega_m(s) \quad (27)$$

Dessa maneira é possível aplicar essas equações no modelo do *Matlab*® e obter os ganhos do sistema. Onde a entrada é a tensão de armadura ( $E_a$ ) e a saída é a velocidade angular ( $\omega$ ) em radianos por segundo. A Figura 17 apresenta um diagrama de blocos de um motor CC.



**Figura 17 - Diagrama de blocos do motor CC**  
**Fonte: Autoria própria**

### 2.6.2 Acionamento de motores CC

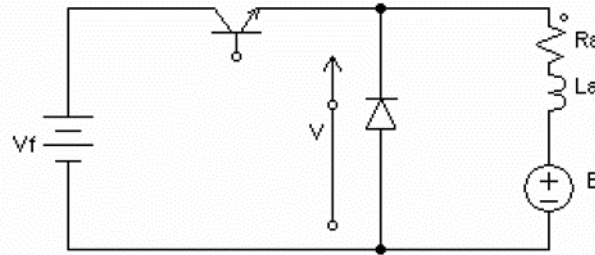
A maioria das aplicações dos motores CC, eles são ligados a uma linha de alimentação e funcionam de acordo com as suas características de conjugado-velocidade (Patané, 2008).

A velocidade do motor de CC pode ser controlada por ajuste de corrente de campo, tensão de armadura, e por inserção de resistência no circuito de armadura.

Os circuitos que possuem tensão de armadura ajustável executam essa função utilizando *choppers* ou circuitos conversores CC-CC. Esses conversores são usados para obter uma tensão CC variável a partir de uma fonte de tensão CC constante através do controle do tempo de condução de um elemento semiconductor que neste trabalho será uma chave eletrônica.

Essa conversão é obtida pela combinação de um indutor ou capacitor e um dispositivo de chaveamento de alta frequência.

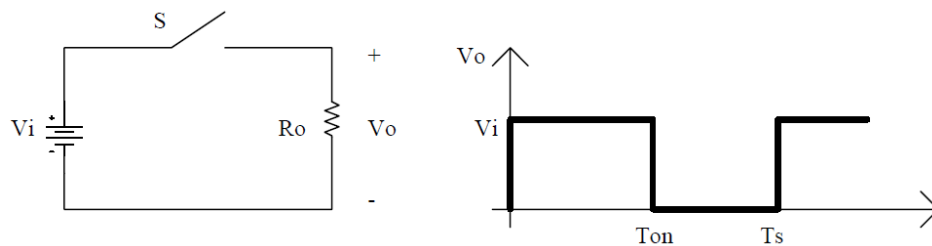
Uma das técnicas de chaveamento usada em *choppers* é denominada de modulação por largura de pulso, do inglês *Pulse Width Modulation* (PWM). A configuração de um Chopper é ilustrada na Figura 18.



**Figura 18 - Configuração básica do chopper de um quadrante**  
**Fonte: Patané (2008)**

### 2.6.2.1 Modulação PWM

A Figura 19 apresenta um circuito básico com uma chave que pode ser aberta e fechada em intervalos de tempo. Essa chave que alterna entre aberta e fechada é chamada de *chopper step-down* ou *buck*.



**Figura 19 - Conversor CC-CC e forma de onda da tensão de saída**  
**Fonte: Petry (2001)**

O intervalo de comutação é definido pela Equação (28).

$$T_s = \frac{1}{F_s} \quad (28)$$

Onde:

$F_s$  é a frequência de comutação;

$T_s$  é o intervalo de comutação.

A razão entre o intervalo de comutação ( $T_s$ ) e o intervalo de condução do interruptor S ( $T_{on}$ ) é definido por razão cíclica e é exibida na Equação (29) (Petry, 2001).

$$D = \frac{T_{on}}{T_s} \quad (29)$$

Onde:

$T_{on}$  é o intervalo de condução;

$D$  é a razão cíclica.

A Figura 20 demonstra as características do circuito *buck*. A tensão média de saída ( $V_o$ ) é menor que a tensão de entrada ( $V_i$ ). Enquanto a chave  $S$  estiver fechada, o diodo ficará polarizado reversamente e o indutor irá armazenar energia em forma de um campo magnético. E então  $V_o \leq V_i$ .

Quando a chave abrir, a tensão  $V_L$  torna-se negativa impondo o diodo  $D$  ficar em condução até que a energia do indutor se descarregue ou que a chave  $S$  volte a fechar. Nesta situação temos que  $V_o$  será menor que  $V_i$ , pois a parcela relativa a  $V_L$  diminui a soma  $V_o = V_L + V_R$  (Ahmed, 2000).

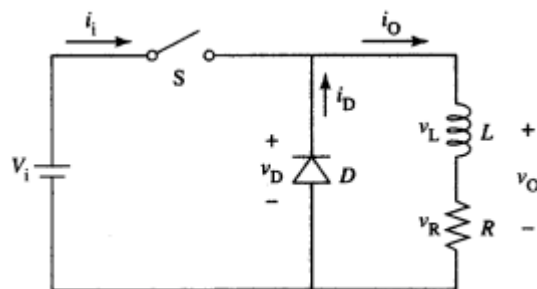


Figura 20 - Conversor Abaixador (Step-Down ou Buck)  
Fonte: Simas (2013)

## 2.7 CONTROLE PID

O controle automático é fundamental no avanço da engenharia e seu desenvolvimento é essencial para melhoria de vários processos. Pois é usado desde controle de pressão, temperatura, nível e vazão em processos industriais até o deslocamento de satélites na órbita terrestre. O avanço dessa ciência significa um meio de melhorar produtividade, aperfeiçoar processos e diminuir atividades repetitivas (Ogata, 2010).

Um sistema de controle pode ser um sistema de malha fechada ou malha aberta. Sistemas de controle de malha aberta são aqueles em que o sinal de saída não exerce nenhuma ação de controle no sistema. Isso quer dizer que em um sistema

de controle de malha aberta o sinal de saída não é medido nem realimentado para comparação com a entrada. Um exemplo são sistemas que executam uma sequência em função do tempo, a tarefa será feita de qualquer forma, independentemente do resultado na saída (Maya, 2014).

Sistemas de controle de malha fechada ou sistemas de controle com realimentação. É um sistema que estabelece uma relação de comparação entre a saída e a entrada de referência, utilizando a diferença como meio de controle e realimenta o controlador, de modo que minimize o erro e acerte a saída do sistema ao valor de referência (Maya, 2014).

Entre os controladores de malha fechada está o controlador PID. O controlador PID é uma técnica de controle muito difundida na indústria pois usa um algoritmo com excelentes respostas para uma série de processos (Matas, 2012).

### 2.7.1 Ação de Controle Proporcional

Na ação de controle proporcional, a relação entre a saída do controlador e o sinal de erro é apenas um ganho, sendo representada pela Equação (30).

$$u(t) = K_p e(t) \quad (30)$$

A sua função de transferência pode ser verificada na Equação (31).

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (31)$$

Onde:

$U(s)$  é a amplitude do sinal de controle;

$E(s)$  é o sinal de erro;

$K_p$  é o ganho proporcional.

### 2.7.2 Ação de Controle Integral

A ação integral vai atuar no processo ao longo do tempo enquanto existir diferença entre o valor desejado e o valor medido. Assim, o sinal de correção é integrado no tempo. Ou seja, a ação de controle  $u(t)$  é proporcional a integral do erro.

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (32)$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (33)$$

A função de transferência é:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (34)$$

Onde:

$K_i$  é o ganho integral;

$T_i$  é o tempo integrativo.

### 2.7.3 Ação de Controle Proporcional + Integral (PI)

A ação PI reúne as características do controle proporcional e integral em um mesmo controlador, as equações do controlador podem ser escritas da seguinte forma.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (35)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (36)$$



#### 2.7.4 Ação de Controle Proporcional + Derivativa (PD)

Na prática a ação derivativa não pode ser implementada isoladamente. Sua utilização é normalmente desenvolvida juntamente com a ação proporcional, o que resulta nas seguintes equações características:

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (37)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p (1 + sT_d) \quad (38)$$

$$K_d = K_p T_d \quad (39)$$

Onde:

$K_d$  é o ganho derivativo;

$T_d$  é o tempo derivativo.

O tempo derivativo ( $T_d$ ), correspondente ao tempo gasto para se obter a mesma quantidade operacional da ação proporcional somente pela ação derivativa, quando o desvio varia numa velocidade constante.

#### 2.7.5 Controle Proporcional + Integral + Derivativo (PID)

O controle proporcional associado ao integral e ao derivativo é um dos mais consagrados tipos de controle utilizados em sistemas de malha fechada.

As equações características são as seguintes:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (40)$$

A sua função de transferência é dada por:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + s T_d \right) \quad (41)$$

A representação em diagrama de blocos de um controlador PID é ilustrado na Figura 21.

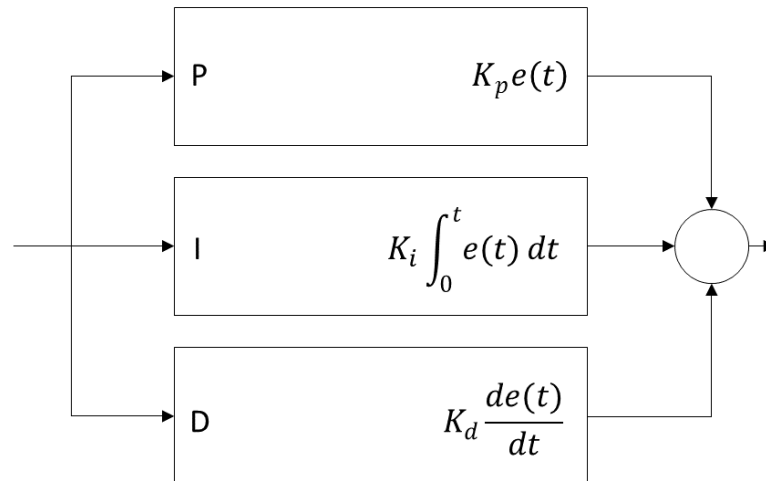


Figura 21 - Representação em diagrama de blocos de um controlador PID  
Fonte: Autoria própria

## 2.8 MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO E SINTONIA DE SISTEMA

Identificação de um sistema trata-se da determinação do modelo matemático que represente os seus aspectos essenciais de forma adequada para uma utilização particular (Coelho, 2004).

Tais modelos representam a dinâmica do sistema seja um processo ou uma planta, podendo a maioria dos processos industriais ser modelada por funções de transferência de primeira ou de segunda ordem com atraso de transporte (Morari and Zafrou, 1989). Neste trabalho, o modelo estimado do processo é representado segundo (Ogata, 2000) pela seguinte expressão:

$$G(s) = \frac{K e^{-Ls}}{Ts + 1} \quad (42)$$

Onde:

$K$  é o ganho estático do processo;

$L$  é o atraso do transporte;

$T$  é a constante de tempo.

No presente trabalho o método de identificação aplicado no sistema foi o de Broída, (Hamiti, 1996), o qual traça a resposta do sistema de primeira ordem sobre a curva de ordem superior obtida experimentalmente. Verifica-se que há um intervalo comum entre elas: um ponto A situado a 28% de  $\Delta y$  e um ponto B situado a 40% de  $\Delta y$ , conforme na Figura 22. Sendo os valores de  $L$  e  $T$  calculados da seguinte forma:

$$T = 5,5(t_2 - t_1) \quad (43)$$

$$L = 2,8t_1 - 1,8t_2 \quad (44)$$

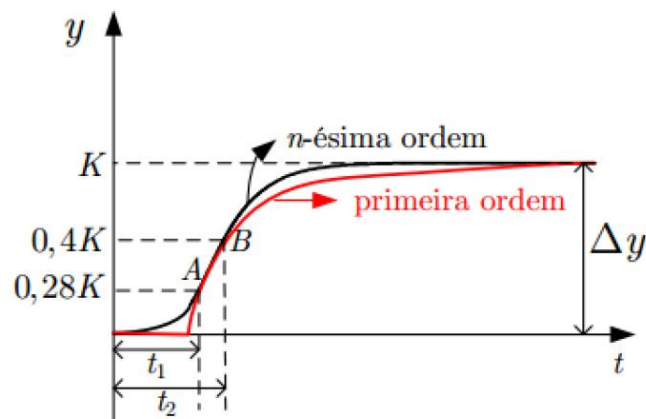


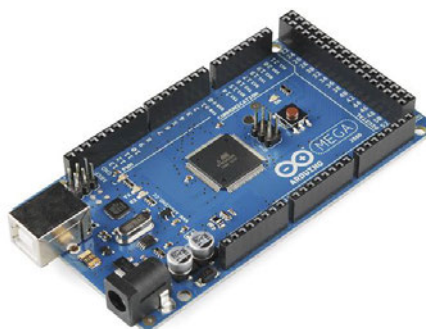
Figura 22 - Curva de reação de sistema de primeira ordem sobre a de ordem superior  
Fonte: Hamiti (1996)

A sintonia de um algoritmo de controle consiste em selecionar valores adequados de seus parâmetros que atendam as condições de projeto (Carmo, 2005).

No caso dos controladores PI, trata-se de calcular os valores dos parâmetros  $K_p$  e  $T_i$ , que representam o ganho proporcional e o tempo de integral (Freire, 2013).

## 2.9 ARDUÍNO

O *Arduino* é uma plataforma de prototipagem eletrônica de hardware livre, ele é capaz de receber, processar e enviar sinais para outros dispositivos. Portanto, é possível fazê-lo se comunicar com um *software* rodando em um computador (Moreira, 2012).



**Figura 23 - Arduino Mega 2560**  
Fonte: <[www.arduino.cc](http://www.arduino.cc)> (2016)

Projetada com um microcontrolador Atmel AVR, possui uma linguagem de programação C/C++ como padrão, ou seja, oferece uma linguagem de programação de alto nível. Com ele também é possível captar sinais fornecidos por sensor, processar esses dados e emitir comandos aos atuadores através de suas portas USB.

Existem diversas versões de placas *Arduino*. Todas elas possuem, entradas digitais e analógicas, saídas digitais, núcleo controlador e interface serial ou USB (Moreira, 2012).

Neste trabalho o *Arduino Mega 2560* fará a comunicação com a simulação implementada no Matlab/Simulink® e o drive que acionará o motor CC. Algo análogo ao bloco somador no diagrama de blocos, recebendo a tensão gerada no tacogerador e interpretando como o valor de velocidade angular do motor CC. O mesmo para o valor de referência angular do modelo da turbina eólica calculado e enviado pelo Matlab/Simulink®.

Será configurado um controlador PI no *Simulink*® e o *Arduino* usará essa configuração para controlar a tensão do *PWM* e assim a velocidade angular do motor CC de acordo com a velocidade de vento. Portanto, poderá ser feito o controle do motor enviando comandos à interface do *Arduino* via *Simulink*®.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia empregada para se alcançar os objetivos propostos é descrita a seguir.

O trabalho primeiramente consiste em uma revisão da literatura de autores que pesquisam na área de aerogeradores para verificar o modelo matemático de uma turbina eólica. Buscar conceitos necessários para o acionamento de um motor de corrente contínua. Além do estudo de técnicas de sistemas de controle para obter os valores das parcelas proporcional e integral do controlador PI.

O motor CC que será utilizado possui um tacogerador acoplado ao eixo, o que facilita a realimentação para fechar a malha de controle de velocidade. Pois tacogeradores convertem a rotação do eixo do motor em tensão elétrica, gerando uma tensão de saída proporcional à velocidade angular de entrada. Enviando esse sinal para o *Arduino* será possível comparar o sinal de velocidade angular de saída do eixo com o valor de velocidade de referência do modelo da turbina fornecido pelo modelo matemático e então gerar ações de controle que permita o sistema operar dentro de uma dinâmica aceitável.

Para alcançar os objetivos propostos a metodologia consiste em desenvolver um modelo matemático de turbina eólica em ambiente *Matlab/Simulink®*, desenvolver uma bancada didática utilizando um motor CC que emule uma turbina eólica e desenvolver placas eletrônicas que possibilite o controle de velocidade do mesmo, identificar o sistema através de um ensaio em malha aberta utilizando técnicas tradicionais da literatura, obter ganhos que possibilite que o sistema opere com uma dinâmica aceitável para finalmente aplicar esses ganhos em malha fechada e obter resultados experimentais.

#### 3.1 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DA TURBINA EM AMBIENTE MATLAB/SIMULINK

Para implementação prática do sistema de controle de velocidade angular de um motor CC, algumas simulações foram feitas com o objetivo de verificar o comportamento do sistema, toda a simulação foi realizada em um ambiente *Matlab/Simulink®*.

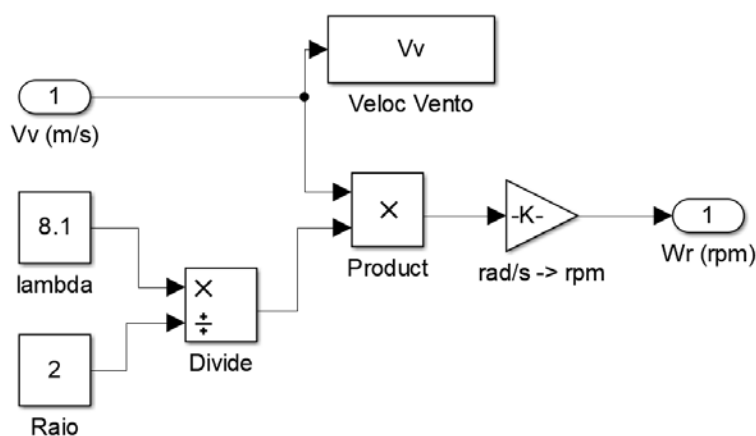
Obtendo os valores de  $C_p$ , é possível conhecer os valores de  $\beta$  e  $\lambda$  para uma extração máxima de potência da turbina eólica. Esses valores são evidenciados na Tabela 1.

Será emulado uma turbina eólica de  $6\text{ kW}$  de potência nominal, considerando que essa potência será gerada quando o vento incidente na turbina estar a uma velocidade de  $12\text{ m/s}$ , substituindo esses valores na Equação 5 e isolando o valor do raio ( $R$ ) chega-se que o raio das pás da turbina eólica é de aproximadamente 2 metros.

$$R = 2\text{ m} \quad (45)$$

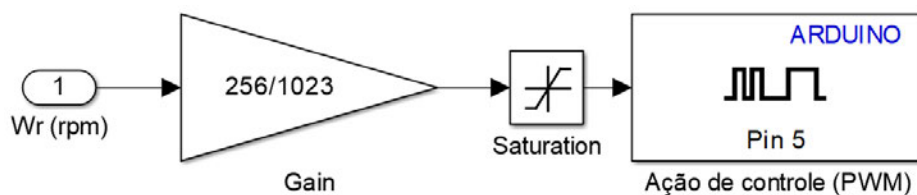
Nota também, que para extrair a máxima potência da turbina eólica é necessário que o valor do coeficiente de potência ( $C_p$ ) seja máximo também, o que ocorre quando  $\lambda = 8,1$  e  $\beta = 0^\circ$ .

A partir desses valores pode-se obter as velocidades angulares de referência para uma determinada velocidade de vento. O sistema implementado em diagrama de blocos está demonstrado na Figura 24.



**Figura 24 - Equação (8) implementada no Simulink**  
**Fonte: Autoria própria**

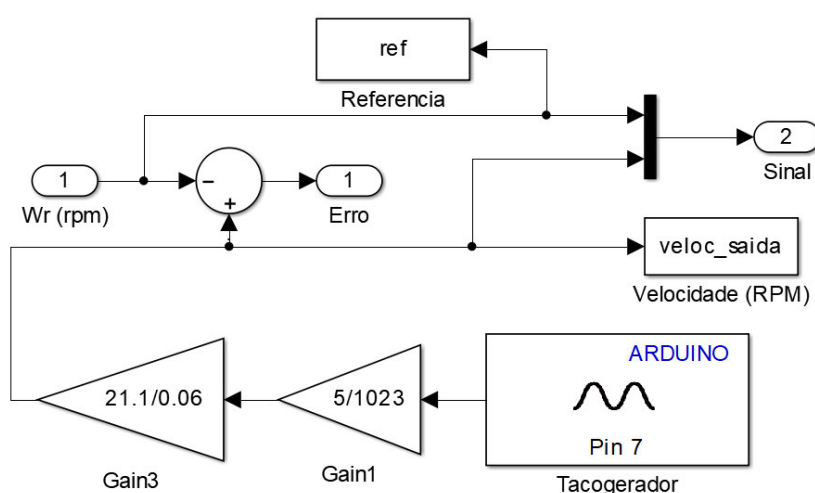
Após calculado o valor de referência, o mesmo é comparado com o valor medido e assim será aplicado a ação de controle, aumentando ou diminuindo a largura do pulso. O diagrama está ilustrado na Figura 25.



**Figura 25 - Saída *Arduino* (PWM)**  
**Fonte: Autoria própria**

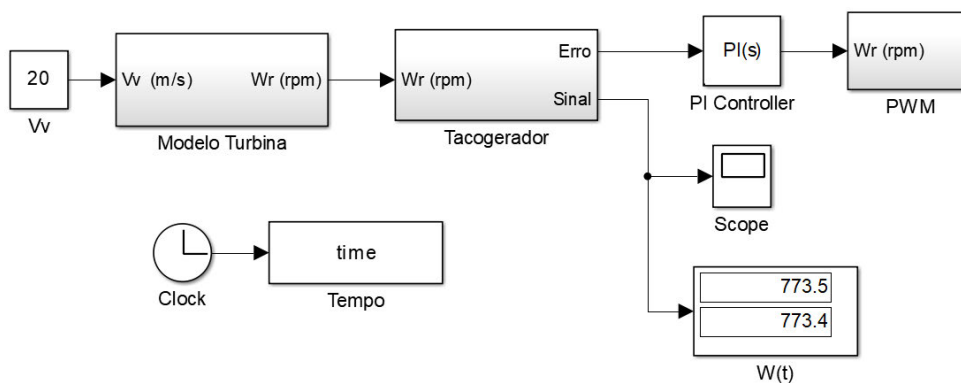
Após a ação de controle ser aplicada e a velocidade do motor CC aumentar ou diminuir a tensão gerada pelo tacogerador irá alterar proporcionalmente. A tensão de 0 a 100 V gerada no tacogerador é condicionada para 0 a 5 V por um divisor resistivo para então ser medida pela entrada analógica do *Arduino*. Após o valor de tensão ser convertido para velocidade angular do motor CC, gera-se um erro com a velocidade medida e a velocidade de referência. A Figura 26 mostra como o processo de obtenção desse erro foi implementado.

Onde os blocos *Gain1* e *Gain3* são ganhos para converter o valor de 8 bits do *Arduino* e converter a tensão em *rpm* respectivamente.



**Figura 26 - Entrada *Arduino* (Tacogerador)**  
**Fonte: Autoria própria**

O valor do erro será enviado para o bloco do controlador PI, configurado no *Matlab/Simulink*®, onde será calculada a ação de controle e enviada para o bloco *PWM* da Figura 25. Uma visão geral de todo o processo pode ser vista na Figura 27.



**Figura 27 - Modelo Completo**  
**Fonte: Autoria própria**

A Figura 27 exibe o modelo completo implementado no *Matlab/Simulink*®. Os subsistemas dentro do diagrama são exibidos nas figuras anteriores, são eles: Modelo da turbina na Figura 24, Tacogerador na Figura 26 e *PWM* na Figura 25.

### 3.2 VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO A PARTIR DE TRABALHOS NA LITERATURA

O modelo matemático e as equações utilizadas na emulação da turbina eólica foram consideradas e validadas a partir de trabalhos que utilizaram as mesmas equações para simular a dinâmica de uma turbina eólica e obtiveram resultados satisfatórios.

Siegfried Heier, publicou em 1998, o livro *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*. Onde ele descreve e demonstra todo o equacionamento de extração de potência de um aerogerador, além de dar um embasamento técnico em toda a parte de geração eólica. Outros trabalhos que utilizam essas equações em seus modelos são descritos a seguir:

Em 2004, Marcello Pereira publicou *Um Estudo do Aerogerador de Velocidade Variável e Sua Aplicação para Fornecimento de Potência Elétrica Constante* onde o trabalho propõe um controlador da potência ativa e reativa despachadas para a rede elétrica a partir de geradores de indução duplamente alimentados acoplados a turbinas eólicas.

Thiago Bazzo, em 2007, desenvolveu em sua dissertação a *Implementação de Controle Vetorial em Geradores Assíncronos* e aborda a implementação do controle vetorial de um gerador de indução duplamente alimentado com aplicação em sistemas eólicos de operação em velocidade variável.



Um trabalho semelhante a esse é a dissertação *Simulação De Aerogerador Em Uma Bancada Experimental* feita por Rafael Rocha em 2008. Onde é descrito o desenvolvimento de um sistema que emula uma turbina eólica em uma bancada experimental. A partir do modelo da turbina eólica o trabalho reproduz os efeitos causados por variações na dinâmica do vento, fenômenos aerodinâmicos, mecanismos de controle de passo das pás e características do sistema de transmissão.

Outro trabalho acadêmico que faz uso das mesmas equações é o artigo *Modelagem e Simulação de um Sistema Eólico Considerando a Dinâmica da Turbina e Multiplicador de Velocidade* dos autores Marcelo Granza e Hélio Voltolini publicado em 2010. O artigo apresenta a modelagem e a simulação de um sistema eólico composto por uma turbina eólica, um *gearbox* e um gerador de indução de rotor em gaiola. São analisadas condições de operação dinâmica e estática considerando as inércias e os coeficientes de atrito da turbina, *gearbox* e gerador.

O próprio *Matlab/Simulink* possui uma biblioteca chamada *Wind Turbine* onde todas as equações estão implementadas em um único bloco e é possível emular um sistema eólico a partir desse bloco.

Porém, esse trabalho não fará uso desse bloco e sim foram implementadas todas as equações da dinâmica de uma turbina eólica. Outro diferencial que esse trabalho terá em relação aos outros citados será o desenvolvimento de uma bancada que ficará à disposição para estudos futuros. Os resultados serão todos a partir de simulação experimental.

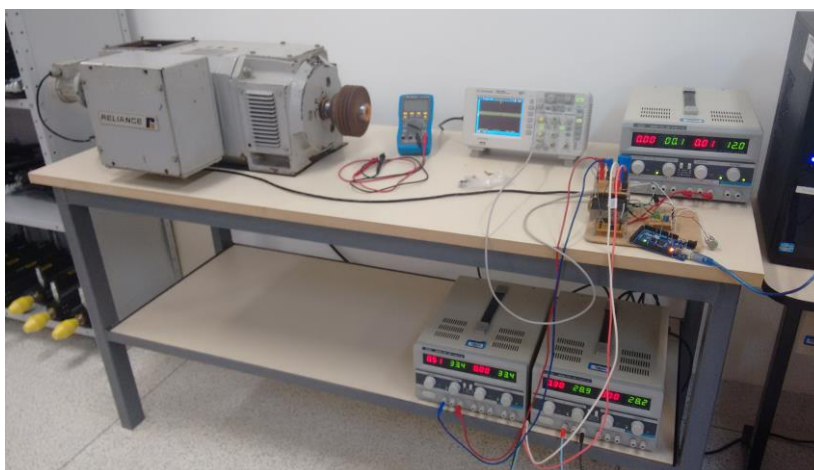
### 3.3 BANCADA DIDÁTICA PARA EMULAÇÃO DE UMA TURBINA EÓLICA

A bancada é composta pelos seguintes itens: Motor CC, *Arduino*, placas de acionamento e controle, placa de divisor resistivo, fontes CC e um computador com sistema operacional de 32 Bits, processador Intel Core i3-2100 CPU @ 3.10Ghz e memória instalada (RAM) de 2,00 GB. A Figura 28 mostra a bancada completa.

Abaixo será descrito cada item que foi utilizado na confecção da bancada didática:

### 3.3.1 Motor CC

O motor CC que será usado no trabalho foi doado à universidade pela empresa Ibema localizada na cidade de Turvo.



**Figura 28 - Bancada didática**  
Fonte: Autoria própria

O motor é fabricado pela Reliance e sua potência é de 10 kW com rotação nominal de 1768 RPM. Tensão de alimentação de 440 V na armadura com uma corrente de 26,6 A e 300 V no campo com uma corrente de 2,18 A.

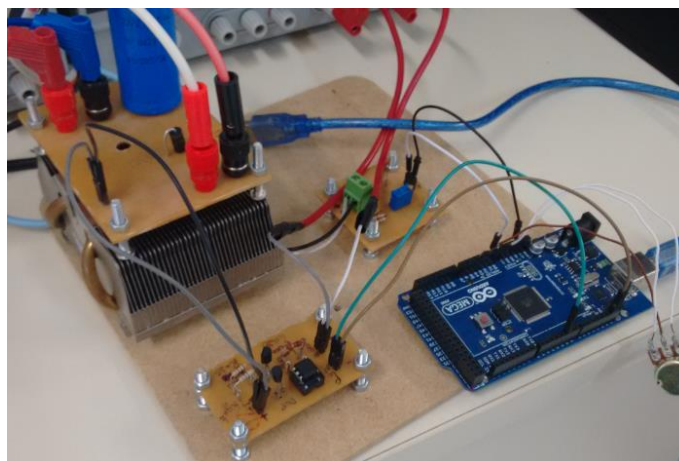
O destaque em vermelho na Figura 29 é o Tacogerador acoplado ao motor, que será o instrumento que medirá a rotação do motor. O tacogerador gera uma tensão contínua de 0 a 100 V diretamente proporcional a rotação do motor. Após gerada a tensão é enviada para a placa de divisor resistivo e condicionada para um intervalo proporcional de 0 a 5 V, tensão adequada para os terminais analógicos do *Arduino*. A tensão será adquirida pelo *Arduino* e convertida no *Matlab/Simulink*® em um valor de velocidade angular.



**Figura 29 - Motor CC e Tacogerador**  
Fonte: Autoria própria

### 3.3.2 *Arduino* e Drive

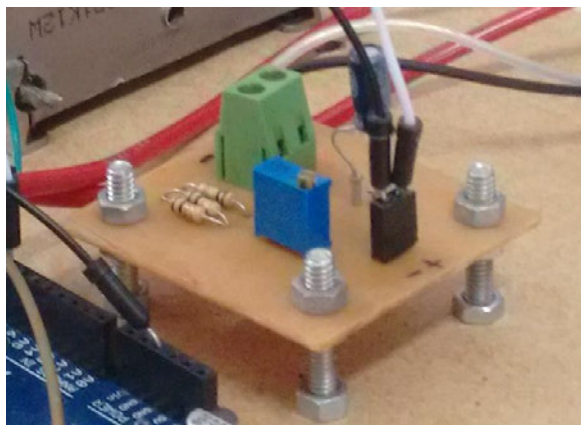
A Figura 30 mostra o *Arduino* e as placas eletrônicas que serão usadas na aquisição de dados e controle do motor CC.



**Figura 30 - Placas desenvolvidas e *Arduino***  
**Fonte: Autoria própria**

O *Arduino Mega 2560* faz a aquisição de dados da bancada. Porém, antes do sinal gerado no tacogerador ir para o *Arduino* é necessário condicionar sua tensão, pois o tacogerador gera uma tensão proporcional a velocidade angular no intervalo de 0 a 100 V e o *Arduino* opera com tensões de 0 a 5 V, então para não danificar o *Arduino* é preciso que a tensão seja ajustada para o intervalo de 0 a 5 V antes de recebê-la. A placa de divisor resistivo é exibida na Figura 31.

O sinal é então enviado à simulação implementada no *Matlab/Simulink*® e a ação de controle será enviado à placa de acionamento e controle.

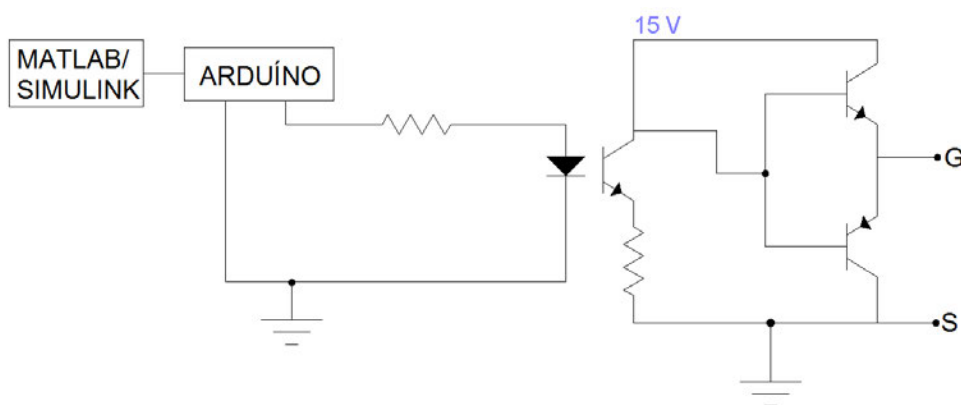


**Figura 31 - Placa de divisor resistivo**  
**Fonte: Autoria própria**

Após o *Arduino* receber a ação de controle do *Matlab/Simulink*®, ele envia a ação para a placa de controle, que é explicada no tópico abaixo.

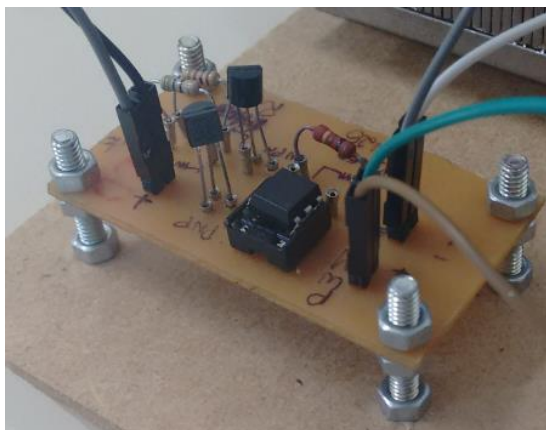
### 3.3.3 Placa de Controle

O layout da placa de controle e condicionamento de sinal é ilustrado na Figura 32. Essa placa foi desenvolvida utilizando um optoacoplador para isolar o *Arduino* do restante do circuito para assim protegê-lo de eventuais sobre cargas.



**Figura 32 – Layout do drive**  
**Fonte: Autoria própria**

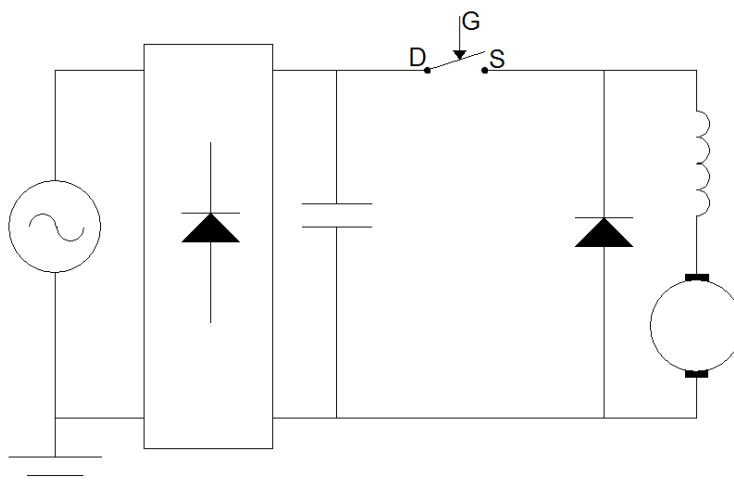
A Figura 33 mostra a construção da placa de controle.



**Figura 33 - Placa de controle**  
**Fonte: Autoria própria**

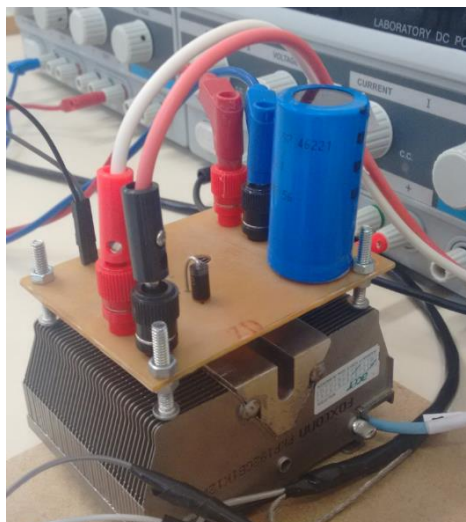
### 3.3.4 Placa de Acionamento

O layout da placa de acionamento é ilustrado na Figura 34. Tem a função de “executar” a ação de controle, pois esse circuito possui uma chave eletrônica que comuta com uma frequência que depende da ação de controle.



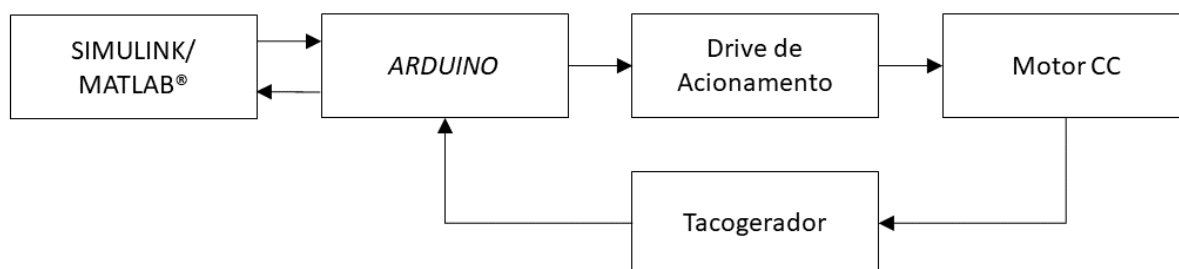
**Figura 34 - Placa de Acionamento**  
**Fonte: Autoria própria**

A Figura 35 mostra a construção da placa de acionamento.



**Figura 35 - Placa de Acionamento**  
**Fonte: Autoria própria**

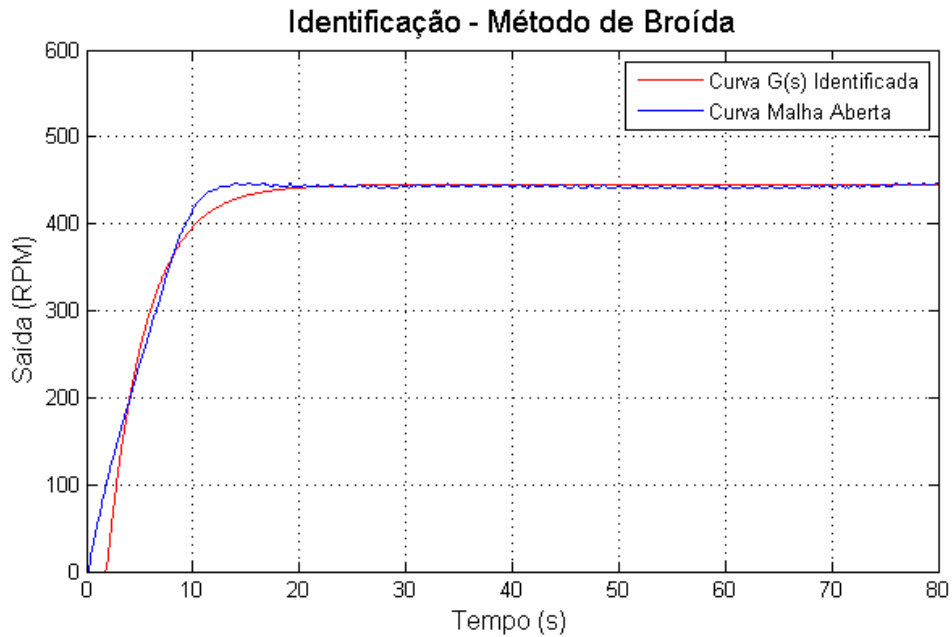
O diagrama de blocos da Figura 36 mostra o sentido da comunicação com todos os componentes da bancada.



**Figura 36 - Diagrama de blocos da bancada**  
**Fonte: Autoria própria**

### 3.4 IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA ATRAVÉS DE ENSAIOS MALHA ABERTA

Para obtenção dos ganhos do controlador PI que possibilite que o sistema opere dentro de uma dinâmica aceitável, foi realizada a identificação e sintonia do sistema utilizando métodos tradicionais da literatura juntamente com a ferramenta Sisotool do MATLAB®. Aplicando um degrau de 4 m/s de velocidade de vento de entrada em malha aberta, considerando o método de identificação de Broída (HAMITI, 1996), o sistema apresentou a curva de identificação, conforme Figura 37.



**Figura 37 - Curva obtida em malha aberta**  
**Fonte: Autoria própria**

Chegou-se na função de transferência  $G(s)$  a seguir:

$$G(s) = \frac{1,939}{2,475s + 1} e^{-1,79s} \quad (46)$$

Utilizando a ferramenta *Sisotool* do *Matlab*® considerando a Equação 46, foram obtidos os seguintes parâmetros:

$$K_p = 0,1045 \quad (47)$$

$$T_i = 2,3138 \quad (48)$$

### 3.5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Um aerogerador começa a gerar energia quando o vento incidente na turbina está próximo de  $4 \text{ m/s}$ . Com o aumento da velocidade do vento, a potência no eixo da máquina aumenta gradativamente até atingir a potência nominal, a qual varia geralmente entre  $9 \text{ m/s}$  e  $15 \text{ m/s}$ . O aerogerador segue gerando energia até uma velocidade máxima do vento de aproximadamente  $20 \text{ m/s}$ , quando por questões de segurança a turbina sai de operação para evitar que sofra danos em sua estrutura.

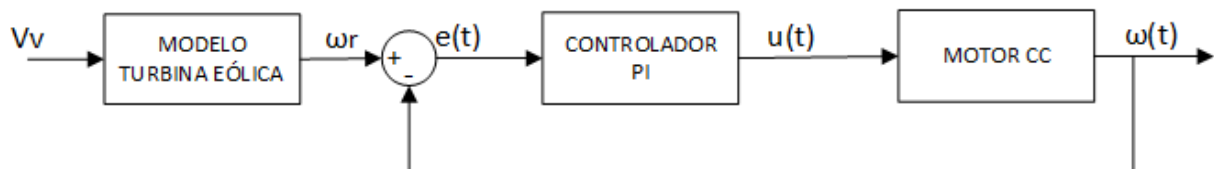
A partir disso, os degraus de velocidade de vento ( $V_v$ ) aplicados no modelo foram de  $4\text{ m/s}$  até  $20\text{ m/s}$ . A Tabela 2 mostra os degraus aplicados e suas respectivas velocidade angular de referência ( $\omega_r$ ).

**Tabela 2 - Valores de Velocidade Angular para dada Velocidade de Vento**

$V_v$ (m/s)	$\omega_r$ (rpm)
4	154,7
8	309,4
12	464,1
16	618,8
20	773,5

**Fonte: Autoria própria**

Com os ganhos proporcional e integral do controlador PI identificados, foram realizados ensaios em malha fechada, conforme Figura 38, onde foram aplicados degraus velocidade de vento possibilitando verificar o comportamento do sistema tanto na aceleração quanto na desaceleração.



**Figura 38 - Esquema geral do acionamento e controle do motor CC**

**Fonte: Autoria própria**

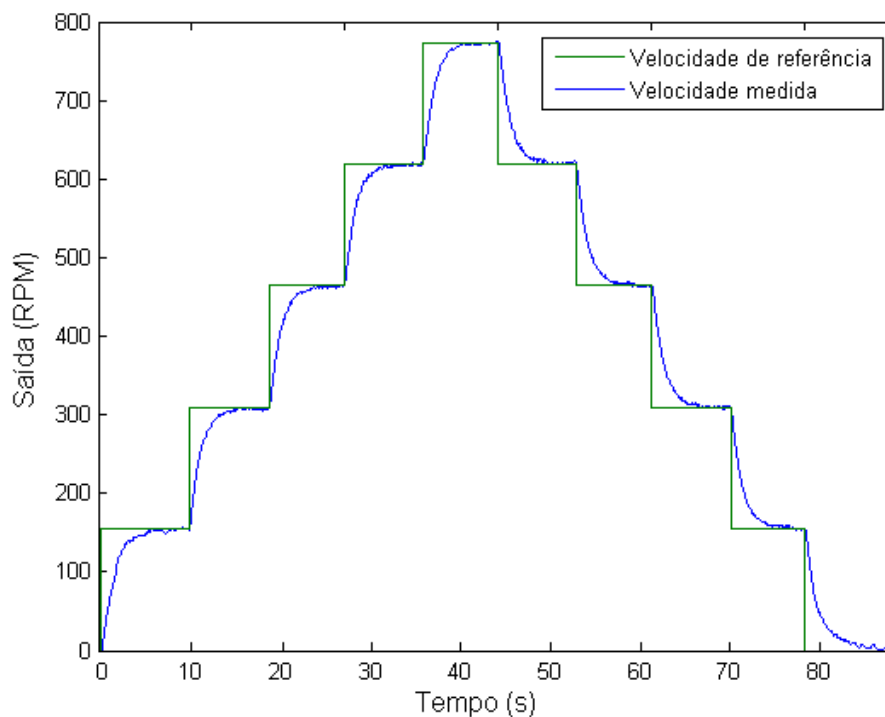
Porém, notou-se que utilizando os ganhos obtidos através da ferramenta *Sisotool* o sistema apresentou um máximo sobressinal elevado quando parte em repouso. Em visto disso, foi realizado ajustes nos ganhos uma vez que métodos tradicionais de sintonia podem não fornecer ganhos que satisfazem toda faixa de operação do sistema. Assim, foram obtidos os ganhos a seguir:

$$K_p = 0,2689 \quad (49)$$

$$T_i = 2,6016 \quad (50)$$



A Figura 39 ilustra os resultados obtidos considerando os ganhos das Equações 49 e 50.



**Figura 39 - Resultado obtido**  
**Fonte: Autoria própria**

Nota-se através da Figura 39 que a estratégia de controle aplicado no controle de velocidade apresentou resultado satisfatório operando de uma dinâmica aceitável, visto que o sistema atingiu a velocidade referência tanto nos degraus de aceleração quanto nos degraus de desaceleração. Evidenciando assim, a funcionalidade da bancada.

## 4 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta um método alternativo do estudo de energias renováveis e técnicas de controle, através da utilização de modelos matemáticos que descrevem a dinâmica de uma turbina eólica e controla um motor CC afim de emular seu comportamento.

Demonstrou-se ser um método de aprendizado diferente dos métodos tradicionais, pois tem um caráter interdisciplinar e extremamente prático, o qual não foi observado durante a graduação. Além de ser um método de baixo custo ao se utilizar de ambientes virtuais para simular equipamentos reais encontrados na indústria.

Através do trabalho realizado foi possível adquirir conhecimentos sobre sistemas de emulação de turbinas eólicas e sistemas de controle, mais especificamente o controlador PI. Visto que foi necessária uma revisão da literatura para conhecer o modelo matemático que descreve a dinâmica de uma turbina eólica e implementá-lo em ambiente *Matlab/Simulink*®. Assim como o estudo de técnicas de sintonia do controlador PI, afim de obter os ganhos que controlaram a velocidade de um motor CC e o permitiram operar com uma dinâmica aceitável.

Uma dificuldade apresentada foi o pouco conhecimento adquirido ao longo da graduação sobre sistemas de geração de energia elétrica e métodos de controle devido à ausência de disciplinas na grade do curso.

Pode-se concluir que o trabalho atingiu os objetivos propostos, pois o motor CC ao emular uma turbina eólica operou com uma dinâmica aceitável e atingiu a velocidade angular de referência para todos os degraus de velocidade de vento aplicado, seja crescente ou decrescente o que tornaram os resultados experimentais satisfatórios.

Como trabalhos futuros, substituir as fontes CC por um retificador conectado diretamente a rede elétrica, acoplamento de um gerador elétrico e estudo de outras estratégias de controle.

## REFERÊNCIAS

- AHMED, Ashfaq. **Eletrônica de Potência**. Prentice Hall, 2000.
- BOLTON, W. **Engenharia de Controle**. 1º Edição. Tradução: Valcere Vieira Rocha e Silva. Makron Books. 1995.
- DEL TORO, Vincent. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Ed. única. Rio de Janeiro: LTC, 1999
- F. Rüncos , R. Carlson, A.M.Oliveira , P. Kuo-Peng , N. Sadowski. **Performance Analysis of a brushless Double Fed Cage Induction Generator**. Nord Wind Power Conference, 1-2 March 2004. Chalmers University of Technology.
- FERNANDES, Willian R.; BASTOS, Renan F.; FUZATO, Guilherme H. F.; MACHADO, Ricardo Q. **Torque control of a dc machine for wind turbine emulation**. 2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC). 2015
- FITZGERALD, A. N. Umans, S. F. **Máquinas Elétricas**. 3º Edição. Bookman. New Jersey, 1999.
- FRANKLIN, G. F. Powell J. D. **Sistemas de Controle para Engenharia**. 5º Edição. Pearson Education. Upper Saddle River, NJ. 2006.
- FREIRE JR, Vlademir A; VARGAS, Alessandro Nascimento; GOEDEL, Alessandro. **UMA ABORDAGEM PI-NEURAL APLICADO AO CONTROLE DE UM SERVO-MECANISMO**. 2013. Disponível em: < <http://www.sbai2013.ufc.br/pdfs/3963.pdf>>. Acesso em: 31 mai. 2017.
- GRANZA, Marcelo Henrique. **Implementação do controle de torque de um motor de indução trifásico como sistema emulador eólico**. 2011. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2011.
- GUIMARÃES, Angela Cristina S L; CARVALHO NETO, Pedro Bezerra de. A. **Geração Eólica e os Desafios para a Operação do Sistema Elétrico Brasileiro**. São Paulo, 2008.
- HEIER, S. **Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems**. John Wiley & Sons Ltd, 1998.
- JESS. **Wind Turbine Power Calculations**. The Royal Academy of Engineering Engineering Diploma.

Ministério de Minas e Energia. **Energia Eólica no Brasil e Mundo Ano de referência – 2015**. Edição de 02/08/2016.

MOREIRA, Vítor Trannin Vinholi; VOLTOLINI, Hélio; GRANZA, Marcelo Henrique. **Implementação do modelo de uma turbina eólica baseado no controle de torque do motor cc utilizando ambiente matlab/simulink via arduino**. 2012. Disponível em: < [http://www.aeapg.org.br/8eetcg/anais/60091\\_vf1.pdf](http://www.aeapg.org.br/8eetcg/anais/60091_vf1.pdf)>. Acesso em: 31 mai. 2016.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 3ª Edição. Prentice Hall. New Jersey. 1997.

PETRY, Clóvis Antônio. **Introdução aos Conversores CC-CC**. Instituto de Eletrônica de Potência. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.

ROCHA, Rafael Vieira. **Simulação de aerogerador em uma bancada experimental**. 2008. 66 f. Dissertação (Mestre) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

SLOOTWEG, J.G., POLINDER, H., KLING, W.L.; **Dynamic modelling of a wind turbine with doubly fed induction generator**. IEE Power Engineering Society Summer Meeting, S1, 2001, p. 644-649.

VOLTOLINI, Hélio; GRANZA, Marcelo Henrique; IVANQUI, Josmar; CARLSON, Renato. **Modeling And Simulation Of The Wind Turbine Emulator Using Induction Motor Driven By Torque Control Inverter**. 2012. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/anais/induscon/2012/Data/iREP1873.pdf>>. Acesso em: 31 mai. 2016.

VOLTOLINI, Hélio; GRANZA, Marcelo Henrique. **Modelagem e Simulação de um Sistema Eólico Considerando a Dinâmica da Turbina e Multiplicador de Velocidade**. 2012. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/anais/induscon/2012/Data/iREP1872.pdf>>. Acesso em: 31 mai. 2016.

VOLTOLINI, Hélio; GRANZA, Marcelo Henrique; IVANQUI, Josmar; CARLSON, Renato. **Wind Power Generation Control System with Squirrel Cage Induction Generator**. 2012. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/anais/induscon/2012/Data/iREP1872.pdf>>. Acesso em: 31 mai. 2016.