



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**MODELAGEM DE UMA TURBINA EÓLICA EM ESCALA
REDUZIDA E CONTROLE DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO
VIA PLANICIDADE DIFERENCIAL.**

Raffael de Queiroz Almeida

Brasília, Maio de 2016

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**MODELAGEM DE UMA TURBINA EÓLICA EM ESCALA
REDUZIDA E CONTROLE DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO
VIA PLANICIDADE DIFERENCIAL.**

Raffael de Queiroz Almeida

*Dissertação submetida ao Departamento de Engenharia Mecânica
da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre Engenheiro em Sistemas Mecatrônicos.*

Banca Examinadora

Prof. Dr. Eugênio L. F. Fortaleza, ENM/UnB

Orientador

Prof. Dr. Guilherme Caribé de Carvalho, Departa-
mento/Universidade

Examinador interno

Prof. Dr. Marcus Vinícius Girão de Moraes , Depar-
tamento/Universidade

Examinador externo

FICHA CATALOGRÁFICA

ALMEIDA QUEIROZ, RAFFAEL
MODELAGEM DE UMA TURBINA EÓLICA EM ESCALA REDUZIDA E CONTROLE DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO VIA PLANICIDADE DIFERENCIAL.

[Distrito Federal] 2016.

xii, 106., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Sistemas Mecatrônicos, 2016).

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

- | | |
|--------------------------------------|--------------------|
| 1. Sistemas Diferencialmente Planos | 2. Turbina Eólica |
| 3. Controle da Velocidade de Rotação | 4. PID |
| I. ENM/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALMEIDA, R.Q. (2016). MODELAGEM DE UMA TURBINA EÓLICA EM ESCALA REDUZIDA E CONTROLE DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO VIA PLANICIDADE DIFERENCIAL., Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM.DM-100/16, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 106.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Raffael de Queiroz Almeida

TÍTULO: MODELAGEM DE UMA TURBINA EÓLICA EM ESCALA REDUZIDA E CONTROLE DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO VIA PLANICIDADE DIFERENCIAL..

GRAU: Mestre ANO: 2016

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse trabalho de conclusão de curso pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Raffael de Queiroz Almeida

Endereço

Bairro

CEP XXXX-XXX - Brasília - DF - Brasil

Dedicatória

Ao meu querido e falecido irmão Bruno de Queiroz Almeida.

Raffael de Queiroz Almeida

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por ter me dado a oportunidade de aprendizado e crescimento pessoal, pois sem ele e sem o apoio dessa força maior em minha vida jamais teria conseguido.

Quero também dedicar e agradecer aos meu pai e minha mãe que foram essenciais nessa trajetória de luta, por sempre me apoiarem e acreditarem em mim apesar de haver momentos em que até eu duvidasse do meu potencial. Eles são os principais responsáveis por todo o desenvolvimento deste trabalho e espero que se orgulhem do trabalho desenvolvido.

Agradecer a minha linda Mainne Elesbão que sempre esteve comigo em todos os momentos e dificuldades, ela soube todas as minhas dificuldades e receios e sempre me ajudou e acreditou em mim, me proporcionou vários momentos de distração, muita felicidade e companheirismo. Sou muito grato a Deus por ter colocado uma companheira tão especial na minha vida.

Agora não posso deixar de comentar dos meus orientadores, primeiramente a professora Maria Del Pilar por ter me alocado ao programa junto ao professor Eugenio Fortaleza. O Eugênio não foi só um orientador técnico, mas por diversas vezes me deu conselhos quando queria desistir e acreditou em mim acima de tudo. Também gostaria de agradecer em especial ao meu co-orientador o aluno de doutorado José Oniram Limaverde que acima de tudo se tornou um grande amigo e sacrificou muitas tardes e manhãs para me ajudar e a solucionar alguns vários problemas, vou ser eternamente grato a ele e ao Eugênio por terem tido bastante paciência comigo.

Os alunos Bruno Suehara e Luiz Albuquerque que foram pessoas iluminadas que Deus colocou no meu caminho, formamos uma amizade bem sólida, e estes foram responsáveis por passar juntamente a mim a maior parte das aflições e dúvidas desta fase do mestrado. A todos os companheiros e amigos do bloco G, Francisco na portaria, o técnico Felipe, Rafael, Maria Nela, Hamsei, Fábio, Aramis e todos os outros mais. Agradecer pelas incontáveis companhias no almoço e ajudas principalmente por parte do Rafael e da Maria Nela no aprendizado de como manusear a turbina e no processo de entendimento do Arduíno.

Foram muitas pessoas envolvidas neste processo e também foram várias amizades desenvolvidas neste período, provavelmente não citei todos que participaram, mas quem estava junto a mim sabe e vou ser sempre grato a todos por toda a ajuda e estou muito feliz por esta conquista.

Raffael de Queiroz Almeida

RESUMO

O desenvolvimento e o crescimento na demanda por energia eólica fazem com que se desenvolvam cada vez mais pesquisas na área de otimização de potência de produção de turbinas eólicas. O presente trabalho mostra a estratégia de modelagem e controle para solucionar a imprecisão nas curvas de potência, causada por um problema de stall em turbinas operando em baixas rotações. A dissertação tem por objetivo fazer a modelagem dinâmica de uma turbina eólica em escala reduzida que está localizada dentro de um túnel de vento, utilizando a variação de uma resistência externa como sinal de entrada para funcionar como um freio eletrônico, além de realizar testes para a validação do modelo proposto. O problema de stall causa um salto em uma determinada zona de pontos de operação causando uma instabilidade no sistema, logo foi aplicado o método de linearização tangente para a correta identificação da zona de instabilidade do sistema e posteriormente foram aplicados no sistema um controlador PID e um controlador por planicidade diferencial. Os testes experimentais realizados com os controladores foram capazes de estabilizar a velocidade de rotação do sistema na zona de instabilidade, provando assim a eficácia da estratégia proposta para o freio eletrônico e assim comprovando que o presente estudo pode ser usado como uma referência na área de controle da velocidade de rotação de turbinas eólicas.

Palavras Chaves: Energia Eólica, Turbinas Eólicas, Curvas de Potência, Stall, Resistência Externa, Freio Eletrônico, Pontos de Operação, Velocidade de Rotação, Linearização Tangente, Zona de Instabilidade, Controlador, PID e Flatness.

ABSTRACT

The development and growth in demand for wind energy keeps active research on the power optimization of production area of wind turbines. This work presents the modeling and control strategy to solve the instabilities in the power curves, caused by a stall problem in turbines operating at low speeds. The dissertation aims to make the dynamic modeling of a wind turbine on a reduced scale set up that is located inside a wind tunnel using the variation of an external resistor as an input signal to operate as an electronic brake, and perform tests for validation of the proposed model. The stall problem causes a jump in a certain area of operation points causing system instability, it was applied the method of linearization tangent to the correct identification of system instability zone and later applied to the system with a PID controller and a Flatness controller. The experimental tests performed with the controllers were able to stabilize the system the rotational speed of the unstable area, thus proving the effectiveness of the proposed strategy for the electronic brake and thus confirming that this study could be used as a reference in the control area the rotation speed of wind turbines.

Keywords: Wind Energy, Wind Turbine, Power Curve, Stall, External Resistor, Electronic Brake, Operation Point, Angular speed, Tangent Linearization, Unstable Zone, Controller, PID and Flatness.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2	EVOLUÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE TURBINAS NA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA	1
1.3	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	3
1.4	OBJETIVO GERAL	3
1.5	DESCRIÇÃO DO MANUSCRITO	4
2	REVISÃO SOBRE TURBINAS E IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS	5
2.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.2	TIPOS DE TURBINAS EÓLICAS	7
2.3	PARTES COMPONENTES DE TURBINAS EÓLICAS	9
2.4	TIPOS DE GERADORES	11
2.5	ABORDAGEM DE CONTROLE EM TURBINAS EÓLICAS	12
2.5.1	CONTROLE DE TURBINAS EÓLICAS	12
2.5.2	CONTROLE OU ESTOL	14
2.5.3	CONTROLE DE PASSO	15
2.6	ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS	15
3	MODELAGEM E SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DA TURBINA EÓLICA EM ESCALA REDUZIDA	19
3.1	MODELAGEM DA TURBINA EÓLICA EM ESCALA REDUZIDA	19
3.1.1	MODELAGEM AERODINÂMICA	19
3.1.2	MODELAGEM ELÉTRICA	22
3.1.3	MODELAGEM MECÂNICA	24
3.2	SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DA TURBINA	25
3.2.1	SIMULAÇÃO DA CURVA DE POTÊNCIA	25
3.2.2	OBTENÇÃO DO POLINÔMIO APROXIMADO DA CURVA DE POTÊNCIA PELO MÉTODO DE MÍNIMOS QUADRADOS	29
3.2.3	SIMULAÇÃO DO MODELO DA TURBINA	32
3.3	ANÁLISE DE ESTABILIDADE	35
3.3.1	APLICAÇÃO DE MÉTODO LINEARIZADO TANGENTE	35
4	DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR PID PARA A TUR-	

BINA EÓLICA	40
4.1 LEI DE CONTROLE PID	40
4.1.1 CONTROLE PROPORCIONAL.....	41
4.1.2 CONTROLE INTEGRAL.....	41
4.1.3 CONTROLE DERIVATIVO	41
4.1.4 REGRAS DE SINTONIA PARA CONTROLADORES PID.....	42
4.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO CONTROLADOR PID	45
4.3 APLICAÇÃO DO CONTROLE PID NO SISTEMA EÓLICO	50
4.3.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO CONTROLADOR PID	52
5 CONTROLE DE TRAJETÓRIA POR PLANICIDADE DIFERENCIAL	56
5.1 CONTROLE VIA PLANICIDADE DIFERENCIAL	56
5.1.1 SAÍDAS PLANAS	57
5.1.2 PROPRIEDADES DE SISTEMAS DIFERENCIALMENTE PLANOS	58
5.1.3 PROCESSO PLANEJAMENTO DE TRAJETÓRIA PARA O SISTEMA REAL	59
5.2 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS PARA O CONTROLADOR VIA PLANICIDADE DIFERENCIAL	61
5.3 APLICAÇÃO DO CONTROLE VIA PLANICIDADE DIFERENCIAL NO SISTEMA EÓLICO	66
5.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO CONTROLADOR VIA PLANICIDADE DIFERENCIAL	67
6 CONCLUSÕES	72
6.1 TRABALHOS FUTUROS.....	72
6.2 PUBLICAÇÕES	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
Anexos.....	78
I Anexo 01	79
II Anexo 02	85

LISTA DE FIGURAS

1.1	Foto da turbina hidrocínética.....	2
1.2	Turbina eólica em escala reduzida localizada dentro do túnel de vento.....	2
2.1	Turbina eólica de eixo horizontal.	7
2.2	Turbina eólica de eixo vertical.....	8
2.3	Componentes de uma Turbina eólica de eixo horizontal e vertical.....	11
2.4	Configuração de um disco rotor em turbina eólica.	13
2.5	Representação das partes de uma turbina eólica de duas massas.	14
2.6	Circuito utilizado para a identificação dos parâmetros da turbina eólica.	16
2.7	Método para a estimação do momento de inércia.	18
3.1	Diagrama para modelagem dividida em três subsistemas.	19
3.2	Variação de massa e da velocidade através da área de varredura das pás de uma turbina.....	20
3.3	Coeficiente de potência em função de taxa de velocidade de ponta de pá.	22
3.4	Estrutura básica de um motor de corrente contínua de ímã permanente.....	22
3.5	Modelo de uma máquina de corrente contínua de ímã permanente.....	23
3.6	Representação do modelo mecânico para turbina eólica de uma massa.	24
3.7	Diagrama típico da curva de potência de uma turbina em relação ao desempenho da turbina.	25
3.8	Curva de potência do sistema real 8 m/s.....	28
3.9	Curva de potência do sistema real 10 m/s.	28
3.10	Polinômio aproximado por mínimos quadrados para 8 m/s.	31
3.11	Polinômio aproximado por mínimos quadrados para 10 m/s.....	32
3.12	Demonstração da aproximação da reta tangente a curva $y = x^2$	35
3.13	Função de transferência do sistema em função dos pares de pontos de equilíbrio para parte do denominador, Termo A e Termo B.....	39
4.1	Curva de resposta ao degrau unitário mostrando um valor máximo de ultrapassagem.	43
4.2	Curva de resposta em forma de S.	43
4.3	Oscilação mantida com P_{cr}	44
4.4	Estrutura da simulação numérica do controlador PID no Simulink.	46
4.5	Comportamento do controlador PID variando no tempo para o ponto de operação de 30 rad/s para 8 m/s.....	47

4.6	Comportamento do controlador PID variando no tempo para o ponto de operação de 70 rad/s para 8 m/s.....	47
4.7	Comportamento do controlador PID variando no tempo para o ponto de operação de 110 rad/s para 8 m/s.	48
4.8	Comportamento do controlador PID variando no tempo para o ponto de operação de 30 rad/s para 10 m/s.	49
4.9	Comportamento do controlador PID variando no tempo para o ponto de operação de 70 rad/s para 10 m/s.	49
4.10	Comportamento do controlador PID variando no tempo para o ponto de operação de 110 rad/s para 10 m/s.....	50
4.11	Pulso de onda quadrado do PWM relacionado a carga média.	51
4.12	Configuração do circuito de controle com a utilização do transistor e da onda PWM.	51
4.13	Comportamento do controlador PID no sistema real variando no tempo, para o ponto de operação de 30 rad/s para 8 m/s.....	52
4.14	Comportamento do controlador PID no sistema real variando no tempo, para o ponto de operação de 70 rad/s para 8 m/s.....	53
4.15	Comportamento do controlador PID no sistema real variando no tempo, para o ponto de operação de 110 rad/s para 8 m/s.	53
4.16	Comportamento do controlador PID no sistema real variando no tempo, para o ponto de operação de 30 rad/s para 10 m/s.	54
4.17	Comportamento do controlador PID no sistema real variando no tempo, para o ponto de operação de 70 rad/s para 10 m/s.	54
4.18	Comportamento do controlador PID no sistema real variando no tempo, para o ponto de operação de 110 rad/s para 10 m/s.....	55
5.1	Estrutura do controlador via planicidade diferencial no Simulink.....	62
5.2	Comportamento do controlador via planicidade diferencial variando no tempo, para o ponto de operação de 30 rad/s para 8 m/s.	63
5.3	Comportamento do controlador via planicidade diferencial variando no tempo, para o ponto de operação de 70 rad/s para 8 m/s.	63
5.4	Comportamento do controlador via planicidade diferencial variando no tempo, para o ponto de operação de 110 rad/s para 8 m/s.....	64
5.5	Comportamento do controlador via planicidade diferencial variando no tempo, para o ponto de operação de 30 rad/s para 10 m/s.....	64
5.6	Comportamento do controlador via planicidade diferencial variando no tempo, para o ponto de operação de 70 rad/s para 10 m/s.....	65
5.7	Comportamento do controlador via planicidade diferencial variando no tempo, para o ponto de operação de 110 rad/s para 10 m/s.	65
5.8	Circuito adaptado com as resistências externas para a aplicação da planicidade diferencial.	66
5.9	Comportamento do controlador via planicidade diferencial no sistema real variando no tempo, para o ponto de operação de 30 rad/s para 8 m/s.	68

5.10	Comportamento do controlador via planicidade diferencial no sistema real variando no tempo, para o ponto de operação de 70 rad/s para 8 m/s.	69
5.11	Comportamento do controlador via planicidade diferencial no sistema real variando no tempo, para o ponto de operação de 110 rad/s para 8 m/s.	69
5.12	Comportamento do controlador via planicidade diferencial no sistema real variando no tempo, para o ponto de operação de 30 rad/s para 10 m/s.	70
5.13	Comportamento do controlador via planicidade diferencial no sistema real variando no tempo, para o ponto de operação de 70 rad/s para 10 m/s.	70
5.14	Comportamento do controlador via planicidade diferencial no sistema real variando no tempo, para o ponto de operação de 110 rad/s para 10 m/s.	71

LISTA DE TABELAS

3.1	Parâmetros da turbina eólica.	27
3.2	Coefficientes da turbina eólica para 8 m/s.	31
3.3	Coefficientes da turbina eólica para 10 m/s.	32
3.4	Parâmetros da turbina eólica.	35
4.1	Regras de sintonia baseada na resposta em degrau.	44
4.2	Regras de sintonia baseada no ganho crítico K_{cr} e no período crítico P_{cr}	45
4.3	Valores dos ganhos K_p e T_i utilizados para a simulação numérica do sistema.	46
5.1	Valores dos ganhos k_1 , k_0 e k_i utilizados no sistema real.	68

LISTA DE SÍMBOLOS

Gerais

A	Área de varredura do rotor
r	Raio da pá
K_m	Constante eletromotriz
V_a	Tensão de armadura
R_a	Resistência interna de armadura
R_e	Resistência externa
R_{eq}	Resistência equivalente
R_{max}	Resistência máxima
R_{min}	Resistência mínima
I_a	Corrente de armadura
L_a	Indutância de armadura
ω	Velocidade de rotação
J	Momento de inércia do motor
F	Força
B	Atrito viscoso
ρ_{ar}	Densidade do ar
ΔP	Diferencial de pressão
Δm	Diferencial de massa
P_{abs}	Pressão absoluta
M_m	Massa molar
T	Temperatura
KR	Constante de gás ideal
V_v	Velocidade do vento
c_p	Coefficiente de potência
P_m	Potência mecânica
λ	Taxa de velocidade d ponta de pá
β	Angulo de passo
T_e	Torque elétrico
P_v	Potência do vento
T_a	Torque aerodinâmico
d	Distância
C_g	Valor médio da célula de carga
g	Gravidade

Gerais

$a_0 \dots a_5$	Coefficientes de aproximação
$c_0 \dots c_5$	Constantes de aproximação
x_1	Velocidade de rotação
x_2	Corrente
K_p	Ganho proporcional
T_i	Tempo integral
T_d	Tempo derivativo
K_{cr}	Ganho crítico
P_{cr}	Período Crítico
L	Constante de retardo
T	Constante de tempo
e	Erro
ν	Termo de correção
k_1	Ganho derivativo
k_0	Ganho
k_i	Ganho integral

Siglas

<i>PID</i>	Proporcional Integral Derivativo
<i>LQ</i>	Linear Quadrático
<i>LQG</i>	Linear Quadrático Gaussiano
<i>PWM</i>	Modulação por Largura de Pulso
<i>AC</i>	Corrente Alternada
<i>DC</i>	Corrente Contínua

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A produção eólica vêm crescendo aceleradamente, devido a grandes avanços na tecnologia aplicada no desenvolvimento das turbinas. Desde a década de 1980, avanços aerodinâmicos e estruturais vêm fazendo com que a produção de energia elétrica, proveniente da eólica, cresça em torno de 5 % ao ano, número esse bastante significativo para o mercado energético [1].

O controle de sistemas eletromecânicos é um campo crescente na indústria, principalmente na área de processos para melhoria de aquisição energética renovável. Mas nem sempre foi assim, tudo começou com a otimização de processos mecânicos e outros sistemas usados em processos de fabricação entre o século dezoito e os anos de 1940. Houve uma melhora gradual durante este período em relação ao corte de metal que mudou de uma arte para uma ciência, em particular isso aumentou o entendimento dos materiais utilizados no corte de metais [2].

O avanço do mercado eólico tem acelerado também o crescimento da utilização da energia hidrocínética, tendo em vista que o funcionamento dessa fonte pode ser explicado pelos mesmos princípios aerodinâmicos da energia eólica. Entre as energias renováveis, a eólica é umas das tecnologias mais recentes e que vêm apresentando um dos maiores fatores de crescimento [3].

1.2 Evolução da utilização de turbinas na Universidade de Brasília

No ano de 1986 iniciou-se o estudo do primeiro projeto hidrocínético da Universidade de Brasília (UnB), para a construção de uma turbina hidrocínética, projeto realizado pelo Departamento de Engenharia Mecânica. O projeto tinha como principal objetivo construir uma máquina capaz de gerar energia utilizando o potencial da corrente do rio, para manter o posto médico e uma residência em uma comunidade próxima à cidade de Correntina localizada no estado da Bahia, Brasil.

Após estudos, alguns aprimoramentos na geração foram realizados. Foram instalados: Um

estator na entrada da turbina, com o intuito de direcionar o fluxo do rio diretamente ao rotor, melhorando assim a eficiência da conversão hidráulica como demonstra a Figura 1.1 retirada de Mendes(2016) [4].



Figura 1.1: Foto da turbina hidrocínética.

Posteriormente em parceria com a ELETRONORTE foram criados grupos de trabalho na Universidade de Brasília para a evolução nas pesquisas relacionadas a otimização da produção de energia de turbinas.

A turbina eólica utilizada nesta dissertação, é uma turbina de eixo horizontal em escala reduzida com pás fixas. Esta possui uma hélice de três pás e ângulo de passo fixo, ele está interligado a um motor de corrente contínua (ímã permanente) que funciona como gerador. O sistema é caracterizado como um gerador eólico de uma massa e localiza-se dentro de um túnel de vento que possibilita trabalhar diferentes ensaios a uma velocidade de vento constante, a turbina é mostrada pela Figura 1.2

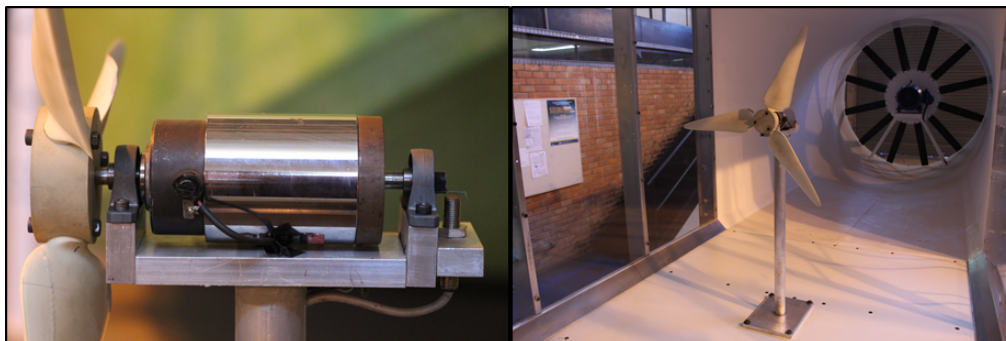


Figura 1.2: Turbina eólica em escala reduzida localizada dentro do túnel de vento.

Com o tempo as pesquisas foram evoluindo no Departamento de Engenharia mecânica da Universidade de Brasília e foram se estendendo para as áreas de de otimização da aerodinâmicas das pás de turbinas eólicas e foi implementado um túnel de vento, conforme mostrado acima o projeto Tucunará desenvolvido pela ELETRONORTE, para o ensaio de diferentes tipos de turbinas eólicas com o fim de maximizar o coeficiente de potência e a produção de energia.

1.3 Definição do problema

As turbinas eólicas são conhecidas por possuírem um problema de stall em baixas rotações. O que produz uma súbita queda no torque produzido e torna instável o sistema em um certo intervalo de pontos de operação (velocidades de rotação que não podem ser obtidas em regime permanente com o sistema em malha aberta).

A curva de potência extraída do sistema, baseia-se principalmente na variação do ângulo da pá e da relação de velocidade que é dependente da velocidade de rotação. Logo a zona de instabilidade do sistema provoca imprecisão em processos de otimização de curvas de potência de turbinas eólicas.

A utilização de freios mecânicos (com torques constantes) não conseguem estabilizar a rotação da turbina na faixa instável da velocidade de rotação do sistema. Logo, se faz necessária a utilização de outros tipos de freios em malha fechada nesta faixa em questão para o controle da velocidade de rotação.

Controle de turbina eólica tem provado ser um desafio, porque a potência fornecida ao sistema pela captura do vento é difícil de mensurar e esta possui uma propriedade aerodinâmica não-linear, que é uma função do razão de velocidade. Para entender a natureza do desafio do problema, o ponto de funcionamento ideal nem sempre é comum entre as máquinas similares que operam sob as mesmas condições. A otimização da eficiência de captura de energia em uma turbina eólica torna-se não só um problema de rastreamento de trajetória do sistema não-linear, mas também estimação.

1.4 Objetivo Geral

O objetivo principal dessa dissertação é modelar um sistema eólico em escala reduzida e desenvolver sistemas de controle da velocidade de rotação para a otimização da curva de potência do sistema, utilizando como variável de entrada uma resistência externa como freio eletrônico para a turbina.

Para se atingir o objetivo geral, e necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

1. Observar os métodos de modelagem matemática existentes na literatura para turbinas eólicas;
2. Adaptar o modelo para a turbina eólica em escala reduzida;

3. Validar o modelagem da turbina através de simulações e comparar com o sistema real;
4. Aplicar uma linearização tangente no modelo para identificação da zona de instabilidade do sistema;
5. Desenvolver um controlador PID para o controle da velocidade de rotação, para que esta seja uma solução para frear o sistema na zona de instabilidade e avaliar o desempenho no sistema real;
6. Avaliar a abordagem de controle por planicidade diferencial como um potencial método de controle da velocidade de rotação em turbinas eólicas, visando a minimização do erro de acompanhamento de trajetória;
7. Otimizar a curva de potência do sistema com os dados obtidos pelos diferentes controladores;

1.5 Descrição do Manuscrito

No Capítulo 2, é realizada uma abordagem geral sobre turbinas eólicas, quanto aos tipos de turbinas, partes componentes e principais estratégias de controle utilizadas nesses sistemas. Posteriormente aborda-se a descrição dos métodos para a estimação dos parâmetros da turbina utilizada, visando demonstrar como foi adquirido cada parâmetro e demonstrando o circuito confeccionado para a coleta de dados do sistema.

No Capítulo 3, inicialmente é apresentada a turbina eólica utilizada e posteriormente e abordada as estratégias para a modelagem do sistema utilizando os referenciais teóricos obtidos.

No Capítulo 4, é abordado todo o referencial teórico para a aplicação do método de controle PID, apresentando as regras de sintonia e estratégias para a aplicação na turbina. Também é apresentado a simulação numérica da aplicação do controlador no modelo da turbina eólica e os resultados. Por fim é apresentado a estratégia para a aplicação experimental do controlador PID no sistema real e os respectivos resultados dos experimentos do controlador.

No Capítulo 5, é introduzido com o referencial teórico sobre a teoria da planicidade diferencial e propriedades de sistemas diferencialmente planos. Posteriormente foi apresentado o processo de planejamento de trajetória e as simulações numéricas do controlador com os respectivos resultados. Foi também apresentado a estratégia para a aplicação experimental do controlador por planicidade diferencial no sistema eólico real e demonstrado os resultados em seguida.

As conclusões e apresentações de trabalhos futuros estão representados no Capítulo 6, assim como a publicações que esta dissertação gerou.

Capítulo 2

REVISÃO SOBRE TURBINAS E IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS

2.1 Revisão bibliográfica

Os modelos em turbinas eólicas normalmente concentram-se nos detalhes de subsistemas ou aspectos de uma turbina, onde há o interesse em usar representações simplistas de outros subsistemas. Em particular, os modeladores aerodinâmicos de turbinas eólicas tendem a simplificar os sistemas elétricos de uma turbina, da mesma forma, os modeladores elétricos ignoram ou simplificam a aerodinâmica da turbina. Estas abordagens podem levar a modelos imprecisos e irrealistas. Por exemplo, as pulsações de torque causadas pelo efeito sombra da torre observada em turbinas a favor do vento pode afetar sistemas elétricos, mas a maioria dos modelos elétricos não conta para este efeito [5].

Segundo Melicio [6], o sistema dinâmico surge a partir da modelagem dinâmica do comportamento devido aos principais subsistemas do sistema eólico: A turbina de velocidade de vento variável ou não variável, o trem de acionamento mecânico e os conversores eletrônicos de potência. O modelo do sistema mecânico pode ser definido em função de um sistema de uma massa, duas massas ou três massas. Os conversores eletrônicos de potência são modelados por três topologias diferentes, respectivamente, de dois níveis, a vários níveis ou conversores de matriz. Contextos possíveis de anomalias são uma contribuição adicional para os estudos sobre: o controle do ângulo de inclinação das pás da turbina, mau funcionamento caracterizado pela momentaneidade imposta pela rajada de vento nas pás e o controle de potência por conversores eletrônicos.

As turbinas de vento inerentemente apresentam dinâmica não-linear e estão expostos a grandes perturbações cíclicas que podem excitar os modos de vibração mal amortecidos do trem de acionamento e torre [7]. Além disso, é difícil a obtenção de modelos matemáticos que descrevem com precisão o comportamento dinâmico de turbinas eólicas por causa das condições de funcionamento particulares. Esta tarefa é ainda mais complicada devido à tendência atual para turbinas eólicas

maiores e mais flexíveis. A falta de modelos precisos deve ser contornada através de estratégias de controle robustas, capazes de assegurar a estabilidade e certas características de desempenho, apesar das incertezas do modelo. Os problemas de controle são ainda mais desafiador quando as turbinas são capazes de operar em velocidades variáveis e passo [8].

A maioria dos trabalhos no controle de conversão de energia de sistemas em sistemas eólicos visam a otimização do potencial aerodinâmico extraído numa área parcial de carga. Para este propósito, controladores clássicos vem sendo usados extensivamente, particularmente o regulador Proporcional Integral e controles otimizados como Linear Quadrático e Linear Quadrático Gaussiano [9].

Uma nova estratégia de controle para velocidade variável, Variação do ângulo de ataque para Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal é proposta por [10]. Este controle é obtido com uma estratégia dinâmica não-linear de controle de torque e uma estratégia PI controle proporcional integral para o ângulo de ataque da lamina. Esta nova estrutura de controle permite uma rápida transição da potência gerada da turbina eólica entre os valores desejados diferentes. Isto implica que é possível aumentar ou diminuir a produção de energia da turbina eólica com consumo de energia na rede. Este rastreamento de energia elétrica é assegurada com comportamentos de alto desempenho para todas as outras variáveis de estado: incluindo turbina e gerador de velocidades de rotação e evolução suave e adequada das variáveis de controle [10].

Em uma outra abordagem de controle, Hawkins [11] utilizou o método de Lyapunov, com o objetivo de maximizar a captura de energia, considerando o vento variando no tempo. Este tipo de abordagem irá controlar o passo da lâmina e velocidade do eixo de uma turbina eólica em grande escala, de modo que a turbina vai funcionar muito perto do pico de captura de potência. O controlador tem duas funções: A primeira é o circuito interno que proporciona regulação da velocidade angular do eixo da turbina para um determinado ponto definido em conjunto com a estimativa do vento produzido um torque aerodinâmico. O segundo é o circuito externo que fornece o regulador com um ponto de ajuste de trajetória para a taxa de velocidade de ponta e ângulo de passo da lâmina para melhorar a captação de energia do rotor. Alterações de parâmetros do sistema e velocidade do vento variável no tempo estão presentes no caso prático de sistemas de captação de energia. O método baseado em Lyapunov visa assegurar a convergência da energia captada para uma região perto o seu valor ótimo, na presença de um vento variando no tempo e erros de medição [11].

De acordo com Aldwaihi [12], uma abordagem de controle chamado controle por planicidade também pode se apresentar como uma solução para turbinas eólicas. Esta abordagem permite minimizar as perdas do cobre do gerador assíncrono de ímã permanente e em adição controlar para o máximo de potência por um método simples, baseada no planejamento de trajetória. Em particular, o controle da corrente direta e da velocidade angular mecânica do rotor será aplicada aos valores desejados que conduzem a perdas no cobre ao mínimo e obter à potência máxima gerada pela turbina eólica.

Planicidade diferencial foi discutido, em outros trabalhos de pesquisa, por exemplo, uma metodologia para analisar a robustez com relação a perturbações exógenas para linearização exata com

base na planicidade diferencial, o controle moderno de acionamentos elétricos, controle orientada tensão de um retificador trifásico PWM, controle de um eixo linear de alta velocidade impulsionado por atuadores pneumáticos musculares, potência reativa e DC de controle de monitoramento de tensão de um conversor de fonte de tensão trifásica e controle atual de três fase de impulso conversores de três fios [12].

A planicidade diferencial também vem se demonstrando vantajosa em problemas de estimação de estados de sistemas não-lineares. Lévine [13] afirma, que tal propriedade garante a existência de um sistema linear equivalente na forma canônica de Brunovsky com as variáveis de estado sendo as próprias saídas planas do sistema original. Seguindo esse raciocínio, Rigatos [14] propõe que o filtro de Kalman seja aplicado diretamente ao sistema equivalente a fim de estimar as saídas planas do sistema, as quais permitem a construção das variáveis de estados do sistema original [13].

2.2 Tipos de Turbinas eólicas

Basicamente existem dois tipos principais de turbinas eólicas:

Turbinas de eixo horizontal:As turbinas de eixo horizontal (aerogeradores convencionais) Figura 2.1, são predominantemente movidos por forças de sustentação e devem possuir mecanismos capazes de permitir que o círculo formado pelo movimento de rotação das pás esteja sempre numa posição perpendicular ao vento (estes mecanismos podem ser tão simples como um vulgar catavento). Este tipo de turbinas podem ser constituídas por um conjunto de duas ou três pás rígidas, que podem assumir variadas formas e ser construídas a partir dos mais diversos materiais, sendo os mais utilizados os alumínio, a fibra de vidro reforçada e a madeira [15].



Figura 2.1: Turbina eólica de eixo horizontal.

Turbinas de eixo Vertical: Os rotores de eixo vertical Figura 2.2 têm a vantagem de não

precisarem de mecanismos de acompanhamento para as variações da direção do vento. Desta forma, são reduzidos os esforços provocados pelas forças de Coriolis e é atenuada a complexidade do projeto. Os rotores de eixo vertical também podem ser movidos por forças de sustentação (lift) e por forças de arrasto (drag).



Figura 2.2: Turbina eólica de eixo vertical.

Segundo Singh [5], de acordo com diferentes tecnologias de geradores elétricos, as turbinas eólicas podem ser classificadas em quatro tipos diferentes:

- Turbina eólica de passo fixo
- Turbina eólica de erro variável
- Turbina eólica de indução duplamente alimentado
- Turbina eólica de conversor completo

Turbina eólica de passo fixo: São as turbinas eólicas mais básicas da escala de operação. Eles operam com pouca variação na velocidade do rotor da turbina e empregam máquinas de indução de gaiola diretamente conectadas à rede. Suporte externo de potência reativa é necessário para compensar a potência reativa consumida pelo motor de indução. Devido à gama de velocidade limitada, em que estas turbinas podem funcionar, elas são propensas a picos de binário que podem danificar os subsistemas mecânicos dentro de uma turbina e causam transitórios no circuito elétrico. Estas turbinas podem empregar regulação stall, regulação tenda ativo, ou lâmina de regulação passo para regular a potência em altas velocidades de vento. Apesar de ser relativamente

robusto e confiável, há desvantagens significativas dessa tecnologia, ou seja, para que captura de energia do vento seja necessária, a compensação de energia reativa fica abaixo do ideal.

Turbina eólica de passo variável: São projetados para operar em uma ampla gama de velocidades do rotor. Estas turbinas normalmente empregam lâmina do passo para regulação de potência. Controles de velocidade e potência permitem a essas turbinas extraírem mais energia a partir de um determinado regime de vento do que as turbinas de velocidade fixa podem. Turbinas de erro variável empregam máquinas de indução com rotor bobinado que permitem o acesso a ambos ao estator e ao rotor da máquina. O circuito de rotor da máquina está ligada a uma corrente alternada (AC) / (DC) conversor de corrente contínua e uma resistência fixa. O conversor é ligado para controlar a resistência eficaz no circuito do rotor da máquina, para permitir que uma ampla gama de variação de deslizamento (velocidade) operacional. No entanto, a energia é perdida na forma de calor no circuito de resistência no rotor externo. Um controlador pode ser empregado para variar a resistência do rotor externo para uma melhor extração de energia . Compensação de energia reativa ainda é necessária.

Turbina eólica de indução duplamente alimentado: Remediam o problema de perda de potência no circuito do rotor através do emprego de um conversor AC / DC / AC no circuito do rotor para recuperar o erro de potência. Controle do vetores de fluxo de correntes do rotor permite a desacoplamento real e potência de saída reativa, bem como a extração de energia eólica maximizada e baixas tensões mecânicas. Além disso, estas turbinas geralmente empregam o passo da lâmina para regulação de potência. Uma vez que o conversor controla apenas a potência no circuito do rotor, ele não precisa de ser classificado na potência máxima de saída da máquina. As desvantagens desta tecnologia é maior complexidade e custo, logo estes quesitos são compensadas pela capacidade de extrair energia a partir de mais de um dado regime de vento.

Turbina eólica de conversor completo: Um conversor AC / DC / AC é o único caminho de fluxo de potência da turbina eólica à rede. Assim, não há nenhuma ligação direta à rede, e o conversor tem de ser classificado para lidar com toda a potência de saída. Estas turbinas normalmente empregam alta contagem de polo, ímã permanente, geradores síncronos para permitir a operação de baixa velocidade, permitindo assim a eliminação da caixa de velocidades para aumentar a confiabilidade. No entanto, usando geradores de indução também é possível. Além disso, as turbinas de conversor completo podem oferecer independente do controle de potência ativa e reativa, e eles tipicamente empregam o passo da lâmina para regulação de potência. Embora estas turbinas são relativamente caras, o aumento da simplicidade do sistema de controle para essas turbinas são características atrativas, especialmente em instalações offshore onde a manutenção é dispendiosa.

2.3 Partes componentes de turbinas eólicas

Uma turbina eólica é constituída por vários componentes que devem trabalhar em harmonia de forma a proporcionar um maior rendimento final.

Os principais componentes de uma turbina podem ser destacados [16].

Pás: As pás ou hélices são responsáveis pela captura da energia do vento e sua transferência para o eixo da turbina. Os modernos aerogeradores de grande escala possuem pás, cujo diâmetro de sua circunferência varrida varia de aproximadamente 20 m até 120 m. As pás também estão indiretamente relacionadas à relação entre a velocidade do eixo e a taxa de velocidade das turbinas. Turbinas com ponto de operação em baixas velocidades precisam de mais pás e turbinas que operam em alta velocidade possuem no máximo três pás.

Rotor: Estrutura responsável por transformar a energia cinética do vento em energia rotacional no eixo da turbina

Cubo: É responsável pela fixação das pás no rotor (de baixa rotação) da turbina.

Caixa multiplicadora de velocidades: Realiza o acoplamento do rotor de baixa rotação ao rotor do gerador (alta rotação).

Gerador Elétrico: Converte a energia mecânica rotacional em energia elétrica.

Mecanismo de orientação: Mecanismo de ajuste da direção da turbina eólica de acordo com a direção do vento.

Controle eletrônico: Constituído por um controlador eletrônico responsável pelo controle contínuo do gerador elétrico ou de mecanismos, como por exemplo, controle da potência ativa e reativa entregue à rede, ajuste de direção do aerogerador (yaw mechanism) e controle de passo (pitch control).

Sistema Hidráulico: Responsável pelo acionamento do mecanismo de controle de passo e freio mecânico.

Torre: Sustenta o aerogerador na altura onde os ventos possuem melhores condições para o aproveitamento eólico.

As partes componentes de uma turbina eólica podem ser visualizadas na Figura 2.3:

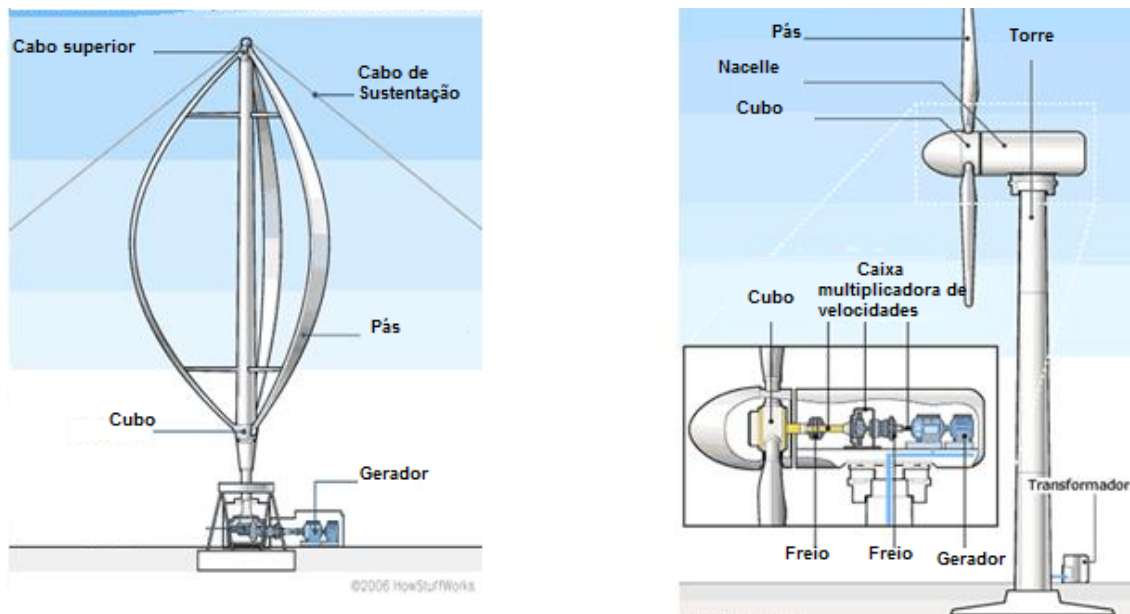


Figura 2.3: Componentes de uma Turbina eólica de eixo horizontal e vertical.

2.4 Tipos de geradores

A escolha dos geradores a serem integrados aos sistemas de conversão eólica constitui-se em um problema tecnológico que depende do esquema adotado (velocidade fixa ou variável). Para isto existem quatro tipos de geradores que podem ser utilizados em turbinas eólicas [17]:

Gerador de Ímã permanente: A aplicação dos geradores de ímã permanente nos sistemas eólicos é idêntica à da máquina síncrona padrão, com exceção da característica do campo magnético principal gerado por ímãs, o que dificulta o controle da tensão de campo e conseqüentemente do fator de potência na saída do gerador. Normalmente estes geradores apresentam problemas de regulação de tensão na presença de variações na velocidade do eixo do rotor ou na corrente da carga. Os geradores de indução trabalham a baixas velocidades de rotação (gerador multipolos), diretamente acoplado ao rotor da turbina eólica, sem necessidade da caixa de engrenagens. As máquinas síncronas a ímã permanente são, dependendo da potência e do ímã utilizado mais caras e tem maior eficiência devido à ausência das perdas nos enrolamentos do rotor. Por outro lado, é importante notar que esta eficiência é bastante dependente do torque mecânico e da velocidade aplicados.

Gerador síncrono de motor bobinado: Os geradores síncronos de rotor bobinado para aplicações em sistemas eólicos normalmente apresentam a configuração de rotor de polos salientes com grande número de polos e baixa velocidade de rotação, o que propicia o acoplamento direto do gerador com a turbina eólica. A máquina síncrona de rotor bobinado apresenta uma realimentação no enrolamento de campo do rotor a partir da rede elétrica com o uso de retificadores o que propicia a regulação da tensão. Estes sistemas se caracterizam por rotores e estatores de grande diâmetro interligados à rede elétrica através de conversores estáticos em esquemas eólicos de velocidade

variável.

Gerador assíncrono de rotor em gaiola: Os geradores de indução com rotor em gaiola quando acoplados a sistemas eólicos podem ter os terminais do estator interligados à rede elétrica através de um conversor estático que propicia a operação em velocidade variável. O gerador assíncrono em gaiola existe a exigência no uso de chaves estáticas de comutação forçada que propiciem o controle do fator de potência junto à rede elétrica e o fornecimento de reativo ao gerador necessário a sua operação, o que eleva ainda mais o custo de implantação do sistema.

Gerador de indução duplamente excitados: Existem várias concepções para interligação dos geradores duplamente excitados às turbinas eólicas. Uma das configurações adotadas para o gerador de indução bobinado consiste na ligação do mesmo através do rotor a um conversor em cascata, constituído de um retificador a diodo e um inversor a tiristor com comutação natural pela linha. Este esquema é conhecido como Kramer Estático, e nele a potência do escorregamento no circuito do rotor é entregue à rede pelo conversor trifásico. Do ponto de vista do conversor, o mesmo é relativamente simples, porém tem a limitação de operar somente nas velocidades sobre-síncronas, permitindo o fluxo da potência de escorregamento em um único sentido.

2.5 Abordagem de controle em turbinas eólicas

As turbinas eólicas mais recentes utilizam dois princípios diferentes de controle aerodinâmico para limitar a extração de potência a um valor próximo à potência nominal da turbina eólica.

2.5.1 Controle de Turbinas Eólicas

As turbinas eólicas são sistemas eletromecânicos que possuem como objetivo principal converter a energia cinética do vento em energia elétrica, é útil começar considerando a quantidade de energia e potência disponível. A primeira vez em que uma turbina eólica foi utilizada foi no século VII, na Pérsia, para prover energia mecânica para que se pudesse moer grãos. Porém, a primeira turbina eólica operada automaticamente para a geração de energia elétrica foi construída por Charles Brush, em 1888 [18].

No mundo todo, o aumento do uso de energias renováveis vem sendo amplamente destacado pela mídia e pela comunidade acadêmica, num futuro próximo as fontes alternativas de energia poderão suprir o crescimento socioeconômico das nações com energia elétrica abundante e de baixo custo. Frente a este fato, vários estudos tem sido iniciados em busca de melhorias e desenvolvimento nesta área, destacando-se os estudos sobre geração eólica, que justifica sua atual preferência por se destacar em pré-requisitos importantes para uma fonte de energia viável para o homem e o planeta [19].

A área útil da turbina é representada por um círculo com raio igual ao tamanho de suas pás, cuja área $A = \pi r^2$ onde r é igual ao raio da pá em metros. A seguinte análise determina a energia cinética no ar que passa pelo disco rotor por unidade de tempo, onde o termo rotor refere-se as laminais como um conjunto. Essa análise é realizada com a ausência das laminais e a unidade de

energia adquirida é em J/s joules por segundo, ou seja watts. No entanto, a unidade de energia elétrica normalmente usada é kilowatt-hora, $kWhs$ que é medido e pago pelo o tipo de utilitário conectado a turbina [20]. O disco de lamina circular pode ser observados na Figura 2.4

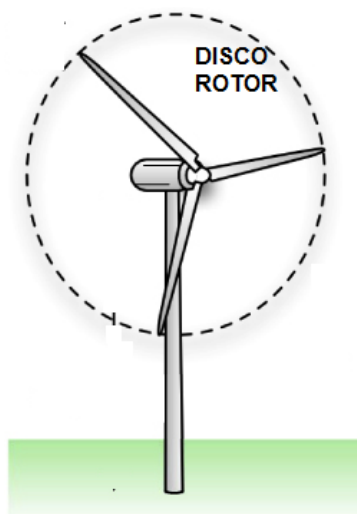


Figura 2.4: Configuração de um disco rotor em turbina eólica.

No início, as turbinas eram compostas por geradores de indução com rotor em gaiola, e conectados a rede. Este tipo de conexão necessita de capacitores conectados ao estator do gerador para regular a sua tensão nominal, bem como excitar o gerador. Logo foi introduzida a operação com velocidade variável, permitindo uma otimização entre a velocidade do vento e do rotor, resultando em uma máxima eficiência, e sem necessidade de compensação. Além disso, este tipo de conexão, principalmente para geradores de indução, tende a melhorar a estabilidade do sistema, já que são inseridos sistemas de controle (variação do passo, potência, velocidade, fator de potência) da máquina por meio de conversores de potência [21]. De acordo com estudos realizados, a produção de energia é maior em geradores com velocidade variável, sendo assim, estes são os mais comuns a serem utilizados [22].

Turbinas eólicas produzem eletricidade pelo uso da potência do vento dirigida para um gerador elétrico. O vento passa pelas laminas, exercendo uma força de rotação. A rotação das laminas giram o eixo no interior da nacelle, que entra dentro da caixa de engrenagens. A caixa de velocidades aumenta a velocidade de rotação para que ela seja apropriada para o gerador, que utiliza os campos magnéticos para converter energia rotacional em energia elétrica. A potência de saída vai para um transformador, que converte a eletricidade vinda do gerador em uma tensão apropriada para a coleta de potência do sistema [23]. A parte mecânica de um gerador eólico é uma das três partes componentes, sendo elas o bloco aerodinâmico, bloco mecânico e o bloco elétrico. Basicamente o gerador produz a ligação eletromecânica entre a turbina o sistema de potência e o sistema de controle controla as saídas do gerador, as componentes básicas de um sistema eólico 2 massa [24], podem ser representados pela Figura 2.5

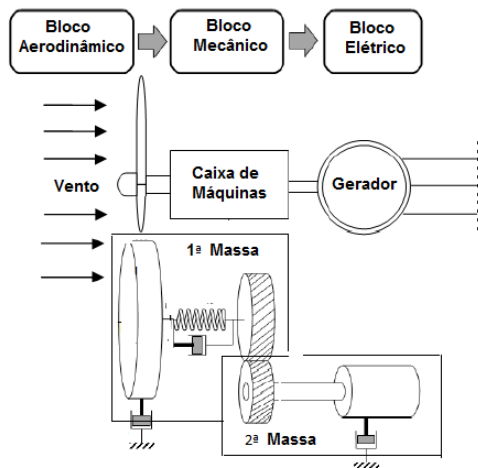


Figura 2.5: Representação das partes de uma turbina eólica de duas massas.

A configuração para turbinas de 1 massa segue com praticamente os mesmos componentes, porém o bloco mecânico vai acumular todos os momentos de inércia do modelo, ou seja, o gerador vai estar diretamente conectado a parte mecânica. Logo utilizando uma turbina eólica de 1 massa é possível regular a potência a ser extraída pela mudança da velocidade de rotação da turbina. A vantagem de se controlar a turbina eólica através da velocidade de rotação em vez de utilizar o controle de passo, é que o aumento na carga aerodinâmica leva a aceleração em vez do aumento de carga, aperfeiçoa a captura de energia e há perda no ruído aerodinâmico. A desvantagem do conceito de velocidade variável é a necessidade de sistemas elétricos mais complicados e até o uso de inversor de frequência, isto implica num maior custo de energia e perda de carga elétrica [25].

2.5.2 Controle ou estol

O controle stall é um sistema passivo que 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 à nominal, o escoamento em torno do perfil da pá do rotor descola progressivamente da superfície da mesma (estol), reduzindo as forças de sustentação e aumentando as forças de arrasto. Os sistemas eólicos de velocidade fixa normalmente adotam este tipo de controle [26].

Sob todas as condições de ventos, superiores à velocidade nominal, o escoamento do fluxo de ar em torno dos perfis das pás do rotor é parcialmente descolado da superfície produzindo menores forças de sustentação e elevadas forças de arrasto. Menores sustentações e maiores arrastos atuam contra um aumento da potência do rotor [27]. 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 certa torção longitudinal que as levam a um suave desenvolvimento deste efeito [28].

2.5.3 Controle de Passo

O controle de passo, por sua vez, é um sistema ativo que normalmente necessita de uma informação vinda de um controlador [29]. Sempre que a potência nominal do gerador é ultrapassada, devido a um aumento da velocidade do vento, as pás do rotor são feitas girar 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. Para todas as velocidades do vento superiores à nominal, o ângulo é escolhido de forma que a turbina 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 sustentação aerodinâmica e pequenas forças de arrasto.

2.6 Estimação dos parâmetros

Nesta seção será abordado a parte dos processos para aquisição dos parâmetros da turbina eólica, que posteriormente serão utilizados para a simulação numérica do modelo do sistema utilizando o Matlab.

Após a abordagem teórica para a construção do modelo do sistema, se faz necessário o prosseguimento do processo que consiste no levantamento de dados do motor, das pás e da turbina de vento para a simulação do sistema modelado.

Para a determinação dos parâmetros do motor foi utilizado o método proposto por [30], também foram utilizadas uma placa protoboard para a montagem de sensores para se obter dados de rotação, corrente, tensão e carga em tempo real utilizando um micro controlador Arduino. a montagem da placa pode ser observada conforme a Figura 2.6:

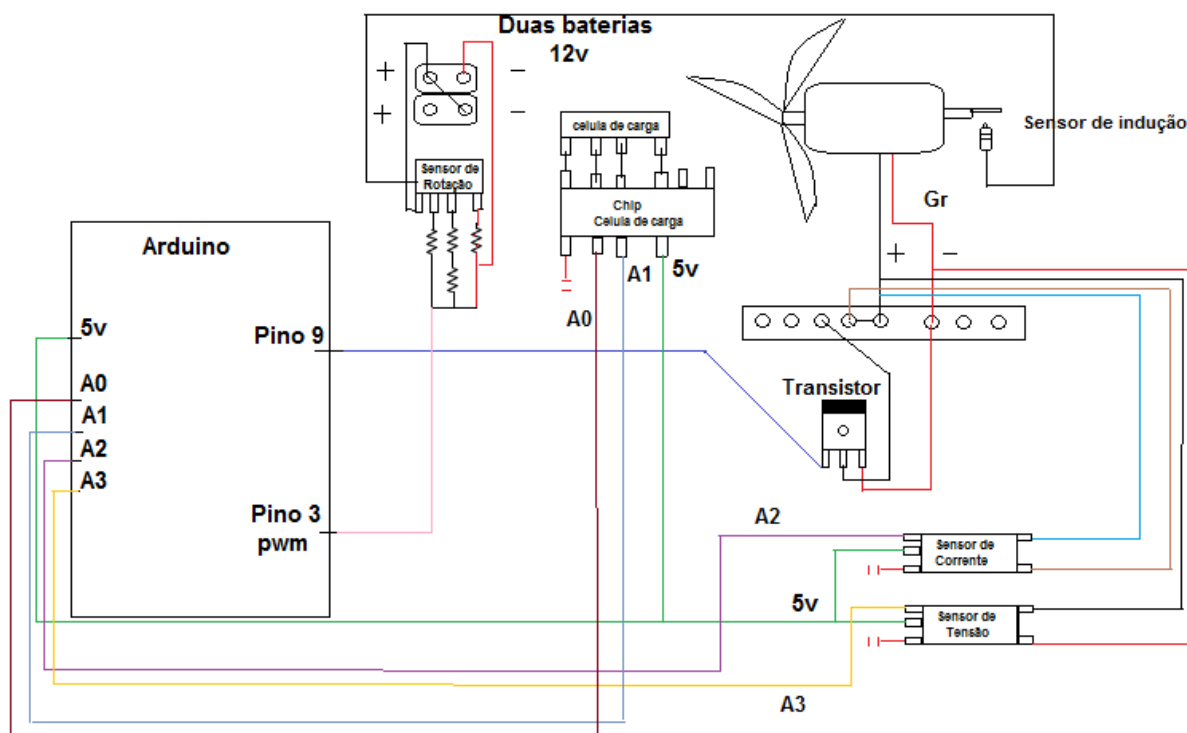


Figura 2.6: Circuito utilizado para a identificação dos parâmetros da turbina eólica.

Resistência de armadura (R_a):

Essa medida é feita com a utilização de um multímetro digital (Minipa ET-2082c), conectando-se os terminais de armadura do motor de corrente contínua ao multímetro. Um detalhe que deve ser observado é a variação da resistência do motor em relação a posição do rotor. Desse modo, como proposto na referência, são realizadas algumas medidas e na posição com menor valor encontrado, mantém-se o rotor e realizam outras medidas referentes a essa posição.

Corrente (I_a):

A corrente do sistema é medida pelo sensor ACS712 para Arduino, o qual é conectado no terminal de armadura do motor e no sinal do transistor, este sensor imprime em tempo real as correntes dos pontos medidos utilizando o microcontrolador Arduino.

Tensão (V_a):

A tensão do sistema é medida pelo sensor de tensão 0-25 para Arduino, o qual é conectado aos terminais de armadura do motor este sensor coleta dados em tempo real as tensões dos pontos medidos utilizando o microcontrolador Arduino.

Indutância de armadura (L_a):

No caso da indutância o multímetro digital (Minipa ET-2082c) também é capaz de medir ao ser conectado aos terminais de armadura do motor. Esse método tem a vantagem de determinar rapidamente o valor da indutância, sem a necessidade de nem um outro equipamento, como osciloscópio e fonte.

Constante eletromotriz (K_e):

Para o calculo de K_e do motor, utiliza-se como base a Equação 2.1 que deriva da lei das malhas de kirchhoff para um motor elétrico de corrente continua. Quando o motor entra em regime permanente, pode-se dizer que a derivada da corrente é 0 e, ao ser anulado a derivada, pode-se obter os dados de tensão, corrente, resistência e velocidade de rotação por meio dos vetores obtidos pelos sensores instalados no circuito e, assim, ela é definida como:

$$K_e = \frac{V(t) - R_a I(t)}{\omega(t)} \quad (2.1)$$

Raio da pá (r):

O raio da pá é facilmente medido com uma fita métrica, pegando do inicio da pá na base do rotor ate a ponta.

Velocidade de rotação (ω):

A medição da velocidade de rotação e realizada por um sensor indutivo NPN, este tipo de sensor fornece uma tensão de saída 0-1 V toda vez em que se passa uma superfície metálica a 4 mm do sensor. Logo foi colocada uma pequena chapa metálica no rotor do gerador Dc, e toda vez que esta chapa girar e passa por esse sensor ele emite um sinal, e utilizando um programa no microcontrolador Arduíno é possível medir o valor da rotação por instante de tempo.

Força (F):

Foi utilizada uma célula de carga para Arduíno conectada ao motor para que se possa medir a força aplicada em tempo real. O princípio de funcionamento das células de carga baseia-se na variação da resistência ôhmica de um sensor denominado extensômetro ou strain gage quando submetido a uma deformação. Utilizam-se comumente em células de carga quatro extensômetros ligados entre si conforme a ponte de Wheatstone. Esta ponte recebendo o desbalanceamento da mesma, em virtude da deformação dos extensômetros.

Momento de inércia (J):

Um dos meios de se determinar o momento de inercia do motor e através da sua constante de tempo. Para a obtenção desse constante de tempo, é necessário partir o motor e deixa-lo atingir o regime permanente. Atingindo o regime, é preciso monitorar a velocidade de rotação ω do motor, desligar sua fonte de alimentação, e aguardar a sua parada e identificar, em uma curva $\omega(t)$ do motor, o tempo t_b tal que $\omega = 0.386\omega_0$, como demonstrado na Figura 2.7

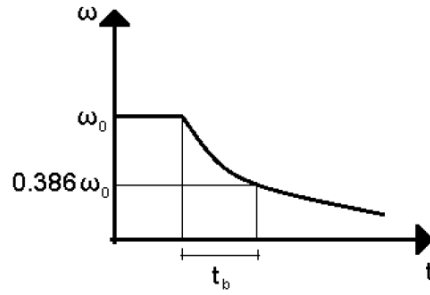


Figura 2.7: Método para a estimação do momento de inércia.

Obtido o valor de t_b , usa-se a seguinte expressão para o cálculo do momento de inércia, onde B é o coeficiente de atrito viscoso para o cálculo do momento de inércia [31].

$$J = B \cdot T_b \quad (2.2)$$

Densidade do ar (ρ_{ar}):

A densidade do ar ρ_{ar} é determinada através da medida da pressão absoluta P_{abs} que é obtida de um manômetro localizado no túnel de vento, pela massa molar do M_m , pela temperatura T que é medida por um termômetro e por fim a constante universal de gases KR . A relação para a definição da densidade do ar do sistema pode ser formulada da seguinte forma:

$$\rho_{ar} = \frac{P_{abs} \cdot M_m}{KR \cdot T} \quad (2.3)$$

Capítulo 3

MODELAGEM E SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DA TURBINA EÓLICA EM ESCALA REDUZIDA

3.1 Modelagem da Turbina eólica em escala reduzida

A modelagem de uma turbina eólica pode ser definida em três subsistemas básicos que correspondem as partes componentes da turbina, cada um desses três subsistemas possui suas próprias propriedades e características individuais como mostra o esquema na Figura 3.1, adaptado de [5].

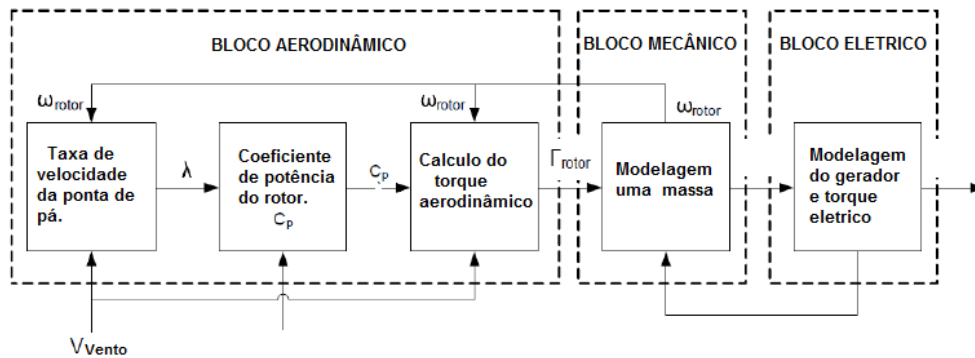


Figura 3.1: Diagrama para modelagem dividida em três subsistemas.

3.1.1 Modelagem Aerodinâmica

As turbinas eólicas de eixo horizontal são formadas por um rotor que tem certo número de pás fixadas sobre um eixo. Por efeito do fluxo de ar que incide sobre a área varrida das pás manifestam-se forças aerodinâmicas que atuam sobre a estrutura e que contribuem com o torque resultante. Conhecendo-se a velocidade relativa que atua em cada elemento de pá se pode determinar o ângulo

de ataque e calcular as forças aerodinâmicas da turbina.

A energia disponível para uma turbina eólica é a energia cinética associada a uma coluna de ar que se desloca a uma velocidade uniforme e constante. Esta coluna de ar incide na área circular coberta pelas pás da turbina. Logo, o ganho de energia da turbina pode ser expresso pela taxa de extração de energia cinética do tubo de ventos de entrada. Como há perda de parte da energia cinética ao passar pela turbina eólica, a velocidade do vento à montante é menor, e, como a vazão é constante, o tubo de vento à montante possui um diâmetro significativamente maior, conforme a Figura 3.2, adaptado de [32]. A parte da energia cinética do vento perdida é responsável pela energia mecânica que move o rotor da turbina [33].

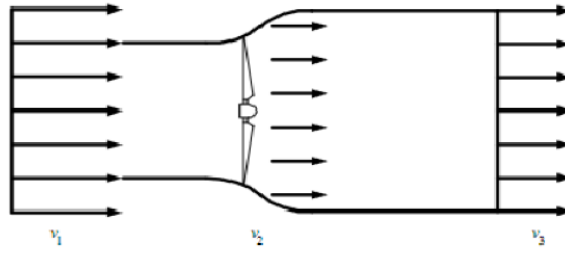


Figura 3.2: Variação de massa e da velocidade através da área de varredura das pás de uma turbina.

Relacionando-se as expressões das forças tangenciais e axiais destas teorias, podem ser determinados, por um procedimento iterativo, os fatores de interferência tangencial e axial, com os quais se podem obter a velocidade relativa em cada elemento de pá, ângulos e forças aerodinâmicas. Aplicando tal procedimento para cada elemento de pá se obtém finalmente o torque e potência da turbina. Sendo a energia dada pelo produto da potência pelo tempo, a potência mecânica que o vento transfere à turbina pode ser calculada da seguinte forma:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 V_v^3 c_p \quad (3.1)$$

onde ρ é a densidade do ar, $A = \pi r^2$ é a área varrida pelo rotor da turbina, V_v é a velocidade do vento e c_p é o coeficiente de potência.

O c_p pode ser explicado dois processos físicos básicos que limitam o coeficiente máximo de potência do rotor de uma turbina eólica. Em primeiro lugar, um rotor aumenta a pressão estática do lado do vento, reduzindo a taxa de fluxo de massa através da sua área varrida e da energia eólica disponível para a conversão. Em segundo lugar, um rotor converte parte da energia cinética linear do vento em energia cinética de rotação na sua esteira, que já não está disponível para a conversão em energia mecânica. O c_p varia com a velocidade do vento, a velocidade de rotação e o ângulo da pá β . Logo, a curva de potência é definida pela seguinte expressão empírica [34]:

$$c_p(\lambda, \beta) = G_1 \left[\frac{G_2}{i} - G_3\beta - G_4 \right] e^{\frac{G_5}{i}} \quad (3.2)$$

onde G_1 , G_2 , G_3 , G_4 e G_5 são coeficientes que variam de acordo com o formato da hélice da turbina. β é dado em graus e i é obtido de:

$$\frac{1}{i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (3.3)$$

A equação acima representa o comportamento da curva de potencia em função do ângulo de ataque escolhido e da taxa de velocidade.

A taxa de velocidade ou λ de uma turbina eólica é um fator essencial para demonstrar o quão eficientemente a performance da turbina pode ser, a relação de velocidade λ é definida como:

$$\lambda = \frac{\omega r}{V_v} \quad (3.4)$$

onde ω é a velocidade de rotação, V_v é a velocidade do vento e o r é o raio da pá.

O físico alemão Albert Betz, em 1919, deduziu que a quantidade máxima de energia cinética que pode ser extraída do vento por uma turbina eólica ideal é de 16/27 do total, quando a velocidade a jusante é 1/3 da velocidade a montante. O limite de Betz diz respeito a uma turbina ideal, sendo o valor extraído por uma turbina real ainda menor [35]. Tendo em vista que o valor máximo de c_p para uma turbina ideal e de 16/27 ou 0.593, Pode-se observar o comportamento da curva de $c_p \times \lambda$ varia em função dos ângulos de passo β , da seguinte forma na Figura 3.3.

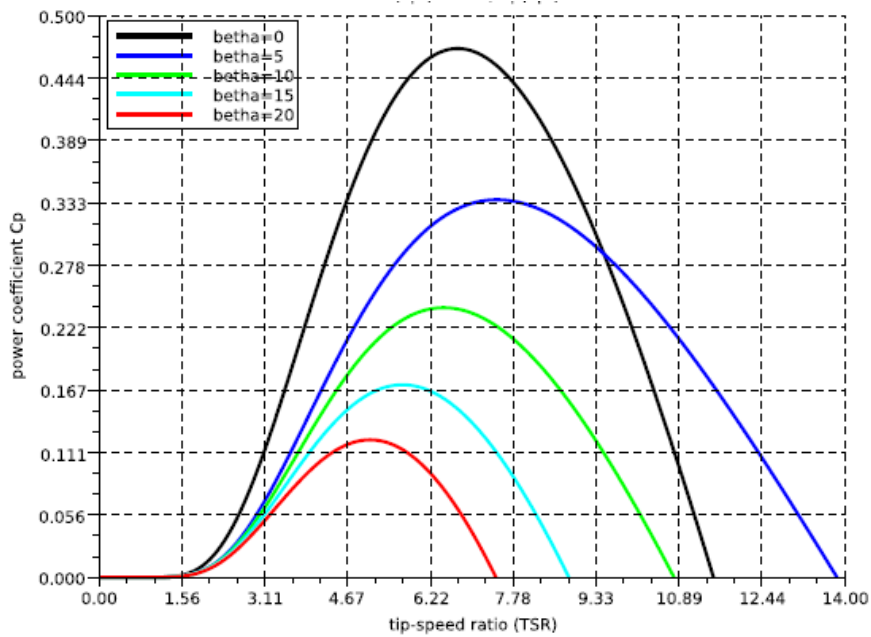


Figura 3.3: Coeficiente de potência em função de taxa de velocidade de ponta de pá.

3.1.2 Modelagem Elétrica

Apesar do advento da eletrônica de potência no que diz respeito ao acionamento de máquinas de corrente alternada, a máquina CC ainda está presente em várias aplicações específicas. Isso se deve às diversas características de desempenho que são oferecidas pelos diferentes métodos de excitação e grande adaptabilidade ao controle, seja ele manual ou automático.

As máquinas CC de ímã permanente são bastante encontradas em motores de potência reduzida. Nestes, o enrolamento de campo é substituído por ímãs permanentes. Geralmente o ímã tem formato cilíndrico, espessura uniforme e é magnetizado radialmente, conforme mostra a Figura 3.4, adaptado de Fitzgerald et al. [36].

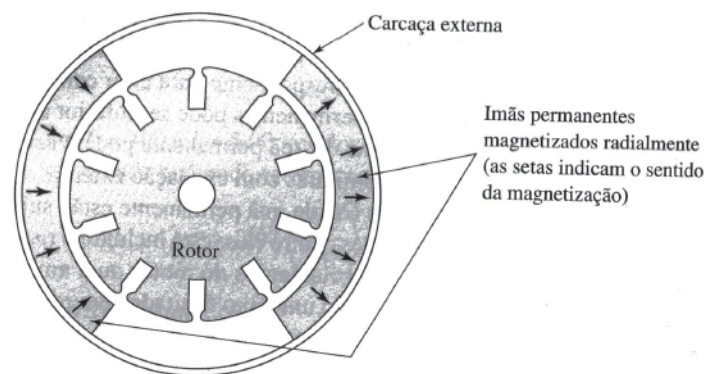


Figura 3.4: Estrutura básica de um motor de corrente contínua de ímã permanente.

As variadas opções de excitação resultam em diferentes características de tensão em relação à corrente ou velocidade em relação ao conjugado. A grande facilidade de controle em sistemas que exigem uma ampla faixa de velocidades e precisão de controle também é um diferencial dessa máquina [36].

Um motor de corrente contínua pode ter seu circuito representado da seguinte forma Figura 3.5, adaptado de Basilio et al. [37]:

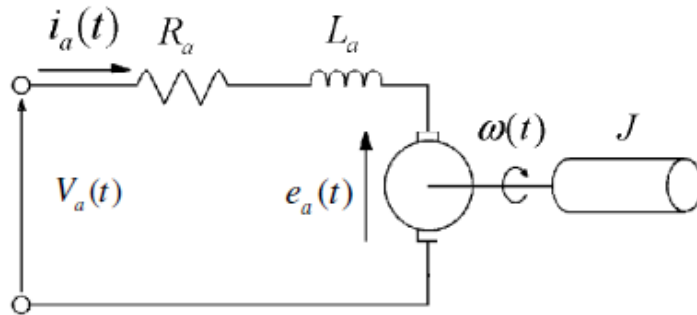


Figura 3.5: Modelo de uma maquina de corrente contínua de ímã permanente.

onde L_a é a indutância de armadura, R_a é a resistência de armadura, o e_a é a Força eletromotriz, o J é o momento de inercia, o ω é velocidade de rotação, o V_a é a Tensão de armadura e o I_a é a corrente de armadura.

Aplicando-se a lei das malhas de Kirchoff no circuito, obtém-se a seguinte expressão:

$$\dot{I}_a = \frac{1}{L_a} [e_a - R_a I_a - V_a] \quad (3.5)$$

Sabendo que e_a e definido como:

$$e_a = K_m \omega \quad (3.6)$$

onde K_m é a constante eletromotriz. O torque elétrico pode ser definido da seguinte forma para um motor de corrente contínua:

$$T_e = K_m I_a \quad (3.7)$$

Pode-se definir a expressão final do gerador substituindo e_a e adicionando uma resistência externa para ser utilizada como uma variável de controle:

$$\dot{I}_a = \frac{1}{L_a} [K_m \omega - R_a I_a - R_e I_a - V_a] \quad (3.8)$$

3.1.3 Modelagem Mecânica

Modelagem de um sistema mecânico de energia eólica é uma questão complicada. De acordo com a teoria de elemento lâmina, modelagem de lâmina e eixos precisa de cálculos complicados e morosos [38]. Além disso, também depende de informações detalhadas e precisas sobre a geometria do rotor. Por essa razão, considerando apenas os eventos transitórios do sistema gerador de vento, um método equivalente de modelagem de massa do sistema de energia eólica é utilizada normalmente.

A equação dinâmica da parte mecânica do sistema, pode ser definida em dois pontos: de um lado fica o rotor que recebe torque aerodinâmico resultante da entrada do vento e por outro lado temos o gerador que sofre influência da velocidade de rotação do rotor e gera um torque elétrico de retorno sobre o mesmo, como pode ser representado na Figura 3.6, adaptado de Iov et al [39]:

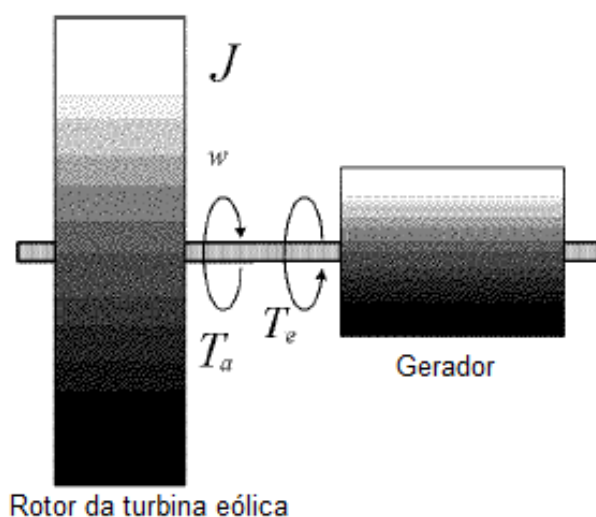


Figura 3.6: Representação do modelo mecânico para turbina eólica de uma massa.

Como o sistema de uma massa possui somente um eixo, a rigidez e o fator de amortecimento podem ser desconsiderados pelo fator de redução do rotor. Assim, o modelo de uma massa pode ser representado da seguinte forma:

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J} [T_a - T_e] \quad (3.9)$$

onde $\dot{\omega}$ é a aceleração da rotação, T_a é o torque aerodinâmico gerado pelas pás e T_e é o torque elétrico do gerador.

3.2 Simulações numéricas da turbina

Esta seção primeiramente vai simular em software MATLAB[®] o processo de confecção da curva de potência da turbina eólica em escala reduzida, e através do processo de obtenção da curva de potência serão definidos os parâmetros finais para a simulação do modelo. Esta seção também tem como objetivo demonstrar o comportamento do sistema eólico através de simulações no software MATLAB[®] utilizando o modelagem obtida nesta dissertação. Ambas utilizarão os dados adquiridos de acordo com os procedimentos adotados na seção anterior para as simulações.

3.2.1 Simulação da curva de potência

A potência de uma turbina eólica varia com a velocidade do vento e cada turbina eólica tem uma curva de potência característica de desempenho de energia. com essa curva é possível prever a produção de energia de uma turbina eólica, sem considerar os detalhes técnicos de seus vários componentes. Assim, a curva de potência de uma turbina eólica é um gráfico que indica a produção máxima de energia elétrica em diferentes velocidades do vento [40]. Três pontos são importantes para análise do desempenho da turbina: a velocidade mínima, a velocidade nominal e a velocidade de corte conforme a Figura 3.7.

Velocidade mínima V_m : É a velocidade do vento em que a turbina começa a gerar energia.

Velocidade nominal V_n : É a velocidade do vento em que a turbina eólica atinge sua energia nominal. Isso, muitas vezes, significa a sua potência máxima.

Velocidade de corte V_c : É a velocidade do vento em que a turbina eólica desliga para evitar que a potência do gerador trabalhe em níveis prejudiciais.

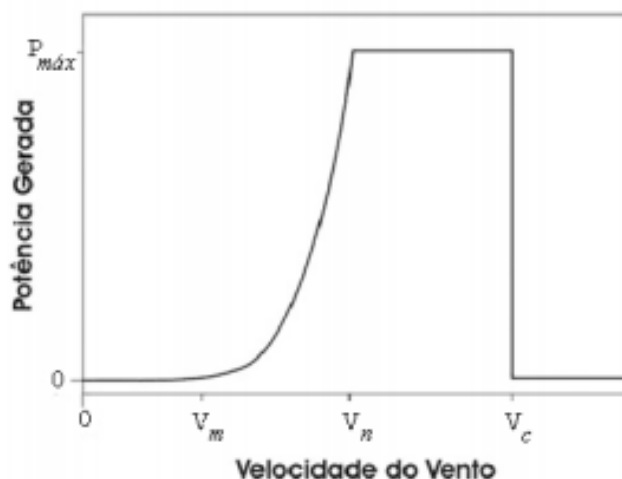


Figura 3.7: Diagrama típico da curva de potência de uma turbina em relação ao desempenho da turbina.

A quantidade de potência disponível no vento que pode ser convertida em potência mecânica

por uma turbina eólica é chamada de coeficiente de potência, normalmente utilizado para comparar a eficiência de diferentes turbinas eólicas. A quantidade da energia que o vento transfere para o rotor dependerá da densidade do ar ρ_{ar} , da área de varredura do rotor A e do deslocamento de uma massa de ar Δm a uma velocidade do vento V_v . A potência do vento P_v associada ao deslocamento da massa de ar é definida por [41] [42]:

$$P_v = \frac{1\Delta m V_v^2}{2\Delta t} \quad (3.10)$$

onde t representa o tempo. como o fluxo de massa de ar que atravessa as pás do rotor é dada por:

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \rho_{ar} A V_v \quad (3.11)$$

Substituindo a equação 3.11 em 3.10, a potência do vento P_v disponível no vento pode ser expressada por:

$$P_v = \frac{1\rho_{ar}\pi r^2 V_v^3}{2} \quad (3.12)$$

A potência mecânica P_m do motor pode ser observada através da relação entre o torque aerodinâmico T_a e a velocidade de rotação ω , sendo representado por:

$$P_m = T_a \omega \quad (3.13)$$

Logo o torque aerodinâmico pode ser definido em função da força F aplicada e da distancia d entre a base do rotor e a ponta da pá, da seguinte forma:

$$T_a = F d \quad (3.14)$$

Sendo a força representada pelo valor medido pela célula de carga c_g e da gravidade g , da seguinte forma:

$$F = c_g \frac{1}{1000} g \quad (3.15)$$

Substituindo as equações 3.14 e 3.15 na equação 3.13, a expressão final para a potência mecâ-

nica é dada por:

$$P_m = c_g \frac{1}{1000} g d \omega \quad (3.16)$$

Finalmente, o coeficiente de potência c_p , que caracteriza o nível de rendimento de uma turbina eólica, é uma medida adimensional e pode ser definido pela razão:

$$c_p = \frac{P_m}{P_v} \quad (3.17)$$

Para a simulação da curva de potência do sistema real foi utilizado o software MATLAB[®], no programa foi criado o algoritmo de acordo com o modelo para curva de potência obtido anteriormente, onde o sistema possuirá como parâmetros variáveis no tempo (vetores) os dados de medição do sensor da célula de carga e a velocidade de rotação do sensor. A simulação da curva do sistema real foi realizada dentro do túnel de vento a velocidade do vento fixa, esta foi dividida em duas etapas: A primeira a uma velocidade de vento de 8 m/s e a segunda a uma velocidade de vento de 10 m/s, os parâmetros constantes que foram utilizados para a simulação estão representados na Tabela 3.1:

Tabela 3.1: Parâmetros da turbina eólica.

Parâmetro	Valor
Densidade do ar	1.06 kg/m ³
Raio da pá (r)	0.25 m
Distancia rotor a ponta da pá (d)	0.0548 m

Para a simulação com velocidade do vento 8 m/s, foi obtido a curva conforme a Figura 3.8.

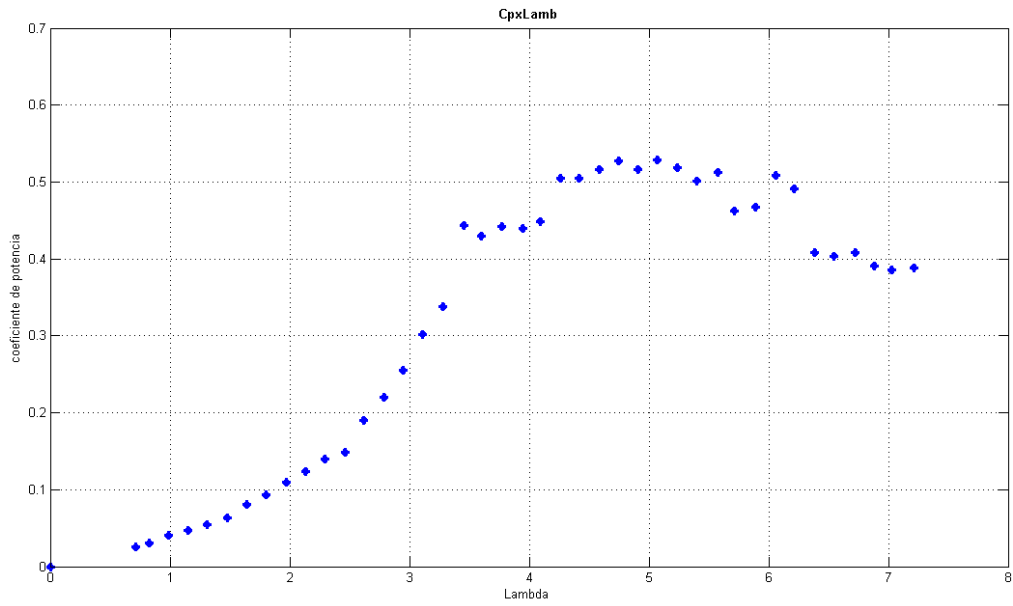


Figura 3.8: Curva de potência do sistema real 8 m/s.

Para a simulação com velocidade do vento 10m/s, foi obtido a curva conforme a Figura 3.9.

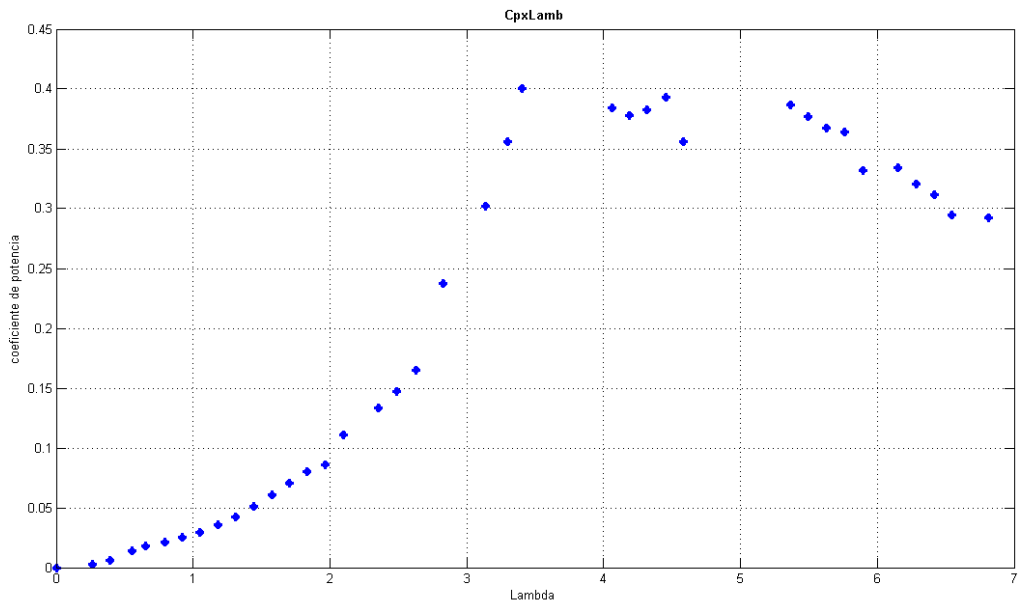


Figura 3.9: Curva de potência do sistema real 10 m/s.

Para as curvas de potência foram escolhidos em media de 30 pares pontos dos vetores adquiridos pelos sensores de carga e de rotação, com um passo de 5 rad/s num intervalo da velocidade de rotação de 0-220 rad/s. A curva foi bastante característica e similar as encontradas na literatura para turbinas de 3 hélices e ambas as curvas estão respeitando o padrão do limite definido por

Beltz.

3.2.2 Obtenção do polinômio aproximado da curva de potência pelo método de mínimos quadrados

Para a determinação de um polinômio aproximado da curva de potencia foi utilizado o método dos mínimos quadrados, esse método foi proposto com o objetivo de definir um polinômio que se aproximasse o máximo possível da curva original e que pudesse representar a curva de potencia em função da velocidade de rotação.

De acordo com Froberg [43], no método dos mínimos quadrados supõe-se que tem-se um conjunto $n + 1$ de pontos $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$ com todos x_k diferentes. Agora encontra-se um polinômio $y = y_m(x) = a_0 + a_1 \cdot x + \dots + a_m \cdot x^m$ que proporciona um ajuste com esses dados. Se $m = n$ podemos determinar com exclusividade um ajuste exato. No entanto, se $m < n$ podemos definir um melhor ajuste em um determinado sentido. Assumindo que o erro experimental é associado somente com os valores de y , acha-se natural para minimizar alguma norma adequada do vetor de erro. Uma escolha popular é fazer:

$$S = \sum_{j=0}^n (y_m(x_j) - y_j)^2 \quad (3.18)$$

Um mínimo escolhendo os coeficientes a_k convenientemente. Diferenciação, obtem-se:

$$\frac{\partial S}{\partial a_k} = \sum_{j=0}^n (y_m(x_j) - y_j) x_j^k = 0 \quad (3.19)$$

$$k = 0(1)m \quad (3.20)$$

Introduzimos a notação $s_k = \sum_{j=0}^n \cdot x_j^k$ e $v_k = \sum_{j=0}^n \cdot x_j^k \cdot y_j$. Além disso definimos a matriz c :

$$c = \begin{bmatrix} 1 & x_0 & x_0^2 & \cdots & x_0^m \\ 1 & x_1 & x_1^2 & \cdots & x_1^m \\ \vdots & & & & \\ 1 & x_n & x_n^2 & \cdots & x_n^m \end{bmatrix}$$

Do tipo $(n + 1) \times (m + 1)$ e os vetores a , v e y :

$$a^T = (a_0, a_1, \dots, a_m) \quad (3.21)$$

$$v^T = (v_0, v_1, \dots, v_m) \quad (3.22)$$

$$y^T = (y_0, y_1, \dots, y_n) \quad (3.23)$$

Então $v = c^T y$, e se escreve $c^T c = P = (p_{ik})$, encontra-se $p_{ik} = s_{i+k}$ onde $i, k = 0(1)m$. conseqüentemente a condição para minimizar S pode ser formulado como $P_a = v$. Primeiramente provamos que P é não singular mostrando o sistema homogêneo $P_a = 0$ tendo somente a solução trivial $a = 0$. Isso resulta porque temos $0 = a^T P_a = a^T c^T c_a = (c_a)^T c_a$, implicando $c_a = 0$. conseqüentemente o polinômio $y_m(x)$ desapareceria para $n+1$ diferentes valores de x_0, x_1, \dots, x_n que e possível somente se os coeficientes a_0, a_1, \dots, a_n desaparecerem, $a = 0$. Desde $P_a = 0$ tem-se uma solução única $a = 0$ assim podendo extrair a conclusão que P é não singular, e assim temos uma única solução $a = P^{-1}v$ dando $S_{min} = y^T y - v^T a$.

Isso pode ser escrito $a = (c^T c)^{-1} c^T y = c^+ y$ é o pseudo inverso de c . Para grandes valores de m o sistema torna-se altamente mal condicionado e terá uma ascensão de dificuldades consideráveis. Em muitos casos isso e uma indicação que o problema pode não estar bem postado e por isso e necessário tomar outras alternativas.

O método dos mínimos quadrados foi aplicado por meio de um algoritmo programado em MATLAB[®] nas curvas obtidas do sistema real acima, com o objetivo de obter um polinômio que representasse a curva de potência em função da velocidade de rotação, para a simplificação matemática do modelo da turbina.

Para a curva de 8 m/s obteve-se o seguinte curva aproximada como mostra a Figura 3.10.

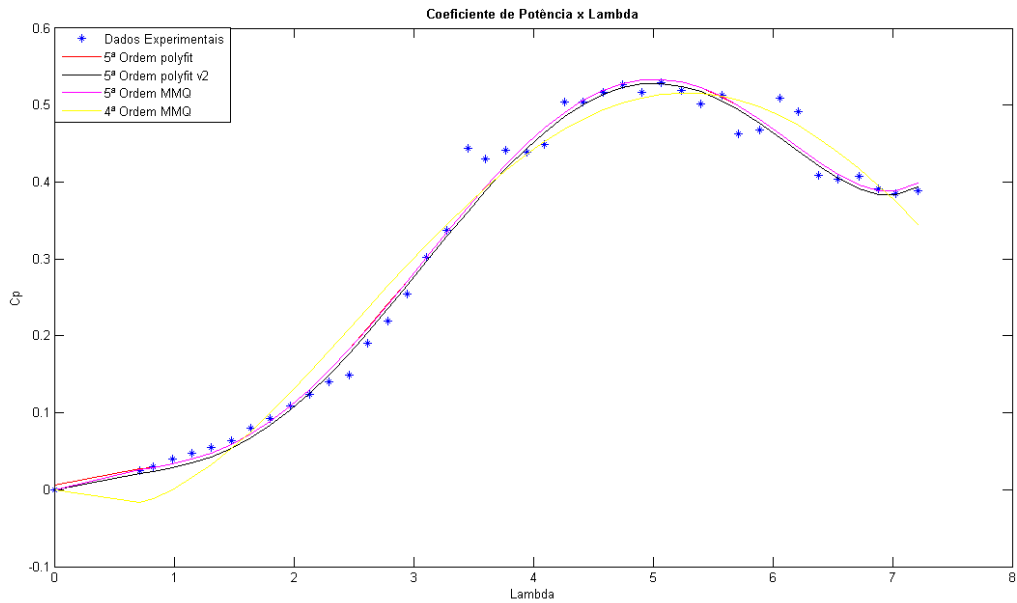


Figura 3.10: Polinômio aproximado por mínimos quadrados para 8 m/s.

O polinômio obtido pelo método de aproximação para a curva de 8 m/s pode ser representado a seguir:

$$c_p = a_0\lambda^5 + a_1\lambda^4 + a_2\lambda^3 + a_3\lambda^2 + a_4\lambda + a_5 \quad (3.24)$$

Com valores de coeficientes para 8 m/s representados na Tabela 3.2:

Tabela 3.2: Coeficientes da turbina eólica para 8 m/s.

Símbolo	Valor
a0	0.0008
a1	-0.0129
a2	0.0642
a3	-0.0890
a4	0.0655
a5	0

Para a curva de 10 m/s obteve-se o seguinte curva aproximada como mostra a Figura 3.11.

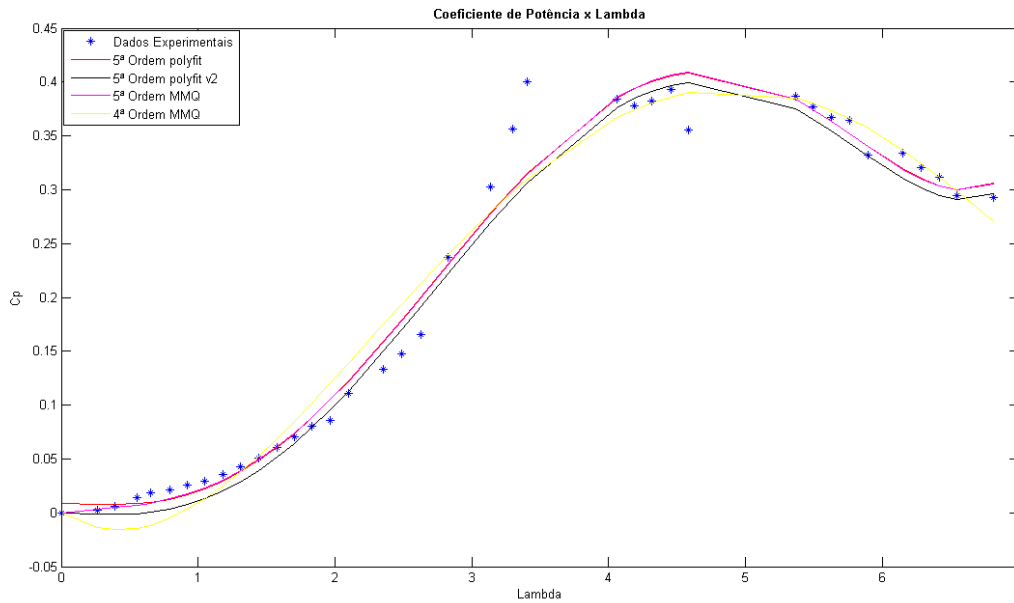


Figura 3.11: Polinômio aproximado por mínimos quadrados para 10 m/s.

O polinômio obtido pelo método de aproximação para a curva de 10 m/s pode ser representado a seguir:

$$c_p = a_0\lambda^5 + a_1\lambda^4 + a_2\lambda^3 + a_3\lambda^2 + a_4\lambda + a_5 \quad (3.25)$$

com valores de coeficientes 10 m/s representados na Tabela 3.3:

Tabela 3.3: Coeficientes da turbina eólica para 10 m/s.

Símbolo	Valor
a0	0.0006
a1	-0.0087
a2	0.0338
a3	-0.0102
a4	0.0048
a5	0

3.2.3 Simulação do modelo da turbina

A parte de simulação do modelo final da turbina consiste apenas em agregar o modelo aerodinâmico, mecânico e elétrico. A turbina eólica utilizada neste trabalho é composta somente por

um motor de corrente contínua ligado ao conjunto que possui as hélices, logo a base do modelo final consiste em duas variáveis de estado assim como foi modelado nas equações 3.8 e 3.9:

$$\begin{cases} \dot{\omega} &= \frac{1}{J}[T_a - T_e] \\ \dot{I}_a &= \frac{1}{L_a}[K_m\omega - R_a I_a - R_e I_a - V_a] \end{cases} \quad (3.26)$$

O modelo mecânico está em função das variáveis de torque aerodinâmico T_a e torque elétrico T_e . Para a definição de T_a , substituí-se a equação 3.4 que representa λ na equação 3.24 do polinômio aproximado de c_p obtido do sistema real. Obtêm-se a seguinte equação de c_p em função da velocidade de rotação ω :

$$c_p = a_0\left(\frac{\omega r}{V_v}\right)^5 + a_1\left(\frac{\omega r}{V_v}\right)^4 + a_2\left(\frac{\omega r}{V_v}\right)^3 + a_3\left(\frac{\omega r}{V_v}\right)^2 + a_4\left(\frac{\omega r}{V_v}\right) + a_5 \quad (3.27)$$

Conforme visto anteriormente na equação 3.1 de potência mecânica P_m , ela está definida em função do coeficiente de potência c_p , logo ao substituirmos a equação 3.27 na equação 3.1, temos a potência mecânica definida por:

$$\begin{aligned} P_m &= 1/2\rho_{ar}\pi r^2 V_v a_0 \left(\frac{\omega r}{V_v}\right)^5 + 1/2\rho_{ar}\pi r^2 V_v a_1 \left(\frac{\omega r}{V_v}\right)^4 + 1/2\rho_{ar}\pi r^2 V_v a_2 \left(\frac{\omega r}{V_v}\right)^3 \\ &+ 1/2\rho_{ar}\pi r^2 V_v a_3 \left(\frac{\omega r}{V_v}\right)^2 + 1/2\rho_{ar}\pi r^2 V_v a_4 \left(\frac{\omega r}{V_v}\right) + 1/2\rho_{ar}\pi r^2 V_v a_5 \end{aligned} \quad (3.28)$$

Substituindo a equação 3.28 na equação 3.13, Podemos definir os termos constantes como:

$$c_0 = \frac{1\rho\pi a_0 r^5}{2V_v^2} \quad (3.29)$$

$$c_1 = \frac{1\rho\pi a_1 r^4}{2V_v} \quad (3.30)$$

$$c_2 = \frac{1\rho\pi a_2 r^3}{2} \quad (3.31)$$

$$c_3 = \frac{1\rho\pi a_3 r^2 V_v}{2} \quad (3.32)$$

$$c_4 = \frac{1\rho\pi a_4 r V_v^2}{2} \quad (3.33)$$

$$c_5 = \frac{1\rho\pi a_5 V_v^3}{2} \quad (3.34)$$

Tendo assim o torque aerodinâmico e o torque elétrico definidos por:

$$T_a = c_0\omega^4 + c_1\omega^3 + c_2\omega^2 + c_3\omega + c_4 + c_5\omega^{-1} \quad (3.35)$$

$$T_e = K_m I_a \quad (3.36)$$

Por fim a representação final do modelo da turbina eólica em escala reduzida considerando que c_5 sempre é nulo por fim de aproximação polinomial, substituindo as equações 3.35 e 3.36 na equação 3.26 e substituindo $x_1 = \omega$ e $x_2 = I_a$. o comportamento dinâmico da turbina eólica pode ser representada pelas seguintes equações:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 &= \frac{1}{J} [c_0x_1^4 + c_1x_1^3 + c_2x_1^2 + c_3x_1 + c_4 - K_m x_2] \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{L_a} [K_m x_1 - R_a x_2 - R_e x_2] \end{cases} \quad (3.37)$$

A simulação numérica do modelo da turbina foi obtida por meio da implementação do algoritmo que representasse o modelo proposto acima utilizando o MATLAB[®], para a simulação do sistema foram utilizados os seguintes parâmetros conforme a Tabela 3.4:

Tabela 3.4: Parâmetros da turbina eólica.

Parâmetro	Valor
Momento de inércia do sistema (J)	0.02029 kg/m^2
Raio da pá (r)	0.25 m
Densidade do ar (rho)	1.06 kg/m^3
Indutância(La)	0.0259 H
constante eletromotriz (Kt)	0.0928 Vs/rad
Resistência interna (Ra)	3.2919 $Ohms$
Velocidade do vento (Vv)	8 – 10 m/s

3.3 Análise de estabilidade

A análise de estabilidade do sistema eólico foi avaliada em função do sistema linearizado que representa o modelo da turbina não linear. Nesta seção será demonstrado o método de linearização tangente aplicado a cada termo não linear do modelo, e obtido o modelo linearizado será definida a função de transferência do sistema e esta será simulada em MATLAB [®], com o objetivo de demonstrar a área de instabilidade da velocidade de rotação do sistema.

3.3.1 Aplicação de método linearizado tangente

O método de linearização é usado para aproximar funções complicadas usando funções mais simples que fornecem a mesma precisão desejada para aplicações específicas, além de serem mais fáceis de trabalhar [44].

A tangente à curva $y = x^2$ fica perto da curva próxima ao ponto de tangência. Em um pequeno intervalo, de cada lado do ponto, os valores de y ao longo da tangente fornecem uma boa aproximação para os valores de y na curva. Observa-se esse fenômeno ampliando os dois gráficos no ponto de tangência e analisando as tabelas com os valores das diferença entre $f(x)$ e sua reta tangente próximo a abscissa do ponto de tangente. Localmente, toda curva se comporta como uma reta e cada vez mais se assemelha a sua tangente, conforme a Figura 3.12, adaptado de [44].

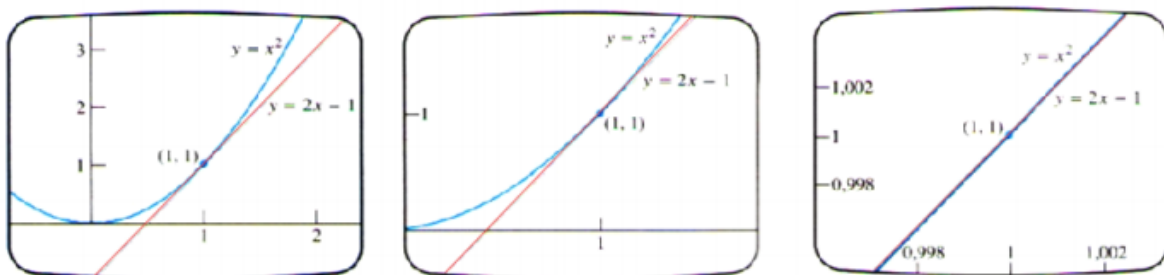


Figura 3.12: Demonstração da aproximação da reta tangente a curva $y = x^2$.

Em geral, a tangente a $y = f(x)$ no ponto $x = a$, onde f é derivável passa pelo ponto $(a, f(a))$. Então, a equação é determinada por:

$$y = f(a) + f'(a)(x - a) \quad (3.38)$$

Assim, a linearização dos termos não lineares do sistema através da aplicação do linearizado tangente pode ser representado pelo limite do termo não linear na vizinhança do ponto de equilíbrio:

$$\underbrace{\lim}_{x \rightarrow a} f(x) = f(a) + f'(a)(x - a) \quad (3.39)$$

Para a aplicação do método de linearização tangente no sistema modelado, é necessário uma manipulação algébrica do modelo não linear de modo a deixar o sistema em função somente de uma variável de estado, sendo realizada neste caso em função da velocidade de rotação.

Inicialmente, pode-se isolar o segunda equação de 3.37:

$$-K_m x_2 = [J\dot{x}_1 - c_0 x_1^4 - c_1 x_1^3 - c_2 x_1^2 - c_3 x_1 - c_4] \quad (3.40)$$

Posteriormente pode-se derivar \dot{x}_1 da primeira equação de 3.37 , resultando em:

$$J\ddot{x}_1 = [4c_0 x_1^3 \dot{x}_1 + 3c_1 x_1^2 \dot{x}_1 + 2c_2 x_1 \dot{x}_1 + c_3 \dot{x}_1 - K_m \dot{x}_2] \quad (3.41)$$

Obtido a derivada podemos substituir \dot{x}_2 da equação 3.37 na equação 3.41, obtendo a seguinte expressão:

$$J\ddot{x}_1 = [4c_0 x_1^3 \dot{x}_1 + 3c_1 x_1^2 \dot{x}_1 + 2c_2 x_1 \dot{x}_1 + c_3 \dot{x}_1 - \frac{K_m^2}{L_a} x_1 + \frac{R_a K_m}{L_a} x_2 + \frac{R_e K_m}{L_a} x_2] \quad (3.42)$$

Por fim substituímos $K_m x_2$ obtido da equação 3.40 na equação 3.42:

$$\begin{aligned}
J\ddot{x}_1 = & [4c_1x_1^3\dot{x}_1 + 3c_1x_1^2\dot{x}_1 + 2c_2x_1\dot{x}_1 + c_3\dot{x}_1 - \frac{K_m^2}{L_a}x_1 - \frac{JR_a}{L_a}\dot{x}_1 \\
& + \frac{c_0R_a}{L_a}x_1^4 + \frac{c_1R_a}{L_a}x_1^3 + \frac{c_2R_a}{L_a}x_1^2 + \frac{c_3R_a}{L_a}x_1 + \frac{c_4R_a}{L_a} + \frac{R_eK_m}{L_a}x_2] \quad (3.43)
\end{aligned}$$

Após o processo de manipulação algébrica, aplica-se a linearização nos termos não lineares do sistema através da aplicação do linearizado tangente, que pode ser representado pelo limite do termo não linear na vizinhança do ponto de equilíbrio. Sendo a os pontos de equilíbrio para velocidade de rotação, b são os pontos de equilíbrio para corrente e d são os pontos de equilíbrio das resistências de entrada associados a cada um dos pontos.

A aplicação do linearizado nos termos não lineares é representada da seguinte forma, onde $R_e = u$:

$$\lim_{x_1 \rightarrow a} x_1^4 = a^4 + 4a^3x_1 - 4a^4 \Rightarrow 3a^3x_1 - 2a^3 \quad (3.44)$$

$$\lim_{x_1 \rightarrow a} x_1^3 = a^3 + 3a^2x_1 - 3a^3 \Rightarrow 3a^2x_1 - 2a^3 \quad (3.45)$$

$$\lim_{x_1 \rightarrow a} x_1^2 = a^2 + 2ax_1 - 2a^2 \Rightarrow 2ax_1 - a^2 \quad (3.46)$$

$$\lim_{x_2 \rightarrow b | u \rightarrow d} ux_2 = ux_2 + x_2(u - b) + u(x_2 - d) \Rightarrow bx_2 + ud - bd \quad (3.47)$$

$$\lim_{x_1 \rightarrow a | \dot{x}_1 \rightarrow 0} x_1\dot{x}_1 = x_1\dot{x}_1 + \frac{\partial x_1}{\partial x_1}\dot{x}_1(x_1 - a) + \frac{\partial \dot{x}_1}{\partial \dot{x}_1}x_1(\dot{x}_1 - 0) \Rightarrow a.\dot{x}_1 \quad (3.48)$$

$$\lim_{x_1 \rightarrow a | \dot{x}_1 \rightarrow 0} x_1^2\dot{x}_1 = x_1^2\dot{x}_1 + 2x_1\dot{x}_1(x_1 - a) + \frac{\partial \dot{x}_1}{\partial \dot{x}_1}x_1^2(\dot{x}_1 - 0) \Rightarrow a^2\dot{x}_1 \quad (3.49)$$

$$\lim_{x_1 \rightarrow a | x_1 \rightarrow 0} x_1^3 \dot{x}_1 = x_1^3 \dot{x}_1 + 3x_1 \dot{x}_1 (x_1 - a) + \frac{\partial x_1}{\partial \dot{x}_1} x_1^3 (\dot{x}_1 - 0) \Rightarrow a^3 \dot{x}_1 \quad (3.50)$$

Tendo obtido os termos lineares correspondentes a cada não linearidade do sistema, pode-se substituí-los na equação 3.37, assim obtendo o termos A, B e C conforme e demonstrado:

$$A = \left(-\frac{4c_0 a^3}{J} - \frac{3c_1 a^2}{J} - \frac{2c_2 a}{J} - \frac{c_3}{J} + \frac{R_a}{L_a} + \frac{b}{L_a} \right) \dot{x}_1 \quad (3.51)$$

$$B = \left(\frac{K_m^2}{JL_a} - \frac{4c_0 R_a a^3}{JL_a} - \frac{3c_1 R_a a^2}{JL_a} - \frac{2c_2 R_a a}{JL_a} + \frac{c_3 R_a}{JL_a} - \frac{4c_0 b a^3}{JL_a} - \frac{3c_1 b a^2}{JL_a} - \frac{2c_2 b a}{JL_a} - \frac{c_3 b}{JL_a} \right) x_1 \quad (3.52)$$

$$C = \frac{R_a}{L_a} 2c_1 a^3 + \frac{R_a}{L_a} c_2 a^2 - \frac{R_a}{L_a} c_4 - \frac{b}{L_a} 2c_1 a^3 + \frac{b}{L_a} c_2 a^2 - \frac{b}{L_a} c_4 - \frac{K_m}{L_a} b d \quad (3.53)$$

Resultando em:

$$\ddot{x}_1 + A\dot{x}_1 + Bx_1 + C = \frac{K_m}{L_a} d R_e \quad (3.54)$$

Para obter a função de transferência do sistema aplicou-se a transformada de Laplace no sistema linearizado, assumido como entrada a resistência externa e saída a velocidade de rotação, tem-se que:

$$\frac{x_1(s)}{R_e(s)} = \frac{K_m d / L_a}{S^2 + AS + B} \quad (3.55)$$

Para a correta identificação da zona de instabilidade do sistema, aplicou-se na função de transferência do sistema linearizado um vetor de pontos de equilíbrio da velocidade de rotação variando de 0 rad/s a 230 rad/s, obtendo assim os pontos de equilíbrio equivalente da corrente e resistência externa. O comportamento do sistema a uma velocidade de vento de 8 m/s pode ser visualizado na Figura 3.13.

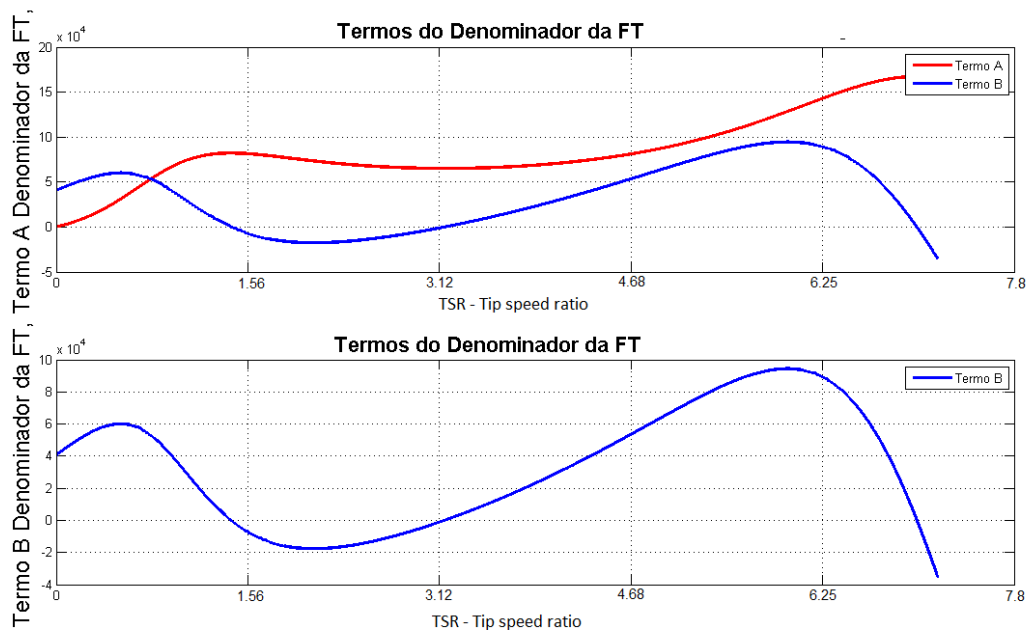


Figura 3.13: Função de transferência do sistema em função dos pares de pontos de equilíbrio para parte do denominador, Termo A e Termo B.

Nota-se que a correta identificação da zona de instabilidade na velocidade de rotação do sistema em malha aberta varia entre os valores de 45 rad/s a 105 rad/s, que pode ser caracterizado pela parte negativa evidenciada no termo B do denominador da função de transferência. O termo A não influencia na instabilidade do sistema pois os pontos de equilíbrio em A são sempre positivo, logo são estáveis.

Capítulo 4

DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR PID PARA A TURBINA EÓLICA

O controlador proporcional-integral-derivativo (PID) é com certeza o controlador mais comum utilizado. Cerca de 90 a 95 % dos casos de todos os problemas de controle são resolvidos por este tipo de controlador, que pode ser expressado de diversas formas. Portanto a utilização de um controlador PID pode ser uma solução para controlar a velocidade de rotação da turbina eólica, e este capítulo demonstra todo processo de aplicação desse método de controle e alguns resultados obtidos de experimentos do controlador no sistema real.

4.1 Lei de controle PID

Muito interesse foi dedicado ao controle PID no desenvolvimento precoce de controle automático e posteriormente por um longo tempo as pesquisas sobre controle PID receberam pouca atenção. Logo depois esse interesse por este tipo de controlador foi ressurgindo por causa da possibilidade de se criarem controladores PID com sintonização automática, geração automática de ganhos programados e adaptação contínua [45].

Mesmo os controladores PID sendo muito comuns, eles nem sempre são usados da melhor maneira, pois muitas vezes estes tipos de controladores são mal sintonizados e isso é muito comum quando a ação derivativa não é usada. A razão é que é difícil sintonizar estes três parâmetros por tentativa e erro. Levine [45], explica que em um controlador PID a ação de controle é gerada pela soma de três termos, e a lei de controle então é descrita como:

$$u(t) = u_p(t) + u_I(t) + u_D(t) \quad (4.1)$$

onde u_p é a parte proporcional, u_I a parte integral e u_D a parte derivativa.

4.1.1 Controle Proporcional

A parte proporcional é uma simples realimentação:

$$u(p) = Ke(t) \quad (4.2)$$

onde $e(t)$ é o erro de controle e K é o ganho do controlador. O erro é definido como a diferença entre o set point y_{sp} e a saída do processo $y(t)$, conforme é demonstrado:

$$e(t) = y_{sp} - y(t) \quad (4.3)$$

E a forma modificada:

$$u_p(t) = K(by_{sp} - y(t)) \quad (4.4)$$

Onde b é chamado set point ponderado, admitindo ajustes independentes na resposta do set point e reposta ao distúrbio de carga.

4.1.2 Controle integral

O controle proporcional normalmente dá um sistema que tem um estado constante de erros. A ação integral é introduzida para remover estes erros. A ação integral possui a seguinte forma:

$$u_I(t) = k_i \int e(s)ds = \frac{K}{T_i} \int e(s)ds \quad (4.5)$$

A ideia é simplesmente que a ação de controle seja feita mesmo se o erro for muito pequeno, desde que a média do erro tenha o mesmo sinal durante um longo período.

4.1.3 Controle derivativo

O controle derivativo é usado para fornecer uma ação antecipativa. A forma simplificada do controle derivativo é demonstrada por:

$$u_D(t) = k_d \frac{\partial e(t)}{\partial t} = KT_d \frac{\partial e(t)}{\partial t} \quad (4.6)$$

A combinação da ação proporcional e derivativa, é entao:

$$u_p(t) + u_D(t) = K(e(t) + T_d \frac{\partial e(t)}{\partial t}) \quad (4.7)$$

A maior diferença entre um controlador PID e outros tipos de controle mais complexos e que o modelo dinâmico admite uma melhor previsão do que uma extrapolação de uma linha reta. Em muitas aplicações praticas o set point é parcialmente constante. Isso significa que a derivada do set point é zero exceto por alguns instantes de tempo quando o set point está mudando. Nestas circunstancias de tempo a derivada se torna infinitamente larga. Extrapolação linear é imprecisa quando o sinal de medida muda rapidamente comparado com o horizonte de predição T_d .

Uma melhor demonstração da ação derivativa pode ser então:

$$u_D(s) = \frac{KT_d s}{1 + sT_d/N} (y_{sp}(s) - y(s)) \quad (4.8)$$

O sinal passa por um filtro passa baixa com tempo constante T_d/N .

4.1.4 Regras de sintonia para controladores PID

Ziegler e Nichols [46] propuseram regras para se determinarem os valores do ganho proporcional K , do tempo integral T_i e do tempo derivativo T_d , com base nas características da resposta transitória de um determinado processo a controlar. Tal determinação de parâmetros, ou sintonia, dos controladores PID pode ser feita na própria instalação através de experimentos sobre o processo [47].

De acordo com Ogata [47], há dois métodos designados como regras de sintonia de Ziegler-Nichols. Em ambos se pretende obter um valor máximo de ultrapassagem de 25 % na resposta a uma excitação em degrau, conforme mostra a Figura 4.1, adaptado de Ogata [47]:

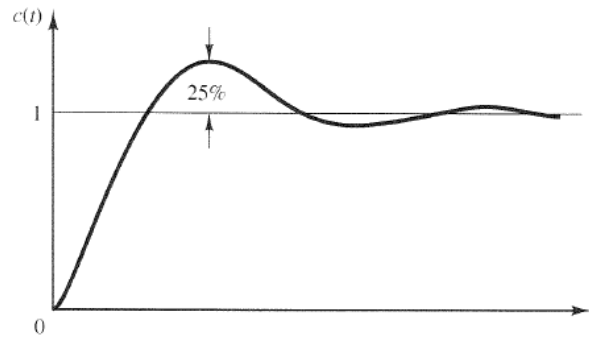


Figura 4.1: Curva de resposta ao degrau unitário mostrando um valor máximo de ultrapassagem.

Primeiro método de Ziegler-Nichols: No primeiro método se obtêm experimentalmente a resposta do processo a controlar a uma excitação em degrau unitário. Quando o processo a controlar não envolver integradores nem polos dominantes complexos-conjugados, a curva de resposta ao degrau unitário deve se assemelhar a uma curva em forma de S, como é mostrado na Figura 4.2, adaptado de [47]. Tais curvas de resposta ao degrau podem ser geradas experimentalmente ou a partir de uma simulação dinâmica do processo a controlar.

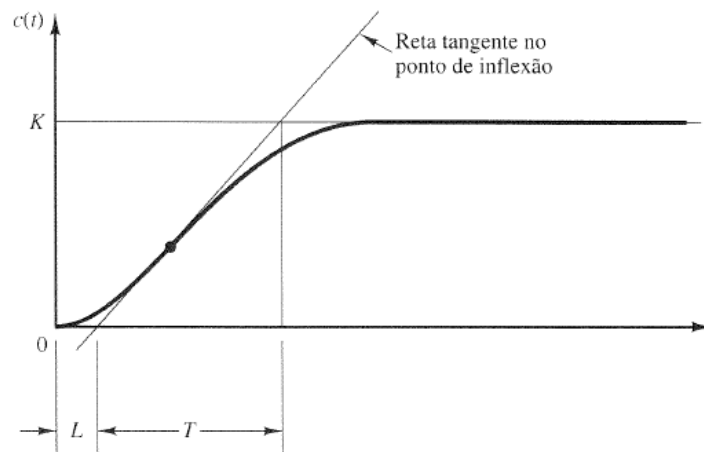


Figura 4.2: Curva de resposta em forma de S.

A curva em S pode se caracterizar por duas constantes, o tempo de retardo L e a constante de tempo T . O tempo de retardo e a constante de tempo podem ser determinados traçando-se uma reta tangente à curva em forma de S no ponto de inflexão e determinando-se as interseções com o eixo dos tempos e com a reta $c(t) = K$. A função de transferência $C(s)/U(s)$ pode ser aproximada à de um sistema de primeira ordem com retardo de transporte, como a seguir:

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{K_e^{-Ls}}{Ts + 1} \quad (4.9)$$

Observa-se que o controlador PID sintonizado através do primeiro método das regras de Ziegler-Nichols fornece:

$$G_c(s) = K\left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) \quad (4.10)$$

$$= \frac{1.2T}{L}\left(1 + \frac{1}{2Ls} + 0.5Ls\right) \quad (4.11)$$

$$= 0.6T \frac{\left(s + \frac{1}{L}\right)^2}{s} \quad (4.12)$$

Ziegler e Nichols sugeriram ajustar os valores de K_p , T_i e T_d de acordo com a formula mostrada na Tabela 4.1

Tabela 4.1: Regras de sintonia baseada na resposta em degrau.

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	T/LK	∞	0
PI	$0.9T/LK$	$L/0.3$	0
PID	$1.2T/LK$	$2L$	$0.5L$

Segundo método de Ziegler-Nichols: Neste segundo método ajustam-se os valores de $T_i = \infty$ e $T_d = 0$. Utilizando-se somente a ação de controle proporcional, aumenta-se o valor de K de 0 a um valor crítico K_{cr} para o qual o sinal de saída apresenta oscilações mantidas (Se os valores não apresentarem oscilações, quaisquer que sejam os valores de K , então o método não se aplica). Em consequência, são determinados experimentalmente os valores de ganho crítico K_{cr} e o período crítico correspondente P_{cr} conforme a Figura 4.3, adaptado de [47].

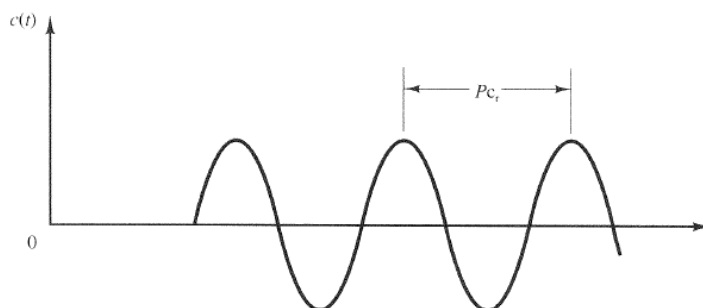


Figura 4.3: Oscilação mantida com P_{cr} .

Ziegler e Nichols sugeriram ajustar os valores dos parâmetros K , T_i e T_d de acordo com a Tabela 4.2:

Tabela 4.2: Regras de sintonia baseada no ganho crítico K_{cr} e no período crítico P_{cr} .

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$1/1.2P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

Observa-se que o controlador PID sintonizado de acordo com o segundo método das regras fornece:

$$G_c(s) = K\left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) \quad (4.13)$$

$$= 0.6K_{cr}\left(1 + \frac{1}{0.5P_{cr}s} + 0.125P_{cr}s\right) \quad (4.14)$$

$$= 0.075K_{cr}P_{cr}\frac{\left(s + \frac{4}{P_{cr}}\right)^2}{s} \quad (4.15)$$

Método de sintonia fina ou sintonia manual: Existem alguns métodos para a correta definição dos parâmetros do PID e a sintonia fina é um mecanismo importante para a correta definição dos mesmos. Este método consiste na tentativa e erro com a mínima análise analítica usando respostas ao degrau, ou em alguns casos, testes reais no sistema decidindo-se ganhos baseando-se em observação e experimentação. Ele pode ser utilizado para otimização dos métodos de Ziegler e Nichols que nem sempre as curvas são tao precisas, logo os resultados dos parâmetros obtidos por este são muito próximos ao que deveriam ser utilizados e assim e realizando-se uma sintonia fina nos parâmetros obtidos por Ziegler e Nichols é possível através de tentativas e erros de experimentação otimizar o controle PID e fazer com que este funcione com mais eficiência [48].

4.2 Simulação numérica do controlador PID

A simulação numérica do controlador PID foi realizada no software MATLAB[®], através da ferramenta Simulink. Para a aplicação do PID foi utilizado o modelo não linear do sistema eólico que foi validado no capítulo anterior, utilizando também os parâmetros identificados na Tabela 3.4 e os valores dos coeficientes aproximados da curva de potência. A estrutura da simulação

numérica pode ser representada da seguinte forma, conforme mostra a Figura 4.4.

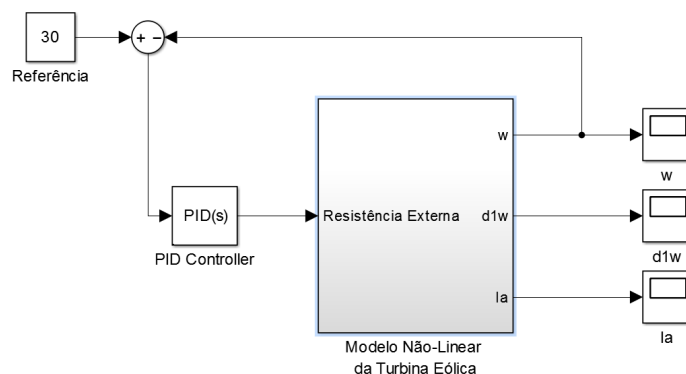


Figura 4.4: Estrutura da simulação numérica do controlador PID no Simulink.

As simulações numéricas foram realizadas em etapas e pontos de operações diferentes, sendo a primeira etapa para a velocidade de vento de 8 m/s com o controlador aplicado nos seguintes pontos de operação da velocidade de rotação: 30 rad/s, 70 rad/s e 110 rad/s. A segunda etapa decorre da mesma maneira sendo para a velocidade do vento de 10 m/s, com os mesmos pontos de operação da primeira etapa.

Os pontos de operação escolhidos foram determinados de acordo com a zona de instabilidade do sistema, para validar o funcionamento da estratégia de controle. Logo foram escolhidos um ponto na zona estável abaixo da zona de instabilidade da velocidade de rotação, um ponto localizado na zona de instabilidade e um ponto localizado na zona estável acima da zona de instabilidade do sistema.

Para ambas etapas foram calculados os valores de ganhos de acordo com as regras de sintonia de Ziegler-Nichols e também por ajuste fino. Sendo definidos de acordo com a Tabela 4.3:

Tabela 4.3: Valores dos ganhos K_p e T_i utilizados para a simulação numérica do sistema.

<i>Ganho</i>	<i>Valor</i>
K_p	1.2
T_i	0.25

Os resultados obtidos são relacionados abaixo de acordo com sua respectiva etapa:

Primeira Etapa: Os resultados são representados para a condição de velocidade do vento de 8 m/s pela pelas Figuras (4.5-4.7), correspondendo aos pontos de operação de 30 rad/s, 70 rad/s e 110 rad/s simultaneamente.

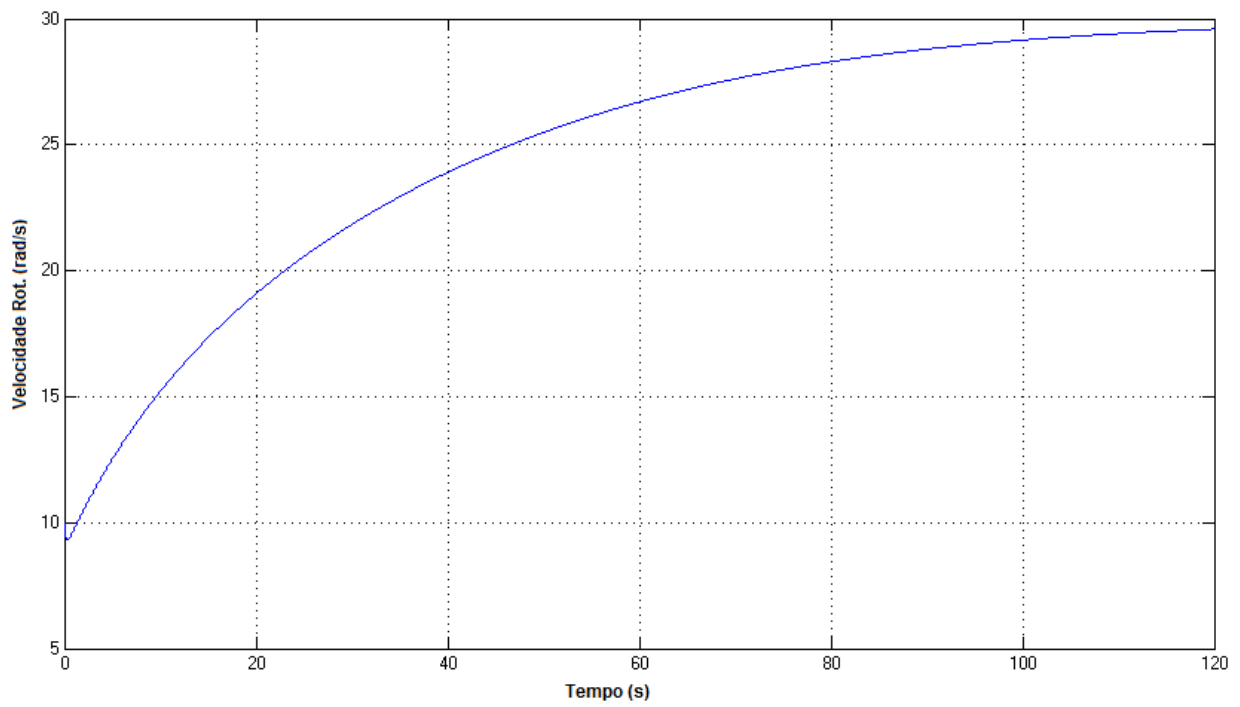


Figura 4.5: Comportamento do controlador PID variando no tempo para o ponto de operação de 30 rad/s para 8 m/s.

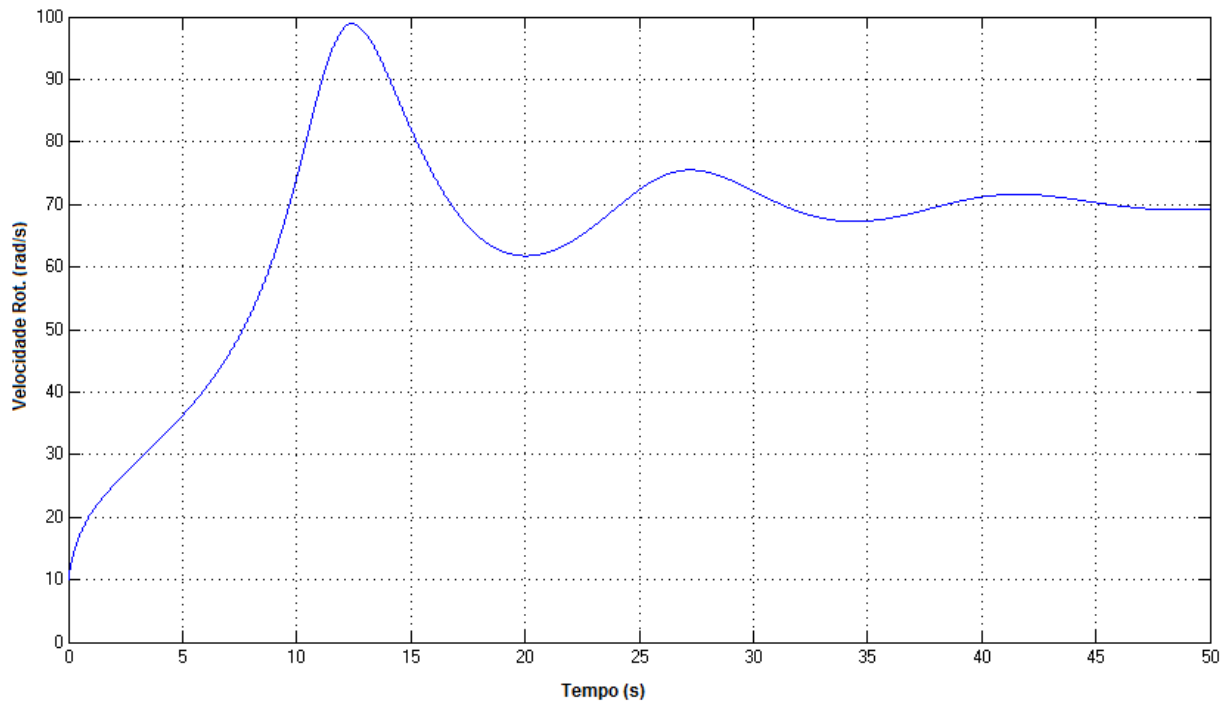


Figura 4.6: Comportamento do controlador PID variando no tempo para o ponto de operação de 70 rad/s para 8 m/s.

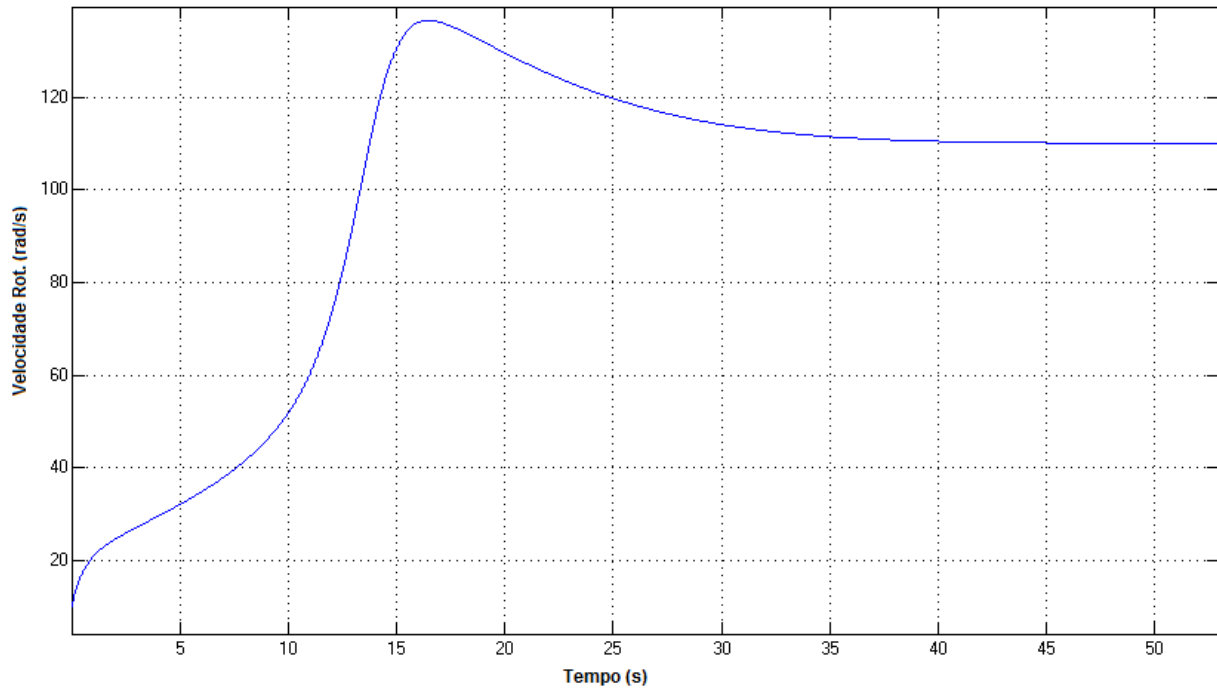


Figura 4.7: Comportamento do controlador PID variando no tempo para o ponto de operação de 110 rad/s para 8 m/s.

Segunda Etapa: Os resultados são representados para a condição de velocidade do vento de 10 m/s pela pelas Figuras (4.8-4.10), correspondendo aos pontos de operação de 30 rad/s, 70 rad/s, 110 rad/s simultaneamente.

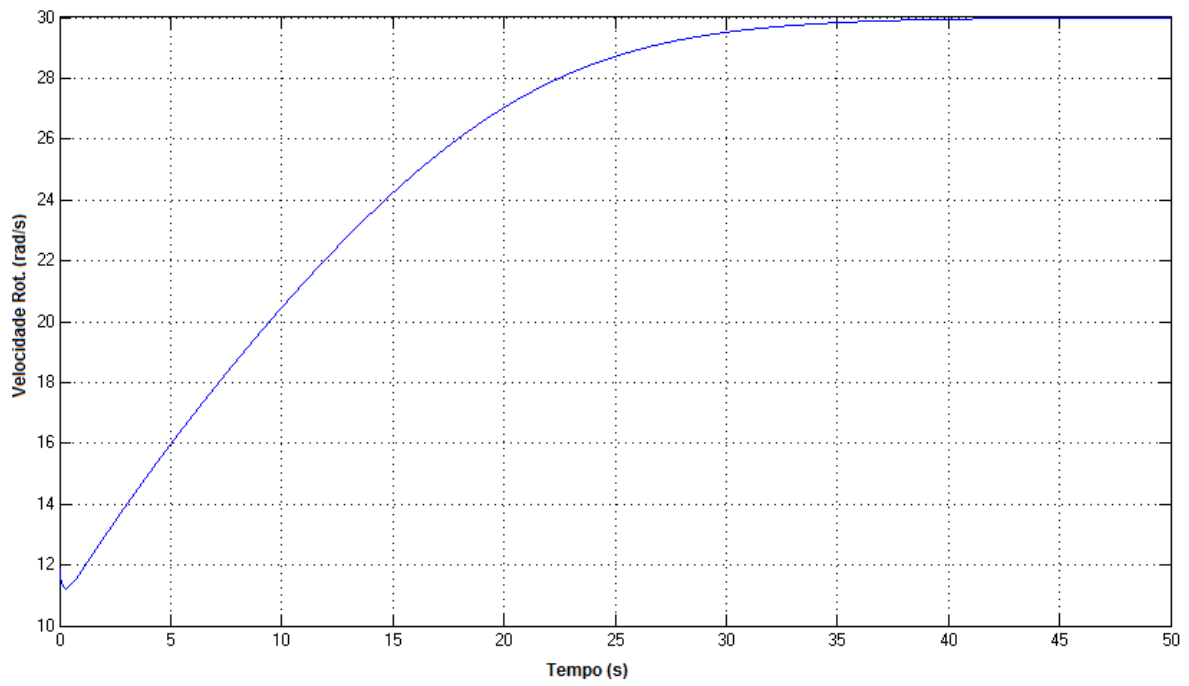


Figura 4.8: Comportamento do controlador PID variando no tempo para o ponto de operação de 30 rad/s para 10 m/s.

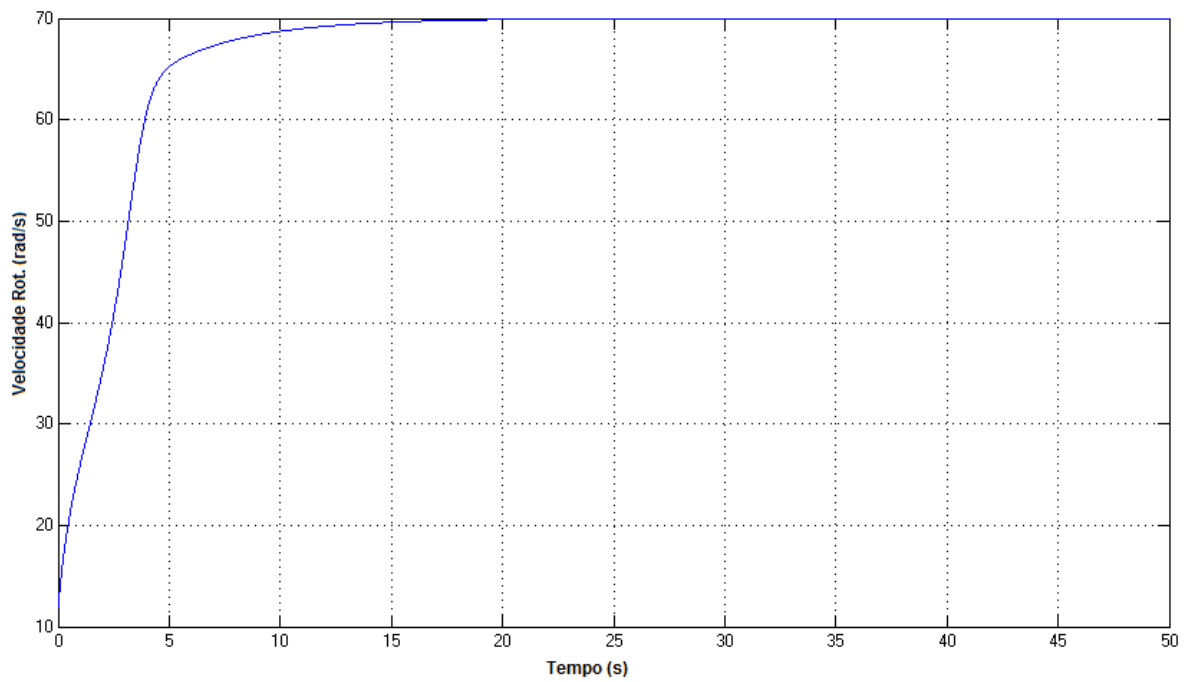


Figura 4.9: Comportamento do controlador PID variando no tempo para o ponto de operação de 70 rad/s para 10 m/s.

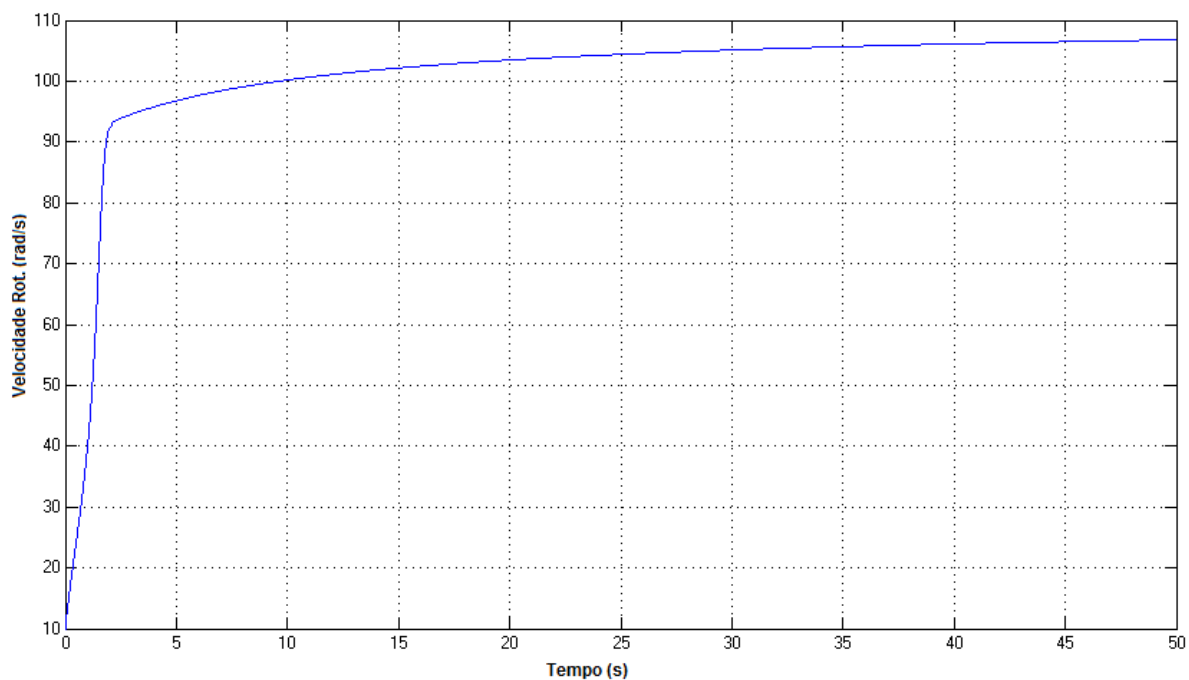


Figura 4.10: Comportamento do controlador PID variando no tempo para o ponto de operação de 110 rad/s para 10 m/s.

Observando-se os resultados obtidos através da simulação numérica do controlador PID, infere-se que o controlador funcionou como esperado no sistema eólico em nível de simulação e obteve resultados bem constantes. É importante perceber que a diferença entre as duas etapas é simplesmente o aumento da velocidade do vento e a troca dos coeficientes de c_p para cada velocidade de vento utilizada.

Com isso pode-se observar que os resultados possuíam comportamentos bem semelhantes para as duas velocidades de vento escolhidas, diferindo apenas no comportamento dos pontos de operação de 70 rad/s e 110 rad/s. Nestes pontos de operação ocorre um sobressalto na velocidade de vento de 8 m/s, fazendo com que o tempo de estabilização seja maior. Também pode-se inferir que quanto maior a velocidade do vento menor o tempo de estabilização do sistema eólico.

4.3 Aplicação do controle PID no sistema eólico

O controle PID será aplicado no sistema com o objetivo de controlar a velocidade de rotação na zona de instabilidade do sistema, para isso foi utilizado o circuito mostrado na Figura 2.1 e a programação do algoritmo foi realizada em um microcontrolador Arduíno.

Para a aplicação do controle PID no sistema foi utilizado somente a resistência dos fios ligada diretamente em série com a resistência do motor, com o objetivo de utilizar a resistência como freio eletrônico para o sistema. Para isso é necessário modular este valor de resistência em função da soma dos parâmetros calculados de ganho proporcional k , Tempo integral T_i e Tempo derivativo T_d que constituem o PID.

Os parâmetros do PID foram obtidos através do primeiro método de Ziegler e Nichols que foi descrito acima e posteriormente foi realizada uma sintonia fina através de testes no sistema real para o aprimoramento dos parâmetros do PID (k , T_i e T_d).

A modulação do valor da resistência em função dos parâmetros do PID foi implementada através de um circuito conectado a um microcontrolador Arduino, para a modulação do valor da resistência foram utilizados basicamente a Modulação por Largura de Pulso (PWM) e um transistor.

O transistor de uma forma simplificada foi utilizado como uma chave do circuito, significando uma operação na saturação ou no corte ao longo da reta da carga. Quando o transistor está saturado, é como se houvesse uma chave fechada do coletor para o emissor. quando o transistor esta cortado, é como se a chave estivesse aberta.

O PWM funciona emitindo um pulso de onda quadrada em uma determinada frequência modulada, ele basicamente emite uma tensão nula ou ele emite uma tensão máxima, funcionando como um liga ou desliga. Ao controlarmos a largura do pulso emitido podemos também controlar o valor media entre a carga, conforme mostra a Figura 4.11.

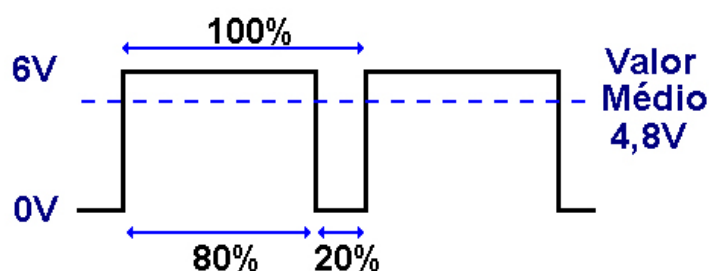


Figura 4.11: Pulso de onda quadrado do PWM relacionado a carga média.

Logo o sistema funcionará como se fosse um relé, o qual o transistor receberá uma frequência de pulso do PWM, assim ele vai abrir e fechar a chave do circuito conforme o tempo de aberto e fechado da onda quadrada emitida e obteremos um valor médio de tensão para cada tamanho da onda quadrada, pode-se observar essa relação na Figura 4.12.

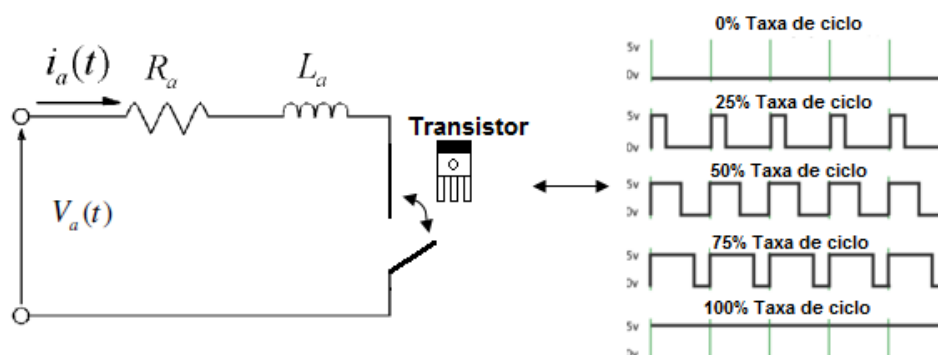


Figura 4.12: Configuração do circuito de controle com a utilização do transistor e da onda PWM.

A modulação da resistência fica em função do ciclo definido pelo PWM, já que o valor médio de tensão obtido para cada onda tem relação direta com o valor da resistência. Por fim a aplicação do controle PID no sistema e dado em função da soma parâmetros calculados em uma relação diretamente proporcional com o valor de carga aplicada pelo PWM, ou seja, para cada valor desejado da velocidade de rotação, o microcontrolador Arduino vai calcular os parâmetros PID e vai relacionar com um determinado valor de carga do PWM que faz com que o sistema estabilize em uma determinada velocidade de rotação.

4.3.1 Resultados experimentais do controlador PID

Afim de comparar os resultados do controlador nas simulações e no sistema real, foi proposta a mesma metodologia de para a obtenção dos resultados. Portanto foram realizados experimentos na turbina eólica também em duas etapas (duas velocidades de vento diferentes) e com os mesmos pontos de operações sugeridos na simulação numérica.

Os ganhos utilizados também foram os mesmos utilizados na simulação representados na Tabela 4.3, afim de comprovar e validar a simulação numérica através dos experimentos. Logo os resultados da aplicação do controle PID no sistema real são relacionados abaixo de acordo com suas respectivas etapas e pontos de operação.

Primeira Etapa: Os resultados são representados para a condição de velocidade do vento de 8 m/s pela pelas Figuras (4.13-4.15), correspondendo aos pontos de operação de 30 rad/s, 70 rad/s e 110 rad/s simultaneamente.

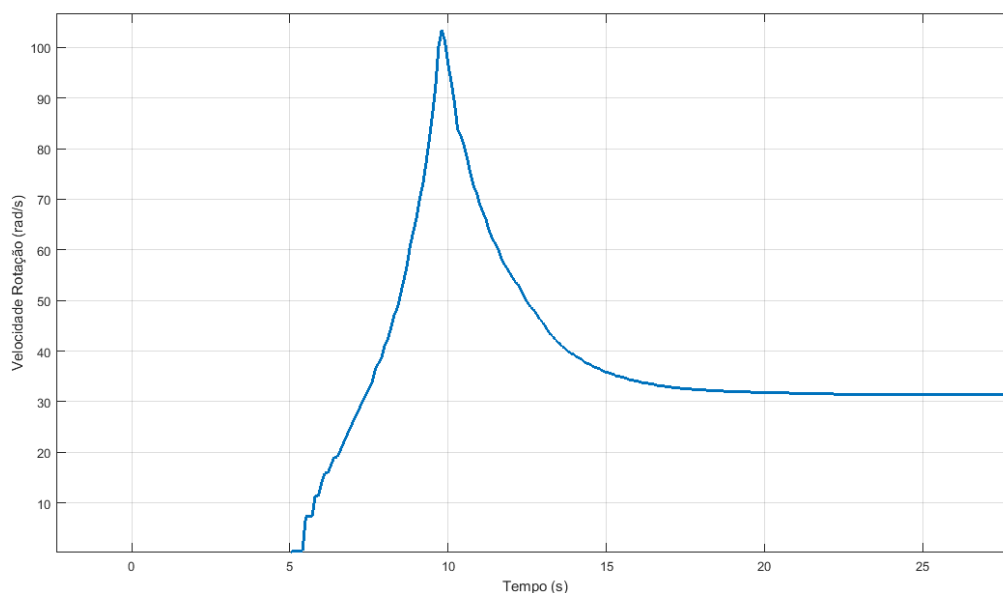


Figura 4.13: Comportamento do controlador PID no sistema real variando no tempo, para o ponto de operação de 30 rad/s para 8 m/s.

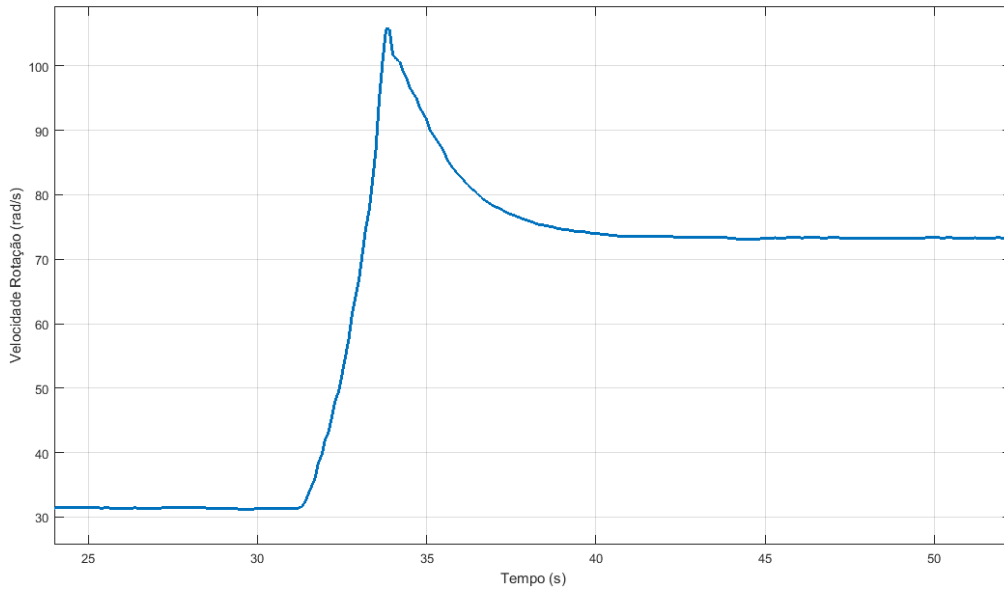


Figura 4.14: Comportamento do controlador PID no sistema real variando no tempo, para o ponto de operação de 70 rad/s para 8 m/s.

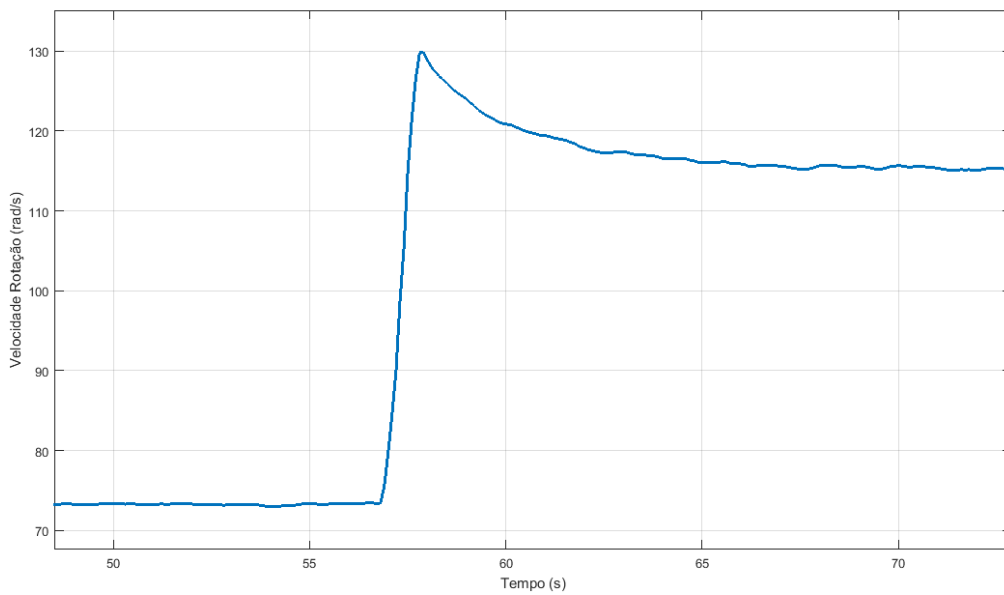


Figura 4.15: Comportamento do controlador PID no sistema real variando no tempo, para o ponto de operação de 110 rad/s para 8 m/s.

Segunda Etapa: Os resultados são representados para a condição de velocidade do vento de 10 m/s pela pelas Figuras (4.16-4.18), correspondendo aos pontos de operação de 30 rad/s, 70 rad/s e 110 rad/s simultaneamente.

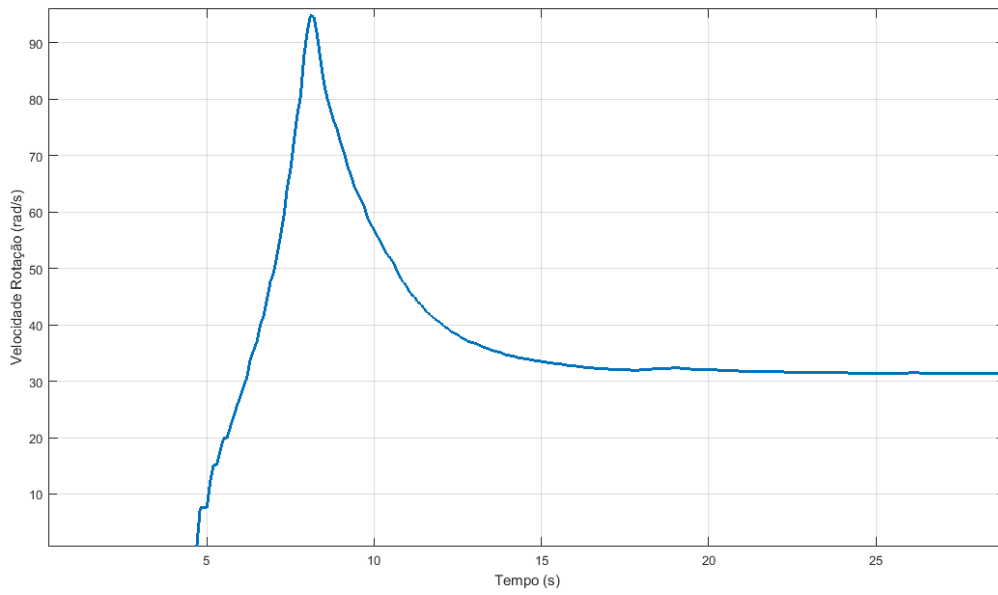


Figura 4.16: Comportamento do controlador PID no sistema real variando no tempo, para o ponto de operação de 30 rad/s para 10 m/s.

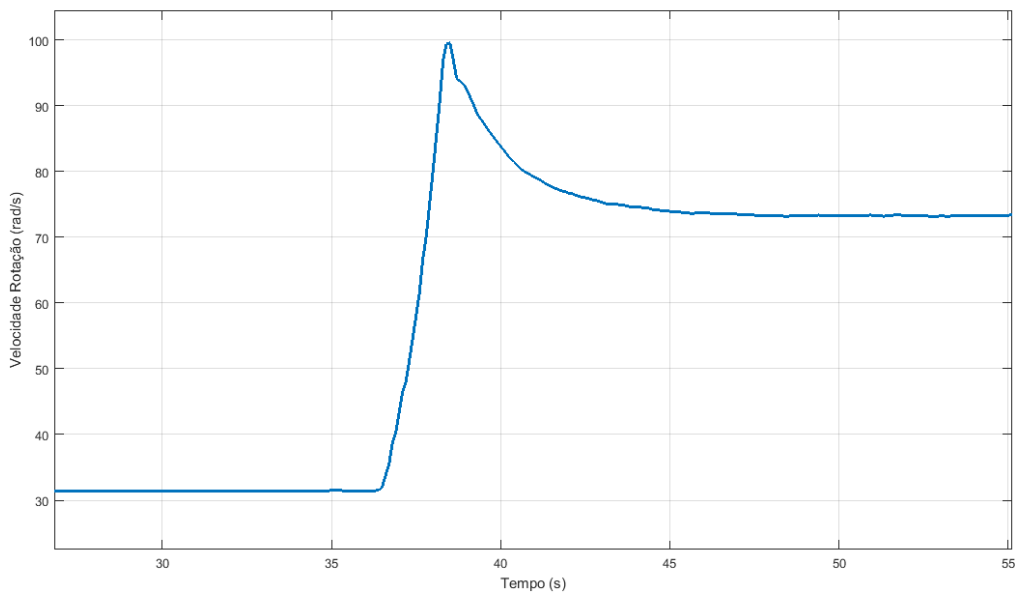


Figura 4.17: Comportamento do controlador PID no sistema real variando no tempo, para o ponto de operação de 70 rad/s para 10 m/s.

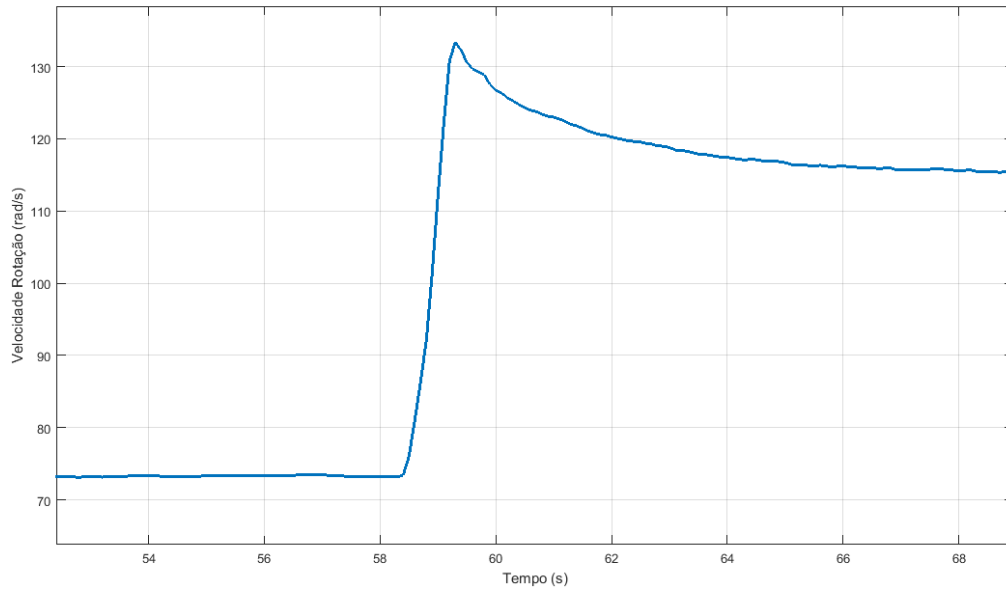


Figura 4.18: Comportamento do controlador PID no sistema real variando no tempo, para o ponto de operação de 110 rad/s para 10 m/s.

Avaliando os resultados experimentais do controlador PID pode-se perceber que estes se parecem com os resultados da simulação, porém em todos os resultados experimentais existe um sobressalto ao ponto de operação, isso pode ser explicado pelo tempo de resposta do PWM, pois como o sistema funciona com programação e acontece dentro de um loop, o controlador só vai passar a agir e aplicar o freio no sistema a partir do momento em que a velocidade de rotação do sensor ultrapassar o ponto de operação escolhido e fazendo assim que haja esse sobressalto.

Em relação a diferença das velocidades de vento serem diferentes, o controlador obteve o mesmo comportamento para todos os pontos de operação nas duas etapas, com um tempo de estabilização de mais ou menos 10 segundos. Observa-se também que quanto maior for o ponto de operação definido para o controlador PID maior vai ser a variação na curva, pois nos pontos de operação de 30 rad/s e 70 rad/s quando o sistema estabiliza a variação da rotação quase não existe, logo quando aumentamos o ponto de operação para 110 rad/s temos um comportamento mais oscilatório em torno do ponto de operação. Por fim pode-se inferir que a estabilização do sistema se dá um pouco fora do ponto de operação, isso ocorre devido a possíveis erros de medida do sensor de rotação e aproximações na transformação de unidades.

Capítulo 5

CONTROLE DE TRAJETÓRIA POR PLANICIDADE DIFERENCIAL

5.1 Controle via planicidade diferencial

A teoria de planicidade diferencial ou controle baseado na planicidade foi introduzida por volta de 1980 por Michel Fliess e outros pesquisadores e desde então eles continuam desenvolvendo pesquisas que proporcionam uma solução eficiente para controle avançado e problema de estimação de estados [49].

Sistema diferencialmente planos pode ser definido: Um sistema $\dot{x} = f(x, u)$ com vetor de estados $x \in R^n$, input vector $u \in R^m$ onde f é um campo vetorial suave, é diferencialmente plano se existe um vetor $y \in R^m$ sob a forma:

$$y = h(x, u, \dot{u}, \dots, u^r) \quad (5.1)$$

De tal modo que:

$$\begin{aligned} x &= \phi(y, \dot{y}, \dots, y^q) \\ u &= \alpha(y, \dot{y}, \dots, y^q) \end{aligned} \quad (5.2)$$

onde h, ϕ e α são funções suaves.

Isso significa que a nova descrição do sistema e dada por m variáveis algébricas de Y_i , $i = 1, 2, \dots, m$. A definição dessas saídas planas foram dadas acima $y = h(x, u, \dot{u}, \dots, u^r)$. Se a saída

plana é exclusivamente uma função do vetor de estados x então o sistema. No entanto, pode haver uma necessidade de expressar a saída plana como não somente em função do vetor de estado x , mas também como uma função de controle de u e de suas derivadas. Isto significa que o vetor de estado do sistema é estendido por considerando como variáveis de estado adicionais as entradas de controle e os suas derivadas [49].

A equação 5.2 mostra que o vetor de estados de um sistema diferencialmente plano e suas entradas de controle podem ser expressados em um função das saídas planas e das derivadas das saídas planas. A questão básica que surge no estudos de planicidade diferencial é se, dado as equações diferenciais que descrevem o sistema dinâmico não linear $\dot{x} = f(x, u)$, há um função $y = h()$ dado por $y = h(x, u, \dot{u}, \dots, u^r)$, de tal modo que o vetor de estados do sistema x e a entrada de controle u podem ser expressadas em função de y e de suas derivadas [49].

Segundo Martin [50], se o sistema é diferencialmente plano, pode-se construir uma realimentação linearizante endógena e um difeomorfismo que transforma o sistema em malha fechada a um sistema linear controlável composto por uma cadeia de integradores puros, cujas saídas planas são as próprias saídas do sistema. Esse tipo de representação de sistemas lineares é conhecido como forma canônica de Brunovsky e pode ser descrita da seguinte forma:

$$F_j^{k_j^C} = \nu_j, j = 1, \dots, m \quad (5.3)$$

Com k_j^C sendo os índices de controlabilidade de Kronecker do sistema linear [51] e ν_i sendo uma realimentação endógena obtida a partir da equação 5.2.

Dessa forma, a vantagem de ser diferencialmente plano não consiste somente em realizar a linearização exata do sistema, mas também, ao identificar as saídas planas do sistema, permite-se reduzir problemas de estabilização ou acompanhamento de trajetória definidos para o sistema a um problema correspondente definido em relação às saídas planas [52].

Assim, a planicidade diferencial facilita a realização dessas tarefas independente da natureza da dinâmica interna associada com as variáveis de saída. No entanto, essa independência fica limitada as condições iniciais e finais das trajetórias especificadas as variáveis do sistema, além de possíveis restrições físicas do sistemas como, por exemplo, saturação dos atuadores. Essa abordagem é de elevado interesse no caso das saídas planas apresentarem um significado físico como, por exemplo, as coordenadas de posição de um ponto de um corpo no espaço [53].

5.1.1 Saídas Planas

A propriedade planicidade diferencial permite que todas as variáveis do sistema dinâmico sejam completamente parametrizadas em termos de um conjunto finito de variáveis independentes, que são as saídas planas do sistema, além de um número finito de derivadas temporais. As saídas planas juntamente com suas derivadas temporais determinam os possíveis estados do sistema com o auxílio das entradas de controle. O número de saídas planas é igual ao número de variáveis de

controle do sistema.

Um sistema diferencialmente plano permite que saídas planas sejam encontradas. As entradas e as saídas do sistema são determinadas como função das saídas planas e de suas derivadas temporais, sem a necessidade de se resolver operações de integração. Em outras palavras, todas as variáveis do sistema (estados, saídas e entradas) podem ser expressas em função da saída plana.

O processo de determinação das saídas planas de um sistema é baseado no conceito de controlabilidade. Um sistema é dito controlável se o seu posto, definição que representa o maior número de submatrizes não nulas linearmente independentes referentes à matriz de controlabilidade C_k , é igual à ordem do sistema. Desta forma, a matriz de controlabilidade C_k para sistemas não-lineares é definida por [54], definido da seguinte forma:

$$C_k = [g_2, \text{adj}_{g_1} g_2, \dots, \text{adj}_{g_1}^{n-1} g_2] \quad (5.4)$$

Onde g_1 e g_2 pertencem a um campo vetorial de dimensão n e $\text{adj}_{g_1} g_2$ é a matriz adjunta do campo vetorial.

5.1.2 Propriedades de sistemas diferencialmente planos

Uma propriedade básica de sistemas diferencialmente planos é que através de uma alteração das variáveis (difeomorfismo) ela pode ser transformada para uma descrição equivalente, que é a forma canônica linear (Brunovsky). Este é analisado seguinte e representa o Lie-Backlund isomorfismo de equivalência e nivelamento diferencial [49].

Primeiro um sistema dinâmico da seguinte forma e considerado:

$$\dot{x} = f(x) \quad x \in X \subset R^n \quad (5.5)$$

Isto é descrito pelo par (X, f) , onde X é definido em R^n e f é um campo vetorial em X . Uma trajetória é considerada uma função $t \rightarrow x(t)$ de tal modo que $\dot{x}(t) = f(x(t)) \forall t \geq 0$. Pode-se considerar também o mapeamento de saída $x \rightarrow h(x)$ para o qual detém:

$$\frac{\partial}{\partial t} h(x(t)) = \frac{\partial h}{\partial t}(x(t)) \dot{x}(t) = \frac{\partial h}{\partial t}(x(t)) f(x(t)) \forall t \geq 0 \quad (5.6)$$

A equação 5.6 mostra a derivada total, $\frac{\partial h}{\partial t}(x(t)) \cdot f(x(t))$ também chamada de derivada temporal de uma função h , sendo identificada por \dot{h} .

Em seguida, as noções de derivada total e da derivada temporal da função h pode ser generalizada para o caso de um sistema não linear com entrada de controle:

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (5.7)$$

Onde $X \times U \in R^n \times R^m$. Aqui, f não é mais um campo de vetores, mas é uma coleção infinita de campos vetoriais parametrizados por u . Na verdade, para cada u a função $x \rightarrow f_u(x) = f(x, u)$ é um campo vetorial em X . Pode-se também considerar o caso de feedback dinâmico em que o vetor de estado do sistema é estendido ao definir como elemento de vetor de estado a entrada de controle (e suas derivadas), enquanto que as equações que descrevem a dinâmica do sistema são estendidas como se segue:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u) \\ \dot{u} &= \nu \end{aligned} \quad (5.8)$$

5.1.3 Processo planejamento de trajetória para o sistema real

O planejamento de trajetória, de acordo com Betts [55], é uma técnica que permite o desenvolvimento de uma lei de controle em malha aberta para um sistema não linear $\dot{x} = f(x, u)$ que leva a dinâmica do sistema para um estado inicial $(x(t_0), u(t_0))$ para um equilíbrio final de estado $(x(t_f), u(t_f))$.

Observando a equação 5.1, é possível obter as saídas planas $(y(t_0), y(t_f))$ se as condições iniciais e finais da saída x e das entradas u forem conhecidas. O fato é que para que o sistema apresentado neste trabalho seja plano implica que a saída planejável z pode ser plana pelas funções suaves (ϕ, α) que obedecem $y(t_0)$ e $y(t_f)$.

Assim para de identificar $y(t)^*$, as trajetórias desejadas $x(t)^*$ e $u(t)^*$ são determinadas pela equação 5.2 e suas derivadas. Como resultado, isso não é necessário para realizar a resolução de qualquer equação diferencial do sistema. Como o sistema eólico demonstrado na equação 3.31 é diferencialmente plano com saídas planas y representada pela velocidade de rotação x_1 , a parametrização associada as saídas planas e suas derivadas temporais e descrito de acordo com:

$$x_2 = \frac{1}{K_T} [c_0 x_1^4 + c_1 x_1^3 + c_2 x_1^2 + c_3 x_1 + c_4 - J \dot{x}_1] \quad (5.9)$$

$$\begin{aligned} R_e &= -R_a + \frac{K_V}{x_2} [x_1] - \frac{4c_0 L_a}{K_T x_2} [x_1^3 \dot{x}_1] - \frac{3c_1 L_a}{K_T x_2} [x_1^2 \dot{x}_1] - \frac{2c_2 L_a}{K_T x_2} [x_1 \dot{x}_1] \\ &\quad - \frac{c_3 L_a}{K_T x_2} [\dot{x}_1] + \frac{J L_a}{K_T x_2} [\ddot{x}_1] \end{aligned} \quad (5.10)$$

Pode-se notar que a corrente x_2 depende somente da velocidade de rotação x_1 e a resistência externa R_e é dependente de x_2 . Então, R_e depende somente de x_1 .

Vale mencionar que no instante em que a turbina começa a operar, a influência do vento implica que o sistema alcance uma condição de equilíbrio (x_{1eq}, x_{2eq}) do qual $R_e = 0$. Se $x_{1*} < x_{1eq}$, valores negativos de R_e vão ser necessários para alcançar a condição de equilíbrio.

O rastreamento de trajetória é uma técnica que possui um papel importante no controle do processo porque este garante uma melhor confiabilidade do sistema na presença de distúrbios e ruídos. Para garantir o rastreamento de trajetória, foi realizada a parametrização do sistema na equação 3.31 transformando-a na forma canônica de Brunovski, como mostrado a seguir:

$$\ddot{x}_1 = f_1(x_p) + f_2(x_p)R_e = \nu \quad (5.11)$$

Com

$$x_p = [x_1 \dot{x}_1]^T \quad (5.12)$$

Sendo $f_1(x_p)$ e $f_2(x_p)$ definidos da seguinte forma:

$$f_1(x_p) = \frac{1}{JL_a} [(c_4 R_a) + (c_3 R_a)x_1 + (4c_0 L_a)x_1^3 \dot{x}_1 + (3c_1 L_a)x_1^2 \dot{x}_1 + (2c_2 L_a)x_1 \dot{x}_1 + (c_3 L_a - J R_a)\dot{x}_1 + (c_0 R_a)x_1^4 + (c_1 R_a)x_1^3 + (c_2 R_a)x_1^2] \quad (5.13)$$

$$f_2(x_p) = \frac{1}{JL_a} [c_0 x_1^4 + c_1 x_1^3 + c_2 x_1^2 + c_3 x_1 + c_4 - J \dot{x}_1] R_e \quad (5.14)$$

A parametrização diferencial significa que o sistema representado na equação 3.31 é equivalente a uma segunda ordem de integradores de cadeia. A saída plana e sua derivadas no tempo são incluídas no vetor de estados x_p . Então o espaço de estados do sistema eólico na forma canônica é definido como:

$$\dot{x}_p = A x_p + B \nu, \quad y = C x_p \quad (5.15)$$

Com

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

Neste contexto, a tarefa do rastreamento de trajetória é garantir que a saída plana e suas derivadas temporais convirjam para a trajetória nominal.

Para isso, a estrutura de controle é acoplada com a expressão do planejamento de trajetória, reduzindo significativamente o erro de rastreamento. Levine [13] define o erro de trajetória e como

uma função das saídas planas x_1 e a saída plana desejada x_1^* , de acordo com $e = x_1 - x_1^*$. logo o erro dinâmico de rastreamento e definido por:

$$\ddot{e} - \ddot{e}^* + k_1\dot{e} + k_0e = 0 \quad (5.17)$$

Onde k_1 e k_0 representam os ganhos dos controladores, que são assumidos como coeficientes do polinômio de Hurwitz's $p(s) = s^2 + k_1s + k_0$ a fim de assegurar uma convergência assintótica para zero. Logo $\nu = \ddot{x}_1$, e a equação 5.17 pode ser reescrita como:

$$\nu = \nu^* - k_1\dot{e} - k_0e \quad (5.18)$$

Finalmente, substituindo o termo de maior ordem \ddot{x}_1 que é representado pela equação 5.18 na equação 5.10, tem-se a expressão final do controlador por planicidade diferencial. No entanto, quando o erro de trajetória é zero, a saída plana x_1 e todas suas derivadas temporais convergem para a trajetória nominal.

5.2 Simulações numéricas para o controlador via Planicidade diferencial

As simulações numéricas do controlador via planicidade diferencial foram realizadas por meio do software MATLAB[®] e da ferramenta Simulink. Este controlador é derivado de manipulações algébricas do modelo não linear da turbina eólica, que posteriormente reproduz o sistema na forma canônica de brunovski e por fim tem seu funcionamento em função do termo de correção, entradas planas e saídas planas.

Esta metodologia de controle pode ser definida basicamente em dois blocos distintos, um representando o modelo não linear e outro representando o controlador. No bloco do controlador são definidas as etapas de planejamento de trajetória e rastreamento de trajetória como visto na seção anterior. A estrutura da simulação numérica do controlador via planicidade diferencial pode ser observada na Figura 5.1.

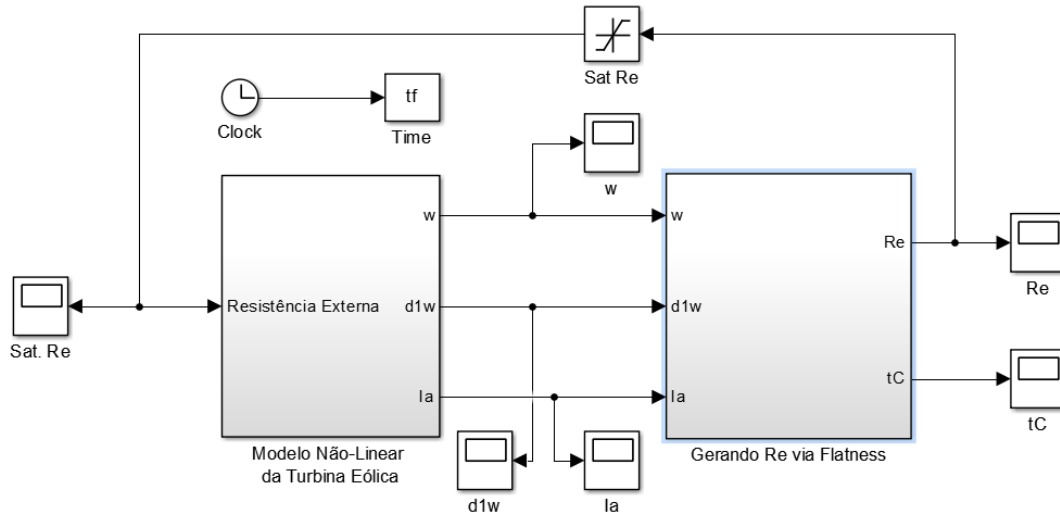


Figura 5.1: Estrutura do controlador via planicidade diferencial no Simulink.

Para a simulação numérica do controlador no sistema foram utilizados os parâmetros identificados na Tabela 3.4.

A estratégia utilizada foi a mesma do controlador PID, em duas etapas (duas velocidades de ventos) e com os mesmos pontos de operação, tendo em vista a comparação dos resultados dos métodos de controle aplicados na turbina.

Logo os resultados das simulações do controlador via planicidade diferencial na turbina podem ser demonstrados conforme as etapas descritas abaixo:

Primeira Etapa: Os resultados são representados para a condição de velocidade do vento de 8 m/s pela pelas Figuras (5.2-5.4), correspondendo aos pontos de operação de 30 rad/s, 70 rad/s e 110 rad/s simultaneamente.

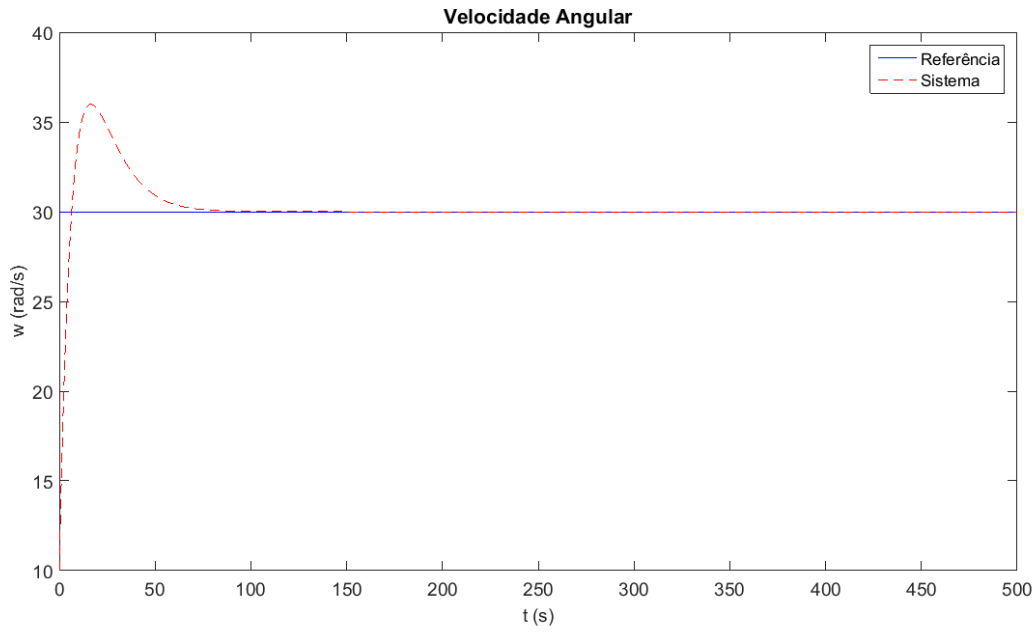


Figura 5.2: Comportamento do controlador via planicidade diferencial variando no tempo, para o ponto de operação de 30 rad/s para 8 m/s.

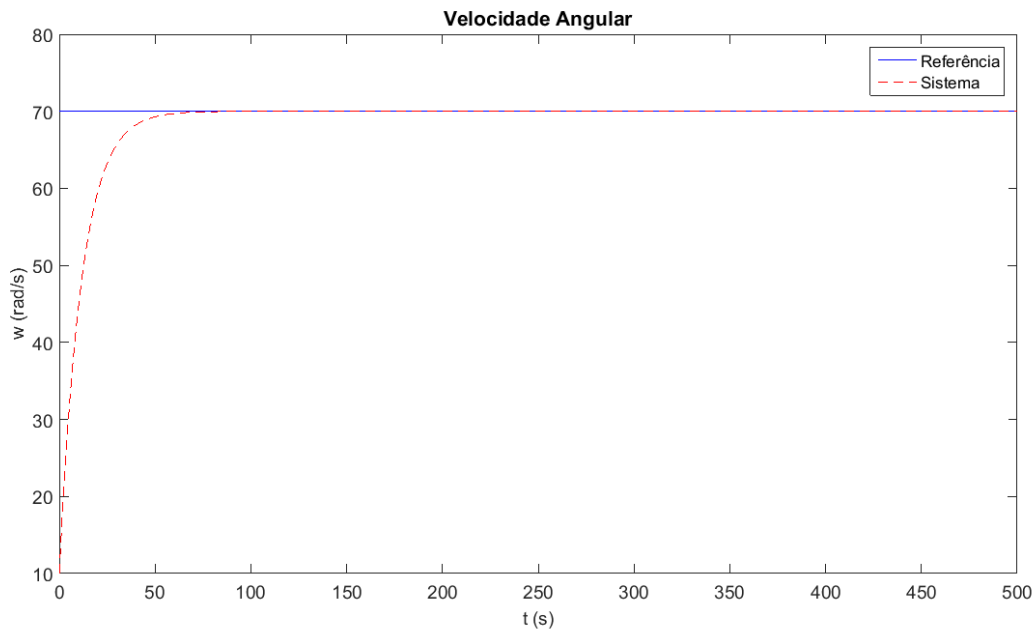


Figura 5.3: Comportamento do controlador via planicidade diferencial variando no tempo, para o ponto de operação de 70 rad/s para 8 m/s.

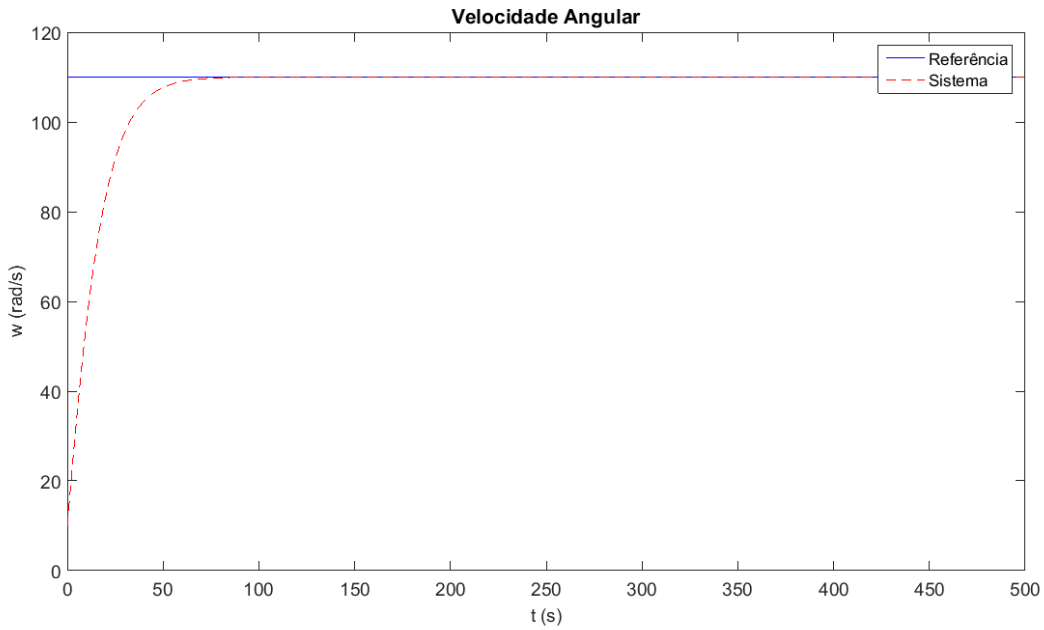


Figura 5.4: Comportamento do controlador via planicidade diferencial variando no tempo, para o ponto de operação de 110 rad/s para 8 m/s.

Segunda Etapa: Os resultados são representados para a condição de velocidade do vento de 10 m/s pela pelas Figuras (5.5-5.7), correspondendo aos pontos de operação de 30 rad/s, 70 rad/s e 110 rad/s simultaneamente.

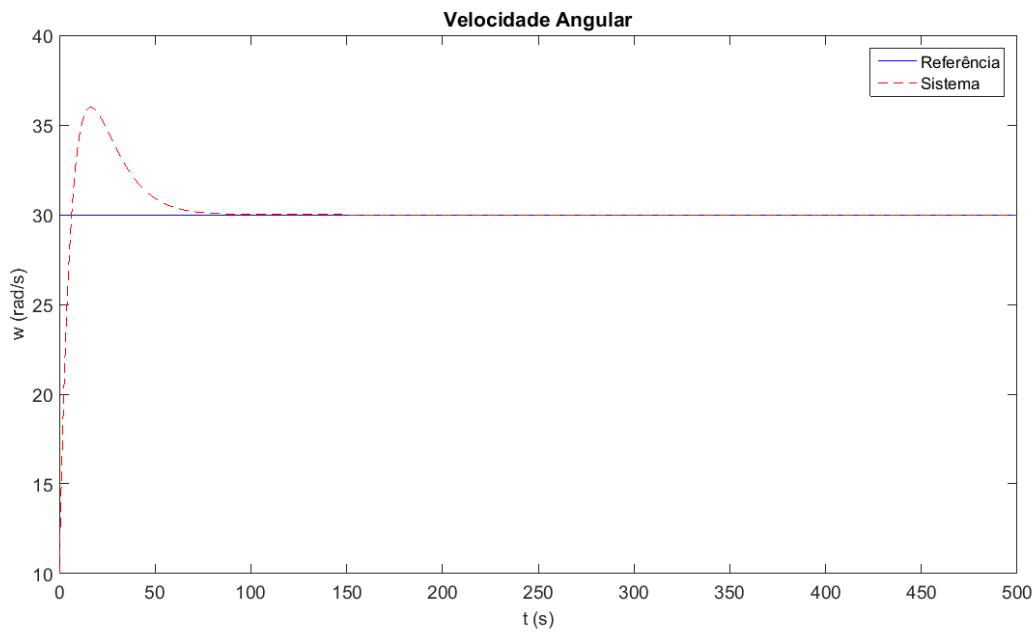


Figura 5.5: Comportamento do controlador via planicidade diferencial variando no tempo, para o ponto de operação de 30 rad/s para 10 m/s.

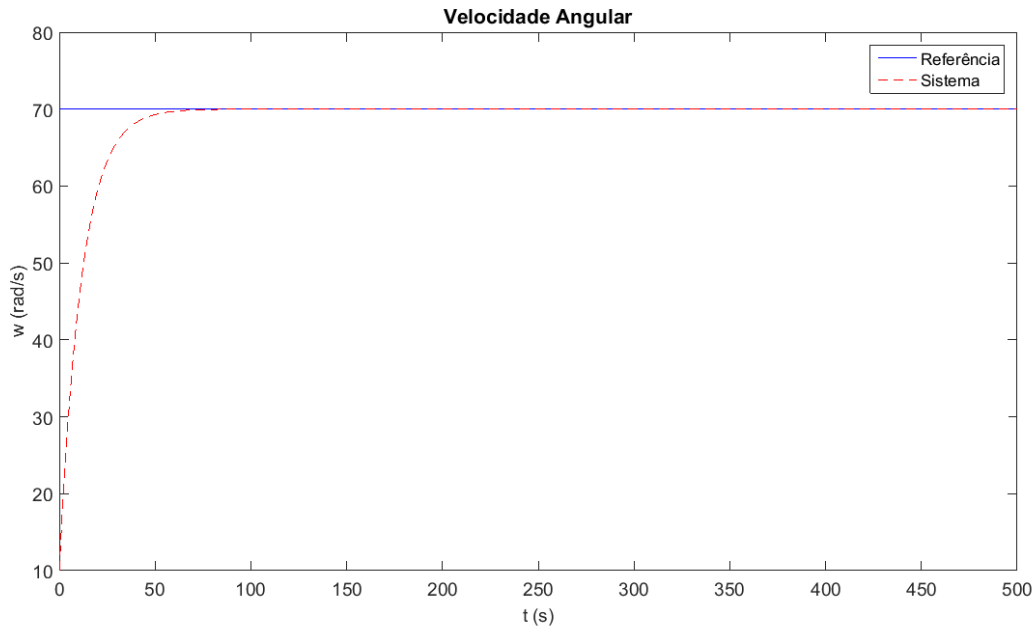


Figura 5.6: Comportamento do controlador via planicidade diferencial variando no tempo, para o ponto de operação de 70 rad/s para 10 m/s.

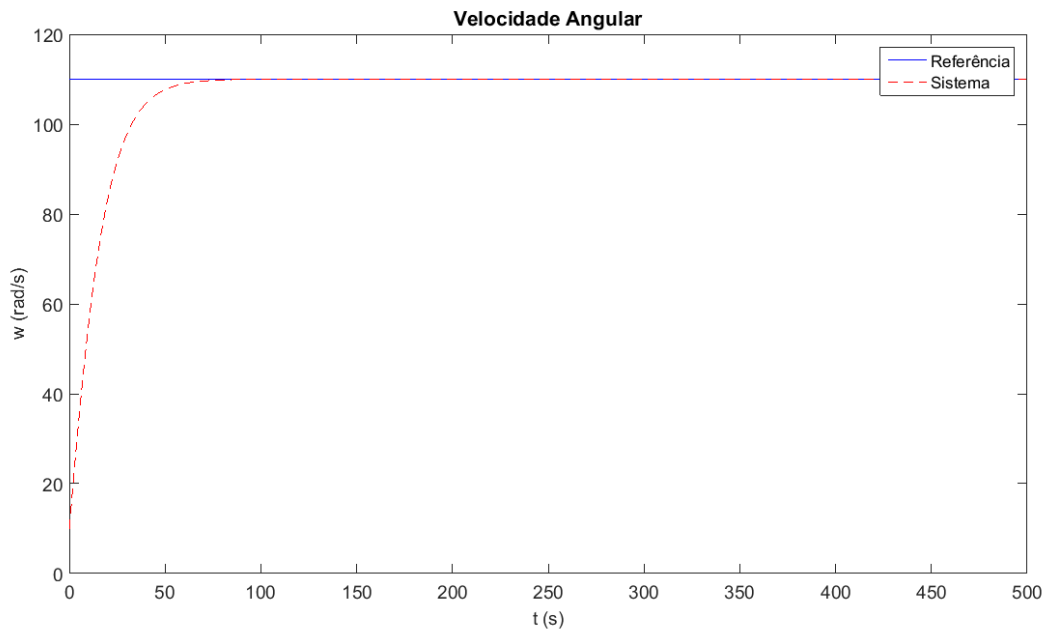


Figura 5.7: Comportamento do controlador via planicidade diferencial variando no tempo, para o ponto de operação de 110 rad/s para 10 m/s.

As simulação do controlador via planicidade diferencial obtiveram resultados praticamente iguais, indiferentemente da velocidade de vento escolhida ou do ponto de operação. Este tipo de controlador a nível de simulação é muito preciso e o processo do rastreamento de trajetória

utilizando as derivadas temporais nas entradas e saídas fazem com que algumas diferenças de erro como por exemplo a dos coeficientes de potência para as diferentes velocidades de vento sejam praticamente desconsideradas. Apesar de não haverem diferenças nos resultados das simulações numéricas para as etapas e pontos de operação, o controlador via planicidade diferencial é capaz de estabilizar o sistema eólico corretamente nos pontos de operação, obtendo uma constante de tempo de estabilização muito rápida e assim demonstrando à nível de simulação ser uma ótima opção de controlador.

5.3 Aplicação do controle via planicidade diferencial no sistema eólico

Diferentemente do controlador PID que pode ser aplicado diretamente dos dados de rotação do sistema eólico real, a implementação do controlador via planicidade diferencial no sistema real depende das simulações do modelo, pois para a aplicação deste controlador é necessária a manipulação algébrica das expressões obtidas como foi demonstrado nas Equações (5.9-5.14).

Tendo em vista que o controlador funcionará em função de sua entrada R_e resistência externa e sua saída x_1 velocidade de rotação, o circuito que foi utilizado na Figura 4.13 para o controlador PID não será o mesmo para o controlador via planicidade diferencial.

Este possuirá duas resistências ligadas em paralelo que além de servirem como divisor de corrente, irão reproduzir o valor da resistência externa R_e calculada pelo modelo. O circuito utilizado para o controlador via planicidade diferencial pode ser representado pela Figura 5.8.

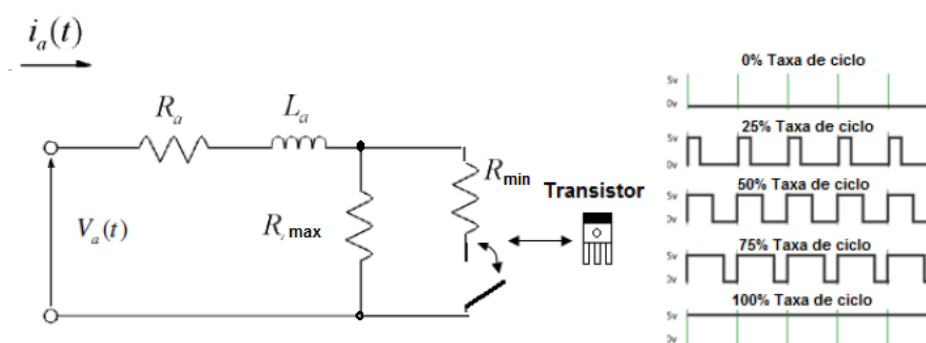


Figura 5.8: Circuito adaptado com as resistências externas para a aplicação da planicidade diferencial.

onde $R_{max} = 27\Omega$ e $R_{min} = 1\Omega$.

A relação com o PWM se dará da mesma forma que foi utilizado na metodologia do controlador PID e esta representado na figura acima. O qual o transistor funcionará como um relé para modular o valor da resistência de acordo com o valor da taxa de frequência do PWM emitida, logo quando o circuito estiver totalmente aberto $R_e = R_{max}$ e quando o circuito estiver totalmente fechado

$R_e = R_{eq}$. O valor da resistência equivalente R_{eq} pode ser calculado da seguinte forma:

$$R_{eq} = \frac{R_{max} + R_{min}}{R_{max}R_{min}} \quad (5.19)$$

Para a aplicação do controle via planicidade diferencial se faz necessário fazer um mapeamento da relação entre o valor da taxa de frequência do PWM, com o valor correspondente obtido de resistência externa R_e calculada pelo modelo na expressão final do controlador (Equação 5.10).

Com isso é feita uma curva de calibração para estes dois valores, e esta pode ser representada conforme a seguinte equação:

$$PWM = \frac{R_e - 27.08095}{-25.34285} \quad (5.20)$$

Logo para cada valor de velocidade de rotação que o sensor de rotação receber, será calculado o valor de R_e pela expressão final do controlador via planicidade diferencial e assim será determinado o valor correspondente de taxa de frequência do PWM como entrada no circuito.

5.4 Resultados experimentais do controlador via planicidade diferencial

A obtenção dos resultados da aplicação do controlador via planicidade diferencial no sistema eólico real foram obtidos utilizando os parâmetros da Tabela 3.4 e os valores dos coeficientes das curvas de potencias para 8 m/s e 10 m/s.

Na expressão do termo de correção ν na Equação 5.18, foi adicionado um ganho integral k_i a fim de garantir a estabilização do sistema, logo o termo de correção do controlador pode ser definido da seguinte forma:

$$\nu = \nu^* - k_1 \dot{e} - k_0 e - k_i \int^t e(s) ds \quad (5.21)$$

Os ganhos utilizados para o controlador via planicidade diferencial podem ser representados na Tabela 5.1:

Tabela 5.1: Valores dos ganhos k_1 , k_0 e k_i utilizados no sistema real.

<i>Ganho</i>	<i>Valor</i>
k0	7.5
k1	15
ki	1.25

Os ensaios para a obtenção dos resultados foram realizados do mesmo modo que os ensaios anteriores, em duas etapas cada uma com 3 pontos de operação diferentes, tendo em vista a comparação dos resultados dos controladores aplicados e das simulações numéricas anteriores.

Logo o resultado pode ser demonstrado conforme as etapas abaixo:

Primeira Etapa: Os resultados são representados para a condição de velocidade do vento de 8 m/s pela pelas Figuras (5.9-5.11), correspondendo aos pontos de operação de 30 rad/s, 70 rad/s e 110 rad/s simultaneamente.

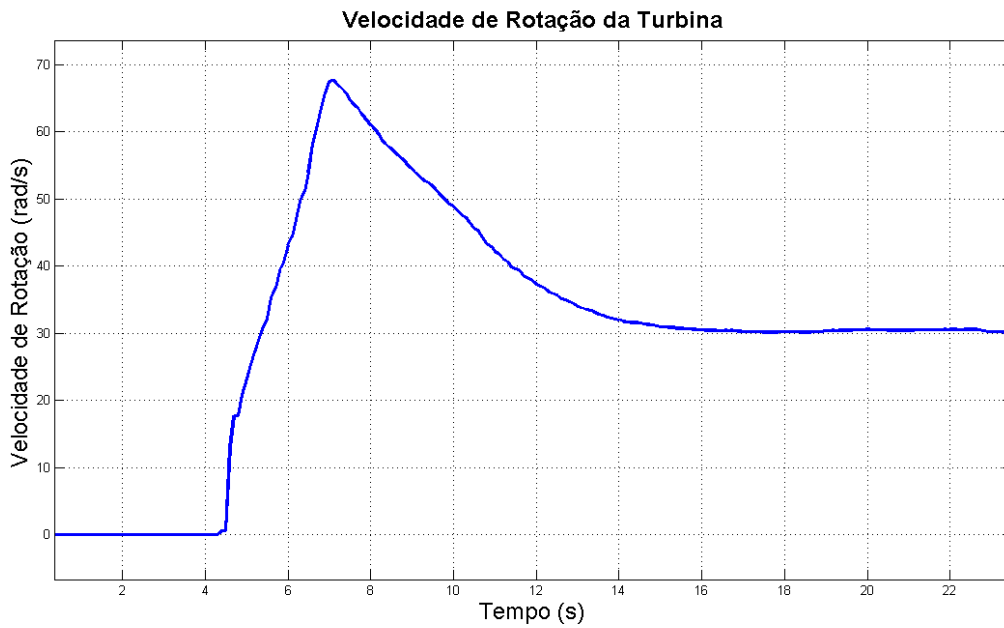


Figura 5.9: Comportamento do controlador via planicidade diferencial no sistema real variando no tempo, para o ponto de operação de 30 rad/s para 8 m/s.

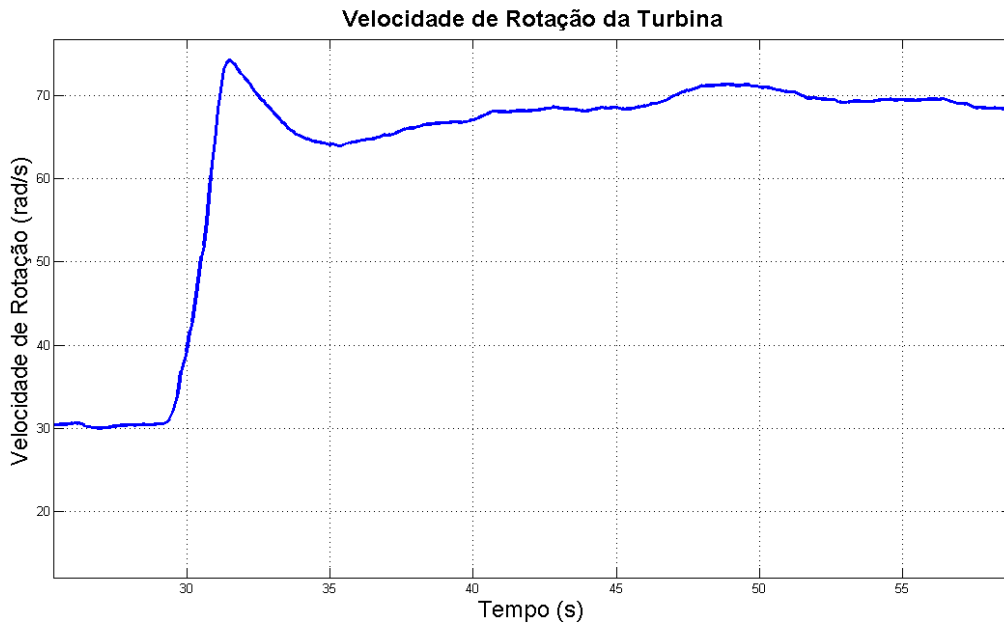


Figura 5.10: Comportamento do controlador via planicidade diferencial no sistema real variando no tempo, para o ponto de operação de 70 rad/s para 8 m/s.

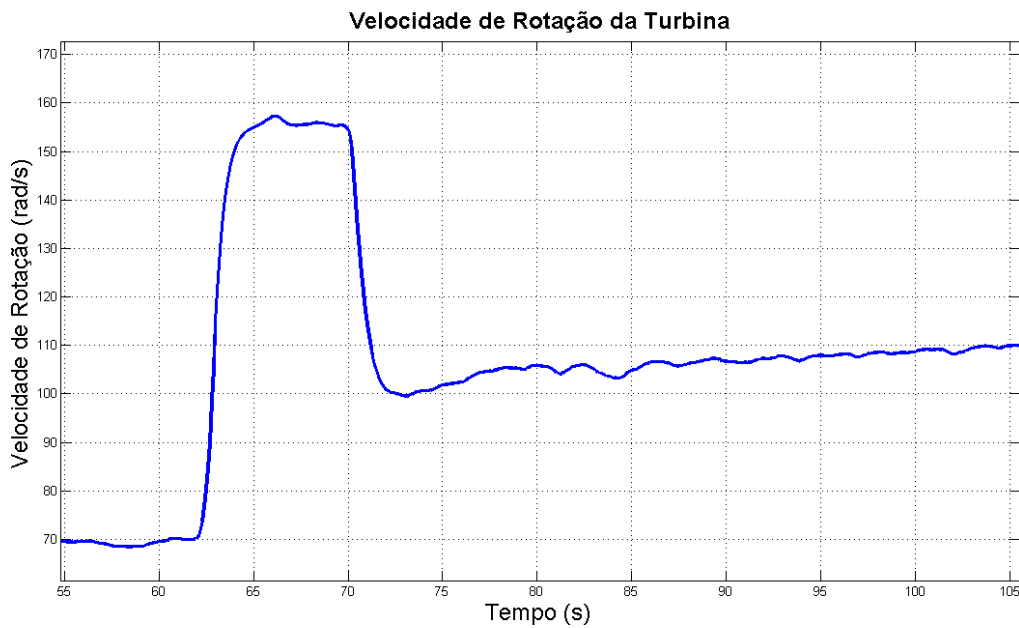


Figura 5.11: Comportamento do controlador via planicidade diferencial no sistema real variando no tempo, para o ponto de operação de 110 rad/s para 8 m/s.

Segunda Etapa: Os resultados são representados para a condição de velocidade do vento de 10 m/s pela pelas Figuras (5.12-5.14), correspondendo aos pontos de operação de 30 rad/s, 70 rad/s e 110 rad/s simultaneamente.

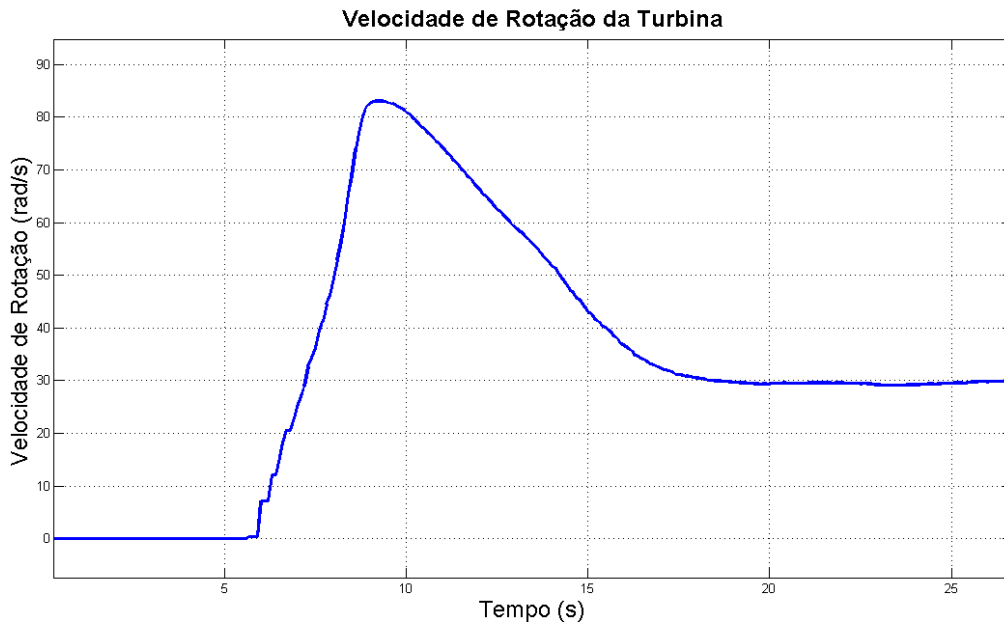


Figura 5.12: Comportamento do controlador via planicidade diferencial no sistema real variando no tempo, para o ponto de operação de 30 rad/s para 10 m/s.

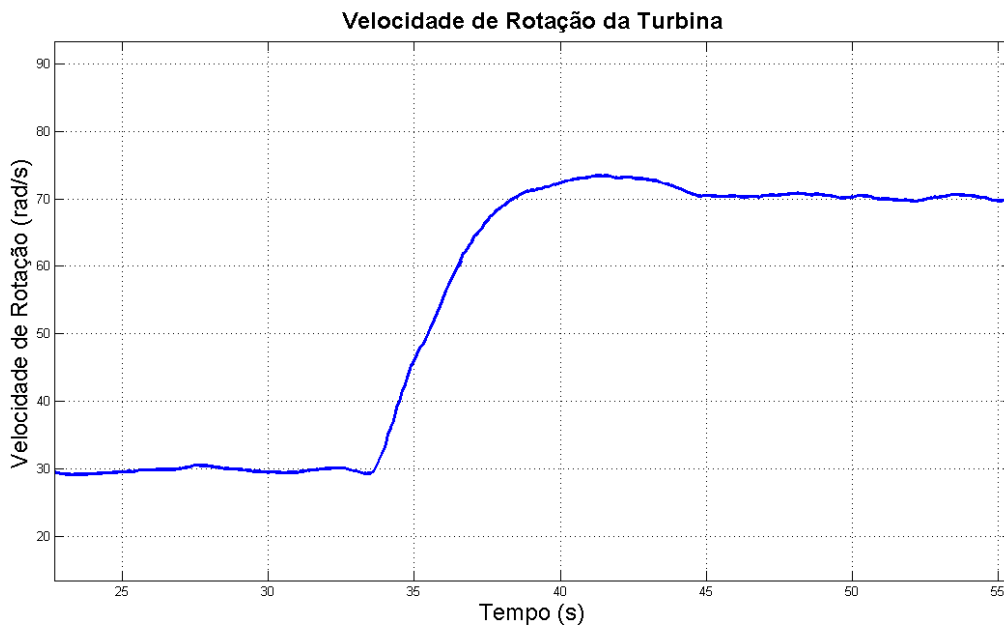


Figura 5.13: Comportamento do controlador via planicidade diferencial no sistema real variando no tempo, para o ponto de operação de 70 rad/s para 10 m/s.

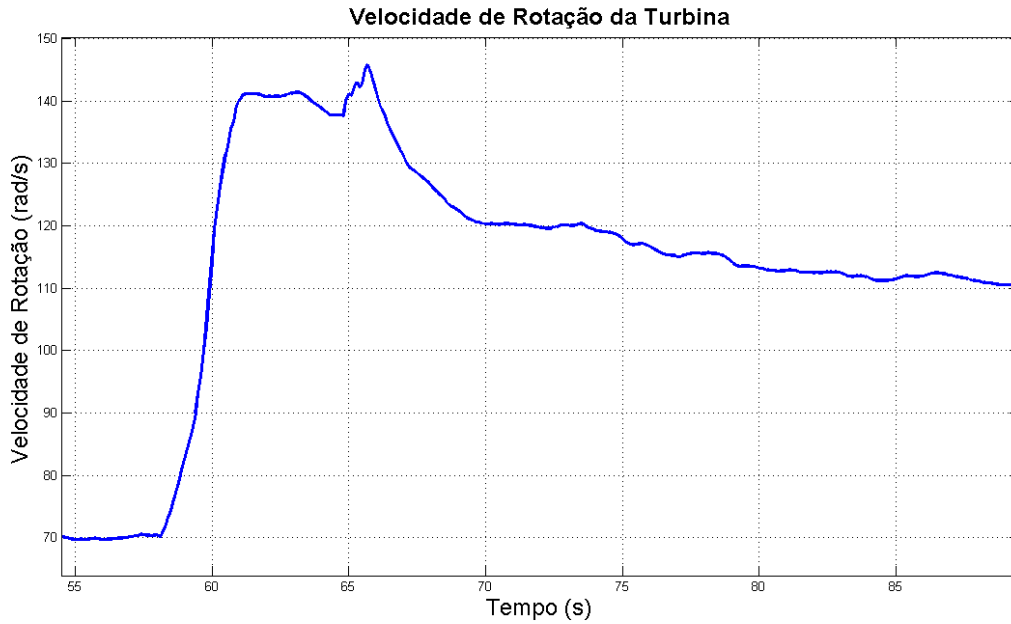


Figura 5.14: Comportamento do controlador via planicidade diferencial no sistema real variando no tempo, para o ponto de operação de 110 rad/s para 10 m/s.

Diferentemente do observado nas simulações numéricas, na aplicação do controlador via planicidade diferencial experimental houve uma diferença considerável para as duas velocidades de vento, isso pode ser explicado pela necessidade do mapeamento da relação entre a resistência externa calculada pela expressão final do controlador e a taxa de frequência do PWM. Pode-se observar que também existe um sobressalto aos pontos de operação nas curvas experimentais, isso pode ser explicado pelo mesmo caso explicado no controlador PID, que isso ocorre por causa do tempo de resposta ate controlador entender o erro no programa e aplicar o freio através do PWM.

Pode-se inferir que a relação entre tempo de estabilização da simulação e do experimental foi coerente, possuindo um tempo de estabilização de mais ou menos 8 a 10 segundos. Também pode-se observar que assim como na aplicação do PID, conforme o ponto de operação aumenta mais demora para estabilizar consequentemente o sistema possui uma maior variação na curva quando o sistema estabiliza. Por fim ao analisarmos o comportamento geral do controlador via planicidade diferencial, observa-se que a velocidade de rotação do sistema estabiliza-se corretamente nos pontos de operação.

Por ser implementado através do modelo não linear do sistema, o processo de aquisição dos dados pode ter gerado uma imprecisão nos ganhos do controlador via planicidade diferencial, o que pode ser facilmente reavaliado com um ajuste fino tanto na aquisição dos parâmetros do sistema como com um ajuste finos dos ganhos para a otimização do controlador.

Capítulo 6

CONCLUSÕES

O manuscrito teve como objetivo utilizar métodos de modelagem citados na literatura, adaptar a modelagem para uma turbina eólica em escala reduzida, validar o modelo através de simulações numéricas e aplicar tecnologias de controle como opção de freio eletrônico para o controlador utilizando uma resistência externa como entrada. Tendo em vista os objetivos do trabalho pode-se concluir que:

- A modelagem permitiu a representação do sistema a nível de simulação, validada experimentalmente.
- A definição da área de instabilidade do sistema foi corretamente representada através do método de linearização tangente, validada experimentalmente.
- A estratégia de utilização da resistência externa como freio eletrônico para o sistema funcionou.
- Ambos os controladores tanto PID quanto por Planicidade diferencial, foram aplicados em nível de simulação e experimental. Logo os resultados dos controladores funcionaram e estabilizaram a velocidade de rotação na zona de instabilidade encontrada.

6.1 Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros seguem algumas sugestões:

Implementação de um filtro de kalman no sistema não linear e no sistema real. Este pode ser implementado em ambos com a proposta de melhorar a estimação das variáveis, principalmente por causa dos sensores que estão sujeitos a erro, para que assim se possa reduzir o ruído e otimizar o processo de controle.

Um outro ponto que poderia ser estudado e implementado em trabalhos futuros seria encontrar de forma automática o valor da velocidade de rotação que possibilite adquirir os valores dos coeficientes da curva de potência em função da variação da velocidade do vento.

6.2 Publicações

O desenvolvimento deste trabalho contribuiu para as seguintes publicações:

- SUEHARA, B.B; ALMEIDA, R.Q.; LIMAVERDE FILHO, J.O.A.; FORTALEZA, E.L. *Control of the Angular Speed of Wind Turbine: A Flatness Based Approach. In: Proc. XII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI 2015). Natal, Rio Grande do Norte. Brasil. 2015*
- ALMEIDA, R.Q.; SUEHARA, B.B; LIMAVERDE FILHO, J.O.A.; FORTALEZA, E.L. *Modelagem e Análise de Estabilidade para Curvas de Potência em Turbinas Eólicas. In: Proc. XII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI 2015). Natal, Rio Grande do Norte. Brasil. 2015*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] HERBERT, G. J. et al. A review of wind energy technologies. *Renewable and sustainable energy Reviews*, Elsevier, v. 11, n. 6, p. 1117–1145, 2007.
- [2] CROWDER, R. *Electric Drives and Electromechanical Systems: Applications and Control*. [S.l.]: Newnes, 2006.
- [3] YUCE, M. I.; MURATOGLU, A. Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 43, p. 72–82, 2015.
- [4] MENDES, R. C. F. Estudo do fator de indução axial em turbinas de eixo horizontal. 2016.
- [5] SINGH, M. et al. *Simulation for Wind Turbine Generators–With FAST and MATLAB-Simulink Modules*. [S.l.], 2014.
- [6] MELÍCIO, R.; CATALÃO, J. P.; MENDES, V. M. *Wind turbines with permanent magnet synchronous generator and full-power converters: modelling, control and simulation*. [S.l.]: INTECH Open Access Publisher, 2011.
- [7] BURTON, T. et al. *Wind energy handbook*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2001.
- [8] HASSAN, H. et al. A robust lmi-based pitch controller for large wind turbines. *Renewable energy*, Elsevier, v. 44, p. 63–71, 2012.
- [9] BOUKHEZZAR, B.; SIGUERDIDJANE, H. Nonlinear control of variable speed wind turbines without wind speed measurement. In: IEEE. *Decision and Control, 2005 and 2005 European Control Conference. CDC-ECC'05. 44th IEEE Conference on*. [S.l.], 2005. p. 3456–3461.
- [10] VIDAL, Y. et al. Power control design for variable-speed wind turbines. *Energies*, Molecular Diversity Preservation International, v. 5, n. 8, p. 3033–3050, 2012.
- [11] HAWKINS, T. et al. Wind turbine power capture control with robust estimation. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *ASME 2010 Dynamic Systems and Control Conference*. [S.l.], 2010. p. 895–902.
- [12] ALDWAIHI, H. A.; DELALEAU, E. Maximum power point tracker of a wind generator based on the flatness-based control. In: IEEE. *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE*. [S.l.], 2011. p. 883–888.

- [13] LEVINE, J. *Analysis and control of nonlinear systems: A flatness-based approach*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2009.
- [14] RIGATOS, G. G. Derivative-free kalman filtering for sensorless control of mimo nonlinear dynamical systems. In: IEEE. *Mechatronics and Automation (ICMA), 2012 International Conference on*. [S.l.], 2012. p. 714–719.
- [15] DUTRA, R. Energia eólica—princípios e tecnologia. *Rio de Janeiro: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Britto*, 2008.
- [16] AMENEDO, J. L. R.; DÍAZ, J. C. B.; GÓMEZ, S. A. Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica. Rueda, 2003.
- [17] NUNES, M. V. A. et al. Avaliação do comportamento de aerogeradores de velocidade fixa e variável integrados em redes elétricas fracas. Florianópolis, SC, 2003.
- [18] SILVA, J. L. da. *Estratégia de controle e supervisão de um gerador de indução duplamente excitado para turbinas eólicas*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.
- [19] ASSOCIATION, E. W. E. *The economics of wind energy*. [S.l.]: EWEA, 2009.
- [20] WOOD, D. *Small wind turbines*. [S.l.]: Springer, 2011.
- [21] SOUZA, A. Z. de et al. Modelagem de geradores eólicos duplamente alimentados e seus efeitos na análise de curto circuito. http://www.labplan.ufsc.br/congressos/SBSE/anais/150_sbse2006_final.pdf. Acesso, v. 21, p. 12, 2012.
- [22] SALLES, M. B. d. C. *Modelagem e análises de geradores eólicos de velocidade variável conectados em sistemas de energia elétrica*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2009.
- [23] ANAYA-LARA, O. et al. *Wind energy generation: modelling and control*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.
- [24] AHMED, W. K. Mechanical modeling of wind turbine comparative study. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, v. 3, n. 1, p. 94–97, 2013.
- [25] LEITHEAD, W.; CONNOR, B. Control of variable speed wind turbines: design task. *International Journal of Control*, Taylor & Francis, v. 73, n. 13, p. 1189–1212, 2000.
- [26] SØRENSEN, P. E. et al. *Simulation of interaction between wind farm and power system*. [S.l.: s.n.], 2002.
- [27] ALVES, A. *Análise do Desempenho de Rotores Eólicos de Eixo Horizontal*. Tese (Doutorado) — Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, UFPA, 1997.
- [28] CONNER, B.; LEITHEAD, W. Performance assessment of variable speed wind turbines. IET, 1996.
- [29] MULJADI, E.; BUTTERFIELD, C. P. Pitch-controlled variable-speed wind turbine generation. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 37, n. 1, p. 240–246, 2001.

- [30] OLIVEIRA, V. A.; AGUIAR, M. L.; VARGAS, J. B. de. *Sistemas de Controle: aulas de laboratorio*. [S.l.]: EESC-USP, 2005.
- [31] RUSSOLO, T. d. A. et al. Sistema de controle de posição microprocessado com servomotor cc. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2011.
- [32] MARQUES, J. Turbinas eólicas: modelo, análise e controle do gerador de indução com dupla alimentação. *Santa Maria: UFSM*, 2004.
- [33] NASCIMENTO, J. B. do. *Estudo aerodinâmico do efeito da rugosidade no desempenho de um modelo de turbina eólica de eixo horizontal*. Tese (Doutorado), 1998.
- [34] SLOOTWEG, J.; POLINDER, H.; KLING, W. Dynamic modelling of a wind turbine with doubly fed induction generator. In: IEEE. *Power Engineering Society Summer Meeting, 2001*. [S.l.], 2001. v. 1, p. 644–649.
- [35] HANSEN, L. H. et al. *Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines*. [S.l.: s.n.], 2002.
- [36] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; KUSKO, A. *Máquinas elétricas: conversão eletromecânica da energia, processos, dispositivos e sistemas*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1975.
- [37] BASILIO, J. C.; MOREIRA, M. V. Experimentos para estimação dos parâmetros de motores de corrente contínua. *VII Encontro de Educação em Engenharia*, 2001.
- [38] SEMAN, S. et al. Advanced modelling of doubly fed induction generator wind turbine under network disturbance. In: *5. International workshop on large-scale integration of wind power and transmission networks for offshore wind farms*. [S.l.: s.n.], 2005.
- [39] IOV, F. et al. Wind turbine blockset in matlab/simulink. *Denmark: Aalborg University*, 2004.
- [40] ADEGAS, F. D. et al. Power curve of small wind turbine generators-laboratory and field testing. *RIO 3-World Climate & Energy Event, 1-5 December 2003, Rio de Janeiro, Brazil*, 2003.
- [41] ACKERMANN, T. *Wind power in power systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2005.
- [42] SLOOTWEG, J. G. *Wind power: Modelling and impact on power system dynamics*. [S.l.]: TU Delft, Delft University of Technology, 2003.
- [43] FRÖBERG, C.-E. *Numerical mathematics: theory and computer applications*. [S.l.]: Benjamin-Cummings Publishing Co., Inc., 1985.
- [44] THOMAS, G. B.; FINNEY, R. L. *Cálculo diferencial e integral*. [S.l.]: Livros Tecnicos e Científicos, 1983.
- [45] LEVINE, W. S. *The control handbook*. [S.l.]: CRC press, 1996.

- [46] ZIEGLER, J.; NICHOLS, N. Optimum settings for automatic controllers. *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, American Society of Mechanical Engineers, v. 115, n. 2B, p. 220–222, 1993.
- [47] OGATA, K.; MAYA, P. Á.; LEONARDI, F. *Engenharia de controle moderno*. [S.l.]: Prentice Hall, 2003.
- [48] DORF, R. C.; BISHOP, R. H. *Sistemas de controle modernos*. [S.l.]: Livros Técnicos e Científicos, 2001.
- [49] FLIESS, M. et al. A lie-backlund approach to equivalence and flatness of nonlinear systems. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 44, n. 5, p. 922–937, 1999.
- [50] MARTIN, P. *Contribution à l'étude des systèmes différentiellement plats*. Tese (Doutorado) — École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1992.
- [51] POLJAK, S. *On Controllability Kronecker Indices of Structured Systems*. [S.l.]: Department of Applied Mathematics, Faculty of Mathematics and Physics, Charles University, 1990.
- [52] BULLICH, J. F. et al. Flatness, tangent systems and flat outputs. Universitat Politècnica de Catalunya, 1999.
- [53] FRAGA, S.; SOUSA, J. T.; PEREIRA, F. L. Geração de trajetórias para sistemas diferencialmente planos. 2003.
- [54] SLOTINE, J.; LI, W. *Applied Nonlinear Control*. : Prentice Hall, 1991.
- [55] BETTS, J. T. Survey of numerical methods for trajectory optimization. *Journal of guidance, control, and dynamics*, v. 21, n. 2, p. 193–207, 1998.

ANEXOS

I. ANEXO 01

Código e Instrumentação para bancada de calibração do Gerador Eólico para controle PID via Arduino

Data:04/05/2016

Desenvolvedor: Raffael de Queiroz Almeida

//-----

// DEFINIÇÃO DA ENTRADA DO SENSOR DE ROTAÇÃO

//-----

volatile long npulse=0;

volatile float freq=0;

int pin =3;// signal rpm pin2

float rot;

//-----

// CONTROLE DE SAIDA (PWM)

//-----

const int analogOutPin =9; // PWN SIGNAL FOR TRANSISTOR

int sensorValue = 0; // value read from the pot

int outputValue = 0; // value output to the PWM (analog out)

//-----

// ENTRADA ANALOGICA PARA CALIBRAÇÃO DOS SENSORES (RMS value)

//-----

double sum=0.0;

double volt;

double current;

float value[400];// variable to store the value coming from the sensor

int i=0;

//-----

// DECLARAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO PID //-----

```
double flat=0;
float d1W;
float aux=0;
float d1erro;
int d1Wd=0;
int d2Wd=0;
float Tc;
float C0 = 1.2676e-09;
float C1 = -6.6759e-07;
float C2 = 1.0747e-04;
float C3 = -0.0050;
float C4 = 0.1258;
float C5 = 0;
float Kt = 0.5212;
float j=0.0022;
double Re;
int Rtot= 10;
float Ia;
int Ra = 7.5;
float La = 0.00259;
int Vt = 0;
double pwm;
float erro = 0;
float setPoint=300;
float deltaTempo = 0;
float ultimoMomento =0;
float P = 0;
float I = 0;
float amostra=0;
float AmostraAnterior;
float pid;
```



```

float D;
float kD=-0.12;//-0.01;
float kP=-144.62;
float kI=-36.13;
//-----
void setup()
Serial.begin(9600);//(38400);
//-----
// SENSOR DE ROTAÇÃO
//-----
while(!Serial);;
pinMode(pin,INPUT);
digitalWrite(pin,HIGH);
attachInterrupt(1,senserpm,RISING);
//-----
void loop()
//-----
// CONTROLE
//-----
if(Serial.available())
setPoint = Serial.parseInt();
//-----
// CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE TENSÃO
//-----
analogReference(DEFAULT);
for (i=0;i<400;i++)
//value[i]=analogRead(A3)*5.0/1024;
//value[i]=analogRead(A3)*0.023490+0.065444;
value[i]=analogRead(A3)*0.023490+0.099855;
//
sum=0.0;

```

```

//
for (i=0;i<400;i++)
///// Serial.println(value[i]);
sum=sum+value[i]*value[i];
//
volt=sqrt(sum/400);
//volt=0.023490*voltagesensor + 0.065444;
//y = 0.023490x + 0.065444
//Serial.print(volt,2);
//-----
// CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE CORRENTE
//-----
//analogReference(INTERNAL);
for (i=0;i<400;i++)
value[i]=analogRead(A2)*0.167738-66.34;//(-0.0134) + 12.847;
//analogReference(DEFAULT);
sum=0.0;
for (i=0;i<400;i++)
//Serial.println(value[i]);
sum=sum+value[i]*value[i];
current=sqrt(sum/400);
//Serial.println(current,2);
//y=-0.0136x + 12.915// rms - calibration - aref(INTERNAL) -5A (A4)
// y = 0.167738 x - 66.399168;//- 20A (A3)
//y = 0.025509x - 12.957400 - 5A (A4)
//-----
// APLICAÇÃO DO CONTROLADOR PID
//-----
rot=freq;
Ia=current;
float d1W = 0;

```

```

float d2W = 0;
if(rot<3000)
amostra = freq;
erro = setPoint - amostra;
float agora = millis();
deltaTempo = (agora - ultimoMomento) / 1000.0f; // Tempo em segundos
ultimoMomento = agora;
P = kP * erro; //
I += kI * (erro) * (deltaTempo); //
D = kD * (AmostraAnterior - amostra)/ deltaTempo; //
pid = P + I + D;
AmostraAnterior = amostra;
//amostra = freq*0.1047;
pwm = (pid - 27.0809523809524)/(-25.3428571428572);
sensorValue = (pwm*100);
sensorValue=(sensorValue>=100?100:sensorValue);
sensorValue=(sensorValue<=0?0:sensorValue);
outputValue = map(sensorValue, 0, 100, 0, 255);
// change the analog out value:
analogWrite(analogOutPin, outputValue);
//-----
// SAIDAS DE DADOS
//-----
//Serial.print(scale.getunits(1), 0);
//-----
//Serial.print(,);
if(rot<3200)
Serial.print(amostra,2);
//-----
Serial.print(,);
Serial.print(erro,1);

```

```

//-----
Serial.print(,); Serial.print(current,2);
Serial.print(,);
Serial.print(pid,2);
//-----
Serial.print(,);
Serial.print(setPoint);
//-----
Serial.print(,); int controlpwm =0;
controlpwm=outputValue/255.0*100.0;
Serial.print(outputValue);
Serial.println(controlpwm);
delay(100);
//-----
// FUNÇÃO PARA TRANSFORMAR EM RPM
//-----
void senserpm()
volatile long n2pulse = micros();
freq=1000000.0/(n2pulse-npulse)*60;// RPM
npulse = n2pulse;

```

II. ANEXO 02

Código, Instrumentação e controle via Planicidade diferencial para a bancada do gerador eólico

Data:20/01/2016

Desenvolvido por Raffael de Queiroz Almeida via Arduino

```
//-----  
// DEFINIÇÃO DA ENTRADA DO SENSOR DE ROTAÇÃO  
//-----  
volatile long npulse=0;  
volatile float freq=0;  
int pin =3;// signal rpm pin2  
float rot;  
//-----  
// CONTROLE DE SAIDA (PWM) //-----  
const int analogOutPin =9; // PWN SIGNAL FOR TRANSISTOR  
int sensorValue = 0; // value read from the pot  
int outputValue = 0; // value output to the PWM (analog out)  
//-----  
// ENTRADA ANALOGICA PARA CALIBRAÇÃO DOS SENSORES (RMS value) //-----  
-----  
  
double sum=0.0;  
double volt;  
double current;  
float value[400];// variable to store the value coming from the sensor  
int i=0;  
//-----  
// DECLARAÇÃO DAS VARIÁVEIS DA PLANICIDADE DIFERENCIAL  
//-----  
double flat=0;  
float ultimoMomento=0;
```

```
float deltaTempo=0;
float d1W=0;
float aux=0;
float erro;
float d1erro;
float setPoint = 30;
int d1Wd=0;
int d2Wd=0;
float Tc;
double C0 = 1.002648e-09;
double C1 = -5.420537e-07;
double C2 = 7.183625e-05;
double C3 = -0.002376635;
double C4 = 0.03956104;
double C5 = 0;
double Kt = 0.0850;
//float K0 = 0.5*0.5;
//float K1 = 2*0.5;
float j=0.022;
double Re;
double I=0;
int Rtot= 10;
float amostra;
float Ia;
float Ra = 0.7452;
float La = 0.0259;
int Vt = 0;
double pwm;
double rmax=0;
double rmin=0;
double req;
```

```

//-----
void setup()
Serial.begin(9600);//(38400);
//-----
// SENSOR DE ROTAÇÃO
//-----
while(!Serial);;
pinMode(pin,INPUT);
digitalWrite(pin,HIGH);
attachInterrupt(1,senserpm,RISING);
//-----
void loop()
//-----
// CONTROLE
//-----
if(Serial.available())
setPoint = Serial.parseInt();
//-----
// CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE TENSÃO
//-----
analogReference(DEFAULT);
for (i=0;i<400;i++)
//value[i]=analogRead(A3)*5.0/1024;
//value[i]=analogRead(A3)*0.023490+0.065444;
value[i]=analogRead(A3)*0.023490+0.099855;
//
sum=0.0;
//
for (i=0;i<400;i++)
//// Serial.println(value[i]);
sum=sum+value[i]*value[i];

```

```

//
volt=sqrt(sum/400);
//volt=0.023490*voltagesensor + 0.065444;
//y = 0.023490x + 0.065444
//Serial.print(volt,2);
//-----
// CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE CORRENTE
//-----
//analogReference(INTERNAL);
for (i=0;i<400;i++)
value[i]=analogRead(A2)*0.167738-66.34;//( -0.0134) + 12.847;
//analogReference(DEFAULT);
sum=0.0;
for (i=0;i<400;i++)
//Serial.println(value[i]);
sum=sum+value[i]*value[i];
current=sqrt(sum/400);
//Serial.println(current,2);
//y=-0.0136x + 12.915// rms - calibration - aref(INTERNAL) -5A (A4)
// y = 0.167738 x - 66.399168;//- 20A (A3)
//y = 0.025509x - 12.957400 - 5A (A4)
//-----
// Planicidade diferencial
//-----
Ia=current;
rot=freq;
float fator;
float K0;
float K1;
float KI;
float rz1 = 1;

```



```

float rz2 = 1;

fator = 100;

K0 = 0.75*fator; K1 = 1.5*fator; KI = 0.125*fator;

if(rot<3000)

amostra = freq*0.1047;

erro = amostra - setPoint;

float agora = millis();

deltaTempo = (agora - ultimoMomento) / 1000.0f; // Tempo em segundos

ultimoMomento = agora;

d1W = (1/j)*(C0*amostra*amostra*amostra*amostra+C1*amostra*amostra*amostra +
C2*amostra*amostra + C3*amostra + C4 - Kt*Ia);

aux = amostra;

d1erro= d1W - d1Wd;

I += (erro) * (deltaTempo);

Tc = d2Wd - (K1*(d1erro)) - (K0*(erro)) - KI*I;

Re = -(Ia*Kt*Ra + C3*La*d1W - j*La*Tc - Kt*Kt*amostra + 4*C0*La*d1W*(amostra*amostra*amostra)
+ 3*C1*La*d1W*(amostra*amostra) + 2*C2*La*d1W*amostra)/(Ia*Kt);

pwm = (Re - 27.0809523809524)/(-25.3428571428572);

sensorValue = (pwm*100);

sensorValue=(sensorValue>=100?100:sensorValue);

sensorValue=(sensorValue<=0?0:sensorValue);

outputValue = map(sensorValue, 0, 100, 0, 255);

//change the analog out value:

analogWrite(analogOutPin, outputValue);

//-----
// SAIDAS DE DADOS
//-----
//Serial.print(scale.getunits(1), 0);
//-----
//Serial.print(,);

if(rot<3200)

```

```

Serial.print(amostra,2);

//-----
Serial.print(,);
Serial.print(Re,1);

//-----
Serial.print(,); Serial.print(current,2);
Serial.print(,);
Serial.print(Tc,2);

//-----
Serial.print(,);
Serial.print(setPoint);

//-----
Serial.print(,); int controlpwm =0;
controlpwm=outputValue/255.0*100.0;
Serial.print(outputValue);
Serial.println(controlpwm);
delay(100);

//-----
// FUNÇÃO PARA TRANSFORMAR EM RPM
//-----

void senserpm()
volatile long n2pulse = micros();
freq=1000000.0/(n2pulse-npulse)*60;// RPM
npulse = n2pulse;

```