

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**EMULAÇÃO DOS REGIMES PERMANENTE E
TRANSITÓRIO DE TURBINAS DE EIXO HORIZONTAL
INCLUINDO O MODELO ESTÁTICO DA TURBINA MAGNUS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Leonardo Candido Corrêa

Santa Maria, RS, Brasil

2014

**EMULAÇÃO DOS REGIMES PERMANENTE E
TRANSITÓRIO DE TURBINAS DE EIXO HORIZONTAL
INCLUINDO O MODELO ESTÁTICO DA TURBINA MAGNUS**

Leonardo Candido Corrêa

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção de grau em

Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Felix Alberto Farret, Ph.D.

Santa Maria, RS, Brasil

2014

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Candido Corrêa, Leonardo
EMULAÇÃO DOS REGIMES PERMANENTE E TRANSITÓRIO DE
TURBINAS DE EIXO HORIZONTAL INCLUINDO O MODELO ESTÁTICO
DA TURBINA MAGNUS / Leonardo Candido Corrêa.-2014.
105 p. ; 30cm

Orientador: Felix Alberto Farret
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, RS, 2014

1. Emulador de turbinas eólicas 2. Turbina Magnus I.
Farret, Felix Alberto II. Título.

Biblioteca Central da UFSM

© 2014

Todos os direitos autorais reservados a Leonardo Candido Corrêa. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Rua Doze, n. 2010, Bairro da Luz, Santa Maria, RS. CEP: 97110-680

Fone (0xx)55 32225678; Fax (0xx) 32251144; E-mail: ufesme@ct.ufsm.br

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**EMULAÇÃO DOS REGIMES PERMANENTE E TRANSITÓRIO DE
TURBINAS DE EIXO HORIZONTAL INCLUINDO O MODELO
ESTÁTICO DA TURBINA MAGNUS**

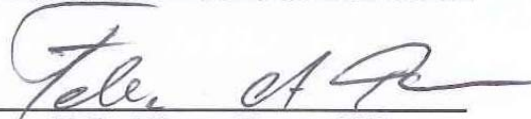
elaborada por

Leonardo Candido Corrêa

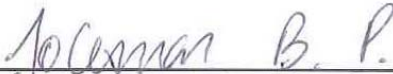
como requisito parcial para obtenção do grau de

Mestre em Engenharia Elétrica

COMISSÃO EXAMINADORA:



Felix Alberto Farret, PhD
(Presidente/Orientador)



Jocemar Biasi Parizzi, Dr. (Unipampa)



Ály Ferreira Flores Filho, Dr. (UFRGS)

Daniel Pinheiro Bernardon, Dr. (UFSM)
(Suplente)

Santa Maria, 24 de Janeiro de 2014.

Folha de dedicatória

Dedico esse trabalho à minha família, pelo apoio e compreensão durante minha vida acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente queria agradecer aos meus pais, Márcia e Luiz Henrique, que foram meus maiores exemplos de caráter e dedicação durante esses anos, pois me ensinaram verdadeiros valores desde sempre. São pessoas mais que essenciais na minha vida, sempre me deram apoio, amor e nunca mediram esforços para que mais uma batalha chegasse ao fim. Também agradeço ao meu irmão Pablo que me proporcionou momentos de alegria e descontração sempre que nos encontrávamos durante minha estadia em Santa Maria. Aos meus avós e familiares que mesmo distantes me passaram palavras de incentivo.

Agradeço também a minha namorada Letícia, que nesses anos me deu apoio com palavras de motivação e ajuda.

Ao meus colegas João e Cláudia que enfrentaram essa etapa comigo, sempre dispostos a contribuir e acrescentar, com os quais partilhei estudos e também risadas mesmo quando tudo parecia estar perdido. Ao colega de laboratório Frank que acompanhado de seu humor indelével sempre esteve disposto a somar.

Ao meu grande amigo Jordan o qual conheci logo no início destes dois penosos anos, que me auxiliou dividindo seu conhecimento e experiência e que me acompanhou em outra tarefa difícil chamada Pinus Bar, assim como meu ex-colega de graduação e amigo Guilherme que também contribuiu com seu conhecimento e teve grande empenho em me acompanhar à mesma tarefa difícil.

Ao meu orientador, professor Felix A. Farret pela disposição, orientação, sabedoria e sugestões valiosas.

Our virtues and our failings are inseparable, like force and matter. When they separate, man is no more.

(Nikola Tesla)

The beautiful thing about learning is nobody can take it away from you.

(B.B. King)

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

EMULAÇÃO DOS REGIMES PERMANENTE E TRANSITÓRIO DAS TURBINAS DE EIXO HORIZONTAL INCLUINDO O MODELO ESTÁTICO DA TURBINA MAGNUS

AUTOR: LEONARDO CANDIDO CORRÊA
ORIENTADOR: FELIX ALBERTO FARRET

Local e Data da defesa: Santa Maria, 24 de Janeiro de 2014.

A instalação de parques eólicos tem se expandido não só no mundo, mas também no Brasil. A energia eólica, apesar de ser já bastante consolidada, ainda é palco para muitos trabalhos científicos e pesquisas na indústria nas áreas de controle, topologias de conversores de potência e estabilidade na conexão de aerogeradores com a rede. Devido a este fato junto com a sazonalidade do vento, torna-se difícil estudar esse tipo de fonte em seu âmbito de operação, sendo assim desejável um ambiente controlado para testes. Esta dissertação apresenta uma topologia para emulação de turbinas de eixo horizontal (HAWT) utilizando um motor de corrente contínua para acionar geradores com o mesmo torque que haveria caso estivessem acoplados a uma turbina real. Para melhor verossimilhança com as turbinas em campo, além do modelo estático composto pelo ângulo de passo das pás e o coeficiente de potência, propõe-se um modelo dinâmico para representar o efeito cortante do vento, o sombreamento da torre e o direcionamento da turbina em relação ao vento. Além do mais, o modelo proposto permite também a emulação de máquinas de grande inércia usando motores de menor porte, pela simples alteração do torque imposto ao gerador. O diferencial nesta dissertação consiste na possibilidade de emulação da turbina Magnus, que é um aerogerador que possui cilindros girantes no lugar das tradicionais pás presentes nas HAWT, que aumentam o torque disponível. Com isto, pode-se mostrar como a turbina Magnus pode gerar maior potência em baixas velocidades vento. São apresentados então os resultados simulados e experimentais avaliando o comportamento completo do emulador de turbinas eólicas. Ambas as turbinas são analisadas com e sem MPPT. Finalmente, são mostradas as conclusões do trabalho e as propostas para futuros trabalhos.

Palavras-chave: Emulador de turbinas eólicas, Modelo estático, Modelo dinâmico, Turbina Magnus

ABSTRACT

Master Thesis
Post-graduation Program in Electrical Engineering
Federal University of Santa Maria

EMULATION OF THE STATIC AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF HORIZONTAL AXIS WIND TURBINES INCLUDING THE STEADY-STATE REPRESENTATION OF A MAGNUS TURBINE

AUTHOR: LEONARDO CANDIDO CORRÊA
SUPERVISOR: FELIX ALBERTO FARRET

Place and Date: Santa Maria, January 24th, 2014.

The lodgment of wind sites is in a visible growing demand not only in Brazil, but all over the world. The wind energy, even though consolidated, still hosts many scientific researches and industrial development in several areas such as control, power converter topologies and stability of grid connected wind turbines (WT). Due to the remarkable development of this technology in the market and the wind seasonality characteristics, it is difficult to study this power source in its operation field. Thus, a controlled environment for testing is desirable. This dissertation presents a topology of horizontal axis wind turbines (HAWT) emulator using a DC motor to provide an electrical generator the same torque that it would if it was driven by a typical WT. In addition to the static model, represented by the pitch angle and power coefficient, a dynamic model of HAWT is proposed in order to improve the representation of real turbines in the field, which allows characterizing the effect of wind shear, tower shadowing and turbine yaw. Furthermore, it permits emulating large inertia machines through smaller engines, by changing the torque imposed on the generator. The appealing motivation in this thesis is that the Magnus turbine emulation includes a relative new type of wind machine that possesses rotating cylinders instead of the traditional propeller blades in traditional HAWT. It is shown how these cylinders increase the available torque, then producing useful power even at lower wind speeds. Simulated and experimental results to evaluate the performance of the wind turbine emulator are presented. Both turbines are analyzed with and without MPPT. Finally the conclusions of this work are presented as well as new proposals for future works.

Keywords: Wind turbine emulator, static model, dynamic model, Magnus turbine.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Proposta de emulação de turbina eólicas. (a) aerogerador em campo; (b) plataforma de emulação.....	22
Figura 3.1 – Turbinas de eixo horizontal (HAWT) tipo <i>upwind</i> (a) e <i>downwind</i> (b) e turbinas de eixo vertical (VAWT) (c).	31
Figura 3.2 – Turbina Magnus. (1) cilindros girantes.....	33
Figura 3.3 – Ilustração do efeito Magnus em um cilindro. (a) vista isométrica, (b) vista em corte.	33
Figura 3.4 – Fluxo de ar através de uma determinada área A.	34
Figura 3.5 – Coeficiente de potência versus Velocidade de ponta de pá para diversos ângulos de passo das pás. (a) $\beta = 0, \beta = 1, \beta = 2, \beta = 5, \beta = 10, \beta = 15$ e $\beta = 20$; (b) Curva da superfície $C_p(\lambda, \beta)$	37
Figura 3.6 – Coeficiente de potência em função de λ e λ_c	38
Figura 3.7 – Esquema do efeito cortante do vento (a) e sombreamento da torre (b).	40
Figura 3.8 – Torque resultante do efeito do cortante do vento e sombreamento da torre (a) no domínio do tempo e (b) no do domínio da frequência.	41
Figura 3.9 – Modelo mecânico do sistema real (a) e do sistema emulado (b).	42
Figura 3.10 – Compensação da inércia no modelo dinâmico a uma dada velocidade; (a) Velocidade de rotação do motor; (b) Torque em regime permanente e torque compensado com e sem amortecimento do eixo.	43
Figura 3.11 – Mecanismo de direcionamento da nacela.	44
Figura 3.12 – Potência mecânica de uma turbina em função da rotação para diferentes velocidades de vento.....	45
Figura 4.1 – Diagrama de blocos do emulador proposto.....	48
Figura 4.2 – Diagrama de blocos detalhado do emulador proposto.	49
Figura 4.3 – Diagrama de blocos detalhado do emulador de turbina Magnus proposto.	50
Figura 4.4 – Conversor CC-CC <i>chopper</i> (a) e sua aplicação no controle da tensão de armadura do motor CC (b).....	51
Figura 4.5 – Fluxograma de controle executado pelo DSP.	52
Figura 4.6 – Representação da malha de corrente.	53
Figura 4.7 – Curvas de saída do controlador da malha de corrente $i_{ia}(t)$. (a) resposta em frequência da função transferência em malha aberta da planta não compensada. (b) resposta em frequência do sistema compensado $T_{MA,C}(s)$	54
Figura 4.8 – Resposta ao degrau da corrente de armadura.	55
Figura 4.9 – Mapeamento entre o domínio contínuo (s) e domínio complexo (z) através do método <i>backward difference</i>	56
Figura 4.10 – Interface gráfica no LabVIEW® do emulador para turbinas de eixo vertical. ...	58
Figura 4.11 – Ambiente virtual de instrumentação, aplicativo desenvolvido.	58

Figura 4.12 – Ambiente virtual de instrumentação, aplicativo desenvolvido. (a) tempo de aguardo e sinal de referência ao DSP para partida suave do motor; (b) envio ao DSP da corrente de armadura de referência através da NI-6009; (c) leitura da rotação do moto e conversão da caixa de engrenagens; (d) decomposição da potência devido ao direcionamento da nacela; (e) configuração de um perfil periódico de vento e (f).....	59
Figura 4.13 – Interface gráfica no LabVIEW® do emulador para turbina Magnus.....	60
Figura 4.14 – Ambiente virtual de instrumentação, aplicativo desenvolvido	61
Figura 5.1 – Resultados de simulação para o modelo estático de uma HAWT com perfil suave de vento e PMSG operando em MPPT; (a) perfil de vento; (b) rotação da turbina; (c) potência mecânica e potência gerada; (d) coeficiente de potência; (e) torque de referência e (f) corrente de armadura de referência e medida.	65
Figura 5.2 – Resultados de simulação para o modelo estático de uma HAWT perante um perfil suave de vento com PMSG operando fora de MPPT; (a) perfil de vento; (b) rotação da turbina; (c) potência mecânica e potência gerada e (d) coeficiente de potência.	66
Figura 5.3 – Resultados de simulação para o modelo estático de uma HAWT perante degraus de vento com PMSG operando em MPPT; (a) perfil de vento; (b) rotação da turbina; (c) potência gerada e (d) coeficiente de potência.....	67
Figura 5.4 – Resultados de simulação para o modelo dinâmico de uma HAWT perante um perfil de vento com a compensação da inércia e com PMSG operando em MPPT; (a) perfil de vento; (b) rotação da turbina e (c) potência gerada.	68
Figura 5.5 – Resultados de simulação para o modelo estático e dinâmico de uma HAWT perante um perfil de vento com PMSG operando em MPPT; (a) perfil de vento; (b) rotação da turbina e (c) potência gerada.	69
Figura 5.6 – Resultados de simulação para o modelo estático com efeito cortante do vento e sombreamento da torre de uma HAWT perante um perfil de vento com PMSG operando em MPPT; (a) perfil de vento; (b) rotação da turbina e potência gerada, (c) torque modelo estático e torque sombreado e (d) corrente de armadura de referência e medida.....	70
Figura 5.7 – Resultados da emulação de uma HAWT para $V_{\infty} = 4,0 \text{ m/s}$, resultando na operação em 275 rpm da turbina. (a) Dados experimentais (b) Simulação.....	71
Figura 5.8 – Resultados da emulação de uma HAWT para $V_{\infty} = 4,6 \text{ m/s}$, resultando na operação em 335 rpm da turbina. (a) Dados experimentais e (b) Simulação.....	72
Figura 5.9 – Resultados da emulação de uma HAWT para $V_{\infty} = 5,0 \text{ m/s}$, resultando na operação em 372 rpm da turbina. (a) Dados experimentais e (b) Simulação.....	72
Figura 5.10 – Resultados da emulação de uma HAWT para $V_{\infty} = 5,5 \text{ m/s}$, resultando na operação em 413 rpm da turbina. (a) Dados experimentais e (b) Simulação.....	73
Figura 5.11 – Resultados da emulação de uma HAWT para $V_{\infty} = 6,0 \text{ m/s}$, resultando na operação em 456 rpm da turbina. (a) Dados experimentais e (b) Simulação.....	73
Figura 5.12 – Resultados da emulação de uma HAWT para $V_{\infty} = 6,5 \text{ m/s}$, resultando na operação em 496 rpm da turbina. (a) Dados experimentais e (b) Simulação.....	74
Figura 5.13 – Resultados da emulação de uma HAWT para $V_{\infty} = 7,0 \text{ m/s}$, resultando na operação em 534,5 rpm da turbina. (a) Dados experimentais e (b) Simulação.....	74
Figura 5.14 – Curva característica de Potência <i>versus</i> Rotação da HAWT emulada com os dados experimentais obtidos através do emulador e com um túnel de vento.....	76

Figura 5.15 – Resultados experimentais da emulação de uma HAWT para um degrau de vento (a) 6,5 para 4,0 m/s e (b) 4,0 para 6,5 m/s.	76
Figura 5.16 – Resultados experimentais de uma HAWT para ilustrar o efeito de sombreamento da torre. (a) torque de referência calculado para 100 rpm e (b) corrente de armadura do motor para $V_{\infty} = 4,0$ m/s e rotação de 271 rpm.....	77
Figura 5.17 – Resultados da emulação de uma turbina Magnus para $V_{\infty} = 3,0$ m/s, resultando na operação em 4,95 rpm da turbina. (a) Dados experimentais e (b) Simulação.	78
Figura 5.18 – Resultados da emulação de uma turbina Magnus para $V_{\infty} = 4,0$ m/s, resultando na operação em 7,70 rpm da turbina. (a) Dados experimentais e (b) Simulação.	79
Figura 5.19 – Resultados da emulação de uma turbina Magnus para $V_{\infty} = 5,0$ m/s, resultando na operação em 9,96 rpm da turbina. (a) Dados experimentais e (b) Simulação.	79
Figura 5.20 – Resultados da emulação de uma turbina Magnus para $V_{\infty} = 6,0$ m/s, resultando na operação em 11,3 rpm da turbina. (a) Dados experimentais e (b) Simulação.	80
Figura 5.21 – Curva característica de Potência <i>versus</i> Rotação da turbina Magnus emulada com os dados experimentais obtidos através do emulador.....	81
Figura A.1 – Circuito equivalente do motor de corrente contínua com excitação independente.	91
Figura A.2 – Diagrama de blocos de um de corrente contínua com excitação independente com (a) corrente de campo variável e (b) corrente de campo constante.	92
Figura A.3 – Tensão aplicada entre dois terminais para ensaio de obtenção dos parâmetros do PMSG (<i>CH1</i>) e corrente (<i>CH4</i>).	95
Figura A.4 – Curva de magnetização do gerador de indução ensaiado.....	95
Figura A.5 – Fluxograma do HCC para rastreamento do ponto de máxima potência através do controle da corrente de carga.....	96
Figura A.6 – Conversor <i>buck</i> utilizado como carga para MPPT do gerador.....	96
Figura A.7 – Curva característica de potência <i>versus</i> rotação de uma turbina de eixo horizontal emulada.....	97
Figura A.8 – Curva da instrumentação de corrente da carga.....	98
Figura A.9 – Curva da instrumentação da tensão da carga.	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Simbologia utilizada na Figura 3.9.....	42
Tabela 5.1. Parâmetros da turbina de eixo horizontal utilizada.....	63
Tabela 5.2. Comparação entre resultados experimentais e simulados para emulação de uma turbina de eixo horizontal.....	75
Tabela 5.3. Parâmetros da turbina Magnus utilizada.....	78
Tabela 5.4. Comparação entre resultados experimentais e simulados para emulação de uma turbina Magnus.....	80
Tabela A.1. Parâmetros do Motor CC.....	93
Tabela A.2. Parâmetros do PMSG.....	94

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CC	Corrente Contínua
DAC	Conversor Digital-Analógico (<i>Digital-to-Analog Converter</i>)
DSP	Processador Digital de Sinais (<i>Digital Signal Processor</i>)
HCC	Controle <i>Hill-Climbing</i> (<i>Hill-Climbing Control</i>)
MPP	Ponto de Máxima Potência (<i>Maximum Power Point</i>)
MPPT	Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (<i>Maximum Power Point Tracking</i>)
P&O	Perturbação e Observação
PMSG	Gerador Síncrono à Imãs Permanentes (<i>Permanent magnet synchronous generator</i>)
PSF	Realimentação do Sinal de Potência (<i>Power Signal Feedback</i>)
p.u.	Por Unidade
PWM	Modulação por Largura de Pulso (<i>Pulse Width Modulation</i>)
TS	Sombreamento da Torre (<i>Tower Shadowing</i>)
TSR	Velocidade de Ponta de Pá (<i>Tip Speed Ratio</i>)
WECS	Sistemas de Conversão de Energia Eólica (<i>Wind Energy Conversion System</i>)
WS	Efeito Cortante do Vento (<i>Wind Shear</i>)
WT	Turbinas Eólicas (<i>Wind Turbines</i>)
WTE	Emulador de Turbina Eólica (<i>Wind Turbine Emulator</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

C_p	Coefficiente de potência da turbina
λ	Velocidade de ponta da pá
P_{mec}	Potência mecânica (W)
ω	Velocidade de rotação da turbina (rad/s)
β	Ângulo de passo das pás ($^\circ$)
ω_c	Velocidade de rotação do cilindro (rad/s)
V_∞	Velocidade do vento (m/s)
E_c	Energia cinética (J)
m	Massa (kg)
v	Velocidade (m/s)
P_m	Potência mecânica (W)
$p_{1,2}$	Pressão do ar (N/m^2)
ρ	Densidade do ar (kg/m^3)
V	Volume (m^3)
\bar{Q}	Fluxo médio (m^3/s)
A	Área varrida pelas pás (m^2)
R	Raio da turbina (m^2)
$c_{1,2,\dots,6}$	Parâmetros do modelo da turbina
L	Força de sustentação (N)
Γ	Circulação do fluido
r_c	Raio do cilindro (m)
P_{perda}	Potência dispendida por fricção dos cilindros durante a rotação (W)
T	Torque ($N\cdot m$)
d	Diâmetro dos cilindros (m)
Re	Número de Reynolds
λ_c	Velocidade relativa dos cilindros
n_c	Número de cilindros
T_L	Torque gerado pela força de sustentação ($N\cdot m$)
T_D	Torque gerado pela força de arrasto ($N\cdot m$)
P_{ac}	Perdas no acionamento dos motores dos cilindros (W)
P_t	Potência líquida da turbina Magnus (W)

h	Altura (m)
h_c	Altura de referência (m)
α	Rugosidade da superfície
$A_{1,2}$	Constantes de sombreamento da torre
T_{turb}	Torque aerodinâmico da turbina eólica ($N\cdot m$)
T_{shear}	Torque aerodinâmico gerado pelo efeito de sombreamento da torre ($N\cdot m$)
J_{turb}	Inércia da turbina ($N\cdot m\cdot s^2$)
ω_{turb}	Velocidade da turbina (rad/s)
B_{turb}	Coefficiente de amortecimento do eixo da turbina ($N\cdot m\cdot s$)
J_{ger}	Inércia do gerador ($N\cdot m\cdot s^2$)
ω_{ger}	Velocidade do gerador (rad/s)
T_{ger}	Torque do gerador ($N\cdot m$)
J_{motor}	Inércia do motor CC ($N\cdot m\cdot s^2$)
B_{motor}	Coefficiente de amortecimento do eixo do motor ($N\cdot m\cdot s$)
T_{motor}	Torque do motor CC ($N\cdot m$)
n	Relação de transformação da caixa de engrenagens
P_{yaw}	Potência resultante pela incidência relativa do vento (W)
P_{turb}	Potência fornecida pela turbina (W)
δ	Ângulo relativo de incidência ($^\circ$)
$P(v_{\infty\delta})$	Potência em relação a velocidade tangencial ao vento (W)
$P(v_{\infty})$	Potência em relação a velocidade normal ao vento (W)
ω_{opt}	Velocidade ótima (rad/s)
λ_{opt}	Velocidade de ponta de pá ótima
i_{aref}	Corrente de armadura de referência (A)
K_m	Constante de torque do motor CC (N/A)
V_a	Tensão aplicada nos terminais da armadura do motor CC (V)
i_a	Corrente de armadura do motor CC (A)
L_a	Indutância do enrolamento de armadura do motor CC (H)
R_a	Resistência do enrolamento de armadura do motor CC (Ω)
e_a	Força contra-eletromotriz (V)
V_f	Tensão aplicada nos terminais do circuito de campo do motor CC (V)
i_f	Corrente do circuito de campo do motor CC (A)
L_f	Indutância do enrolamento de campo do motor CC (H)

R_f	Resistência do enrolamento de campo do motor CC (Ω)
$i_{a_ref_pu}$	Corrente de armadura de referência em p.u.
i_{a_pu}	Corrente de armadura em p.u.
$C_{PI}(s)$	Controlador PI
M_{PWM}	Modulador por largura de pulso
H_i	Ganho do sensor de corrente
$G_{ia/d}$	Planta do motor
$e(s)$	Erro entre corrente medida e corrente de referência
u_{PI}	Ação de controle do controlador PI
f_{cz}	Frequência de cruzamento (Hz)
$T_{MA,NC}$	Função transferência em malha aberta não compensada
$T_{MA,C}$	Função transferência em malha aberta compensada
K_{PI}	Ganho proporcional do controlador PI
Z_i	Zero do integrador do controlador PI
T_a	Período de amostragem (s)
d	Razão cíclica da chave do conversor <i>buck</i>
i_{load}	Corrente da carga (A)
v_{load}	Tensão na carga (V)
L_{buck}	Indutância de filtro do buck (H)
C_{buck}	Capacitância de filtro do buck (F)
$CHI, \dots, 4$	Canais do osciloscópio

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Considerações iniciais	20
1.2	Objetivo Geral	21
1.3	Objetivos Específicos	22
1.4	Organização da Dissertação	23
CAPÍTULO 2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	Métodos de Emulação de Turbinas Eólicas	24
2.2	Emulador de Turbinas, Estado da Arte	25
CAPÍTULO 3	MODELOS ESTÁTICO E DINÂMICO DE HAWT E TURBINA MAGNUS	30
3.1	Tipos de Turbina Eólica	30
3.2	Potência do Vento	34
3.3	Modelo Estático da Turbina com Eixo Horizontal	36
3.4	Modelo Estático para a Turbina Magnus	36
3.5	Efeito Cortante do Vento e Sombreamento da Torre	39
3.6	Modelo Dinâmico das Massas Girantes e Compensação de Torque	40
3.7	Controle de Direção (<i>Yaw control</i>)	43
3.8	Métodos de MPPT em Sistemas de Conversão de Energia Eólica	45
3.9	Resumo do capítulo	46
CAPÍTULO 4	TOPOLOGIA DO EMULADOR PROPOSTO	47
4.1	Estrutura do Emulador de Turbinas de Eixo Horizontal	48
4.2	Estrutura do Emulador para a Turbina Magnus	49
4.3	Circuito de Potência e Controle do Motor CC	50
4.4	Projeto do controlador de corrente de armadura	52
4.4.1	Discretização do Controlador e Implementação Digital	55
4.4.2	Interface do Emulador de Turbinas de Eixo Horizontal no LabVIEW®	57
4.4.3	Interface no LabVIEW® do Emulador para Turbina Magnus	60
4.5	Resumo do capítulo	61
CAPÍTULO 5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	62
5.1	Resultados do emulador para Turbina de Eixo Horizontal	62
5.1.1	Resultados de Simulação	63
5.1.2	Resultados Experimentais	71

5.2	Resultados do Emulador para uma Turbina Magnus	77
5.2.1	Comparação entre Resultados Experimentais e Simulação.....	78
5.3	Resumo do capítulo	81
CAPÍTULO 6 CONCLUSÃO.....		82
6.1	Contribuições do Trabalho	83
6.2	Propostas de trabalhos futuros.....	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		85
ANEXO A – MODELAGEM DO MOTOR CC		90
A.1	Motor de Corrente Contínua	90
A.2	Dados do Motor CC	93
ANEXO B – GERADOR À ÍMÃS PERMANENTES E RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA.....		94
B.3	MPPT através do controle da corrente de carga do gerador.....	95
ANEXO C – PARÂMETROS DA TURBINA DE EIXO HORIZONTAL.....		97
ANEXO D – INSTRUMENTAÇÃO <i>BUCK</i> MPPT		98
ANEXO E – CÓDIGO FONTE DO PROGRAMA DO CONTROLE DE CORRENTE DE ARMADURA DO EMULADOR.....		99
ANEXO F – CÓDIGO FONTE DO PROGRAMA DO MPPT.....		104

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

As fontes renováveis têm se destacado no cenário energético mundial pela crescente demanda por fontes de geração limpas, principalmente aquelas livres da queima de combustíveis fósseis ou da energia nuclear. Dentre estas fontes, a geração eólica vem adquirindo espaço de destaque no mercado de geração.

A geração eólica está em visível expansão em nível mundial. No Brasil este crescimento também se apresenta visível, visto que 33% dos empreendimentos outorgados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) entre 1998 e 2013, que ainda não iniciaram sua construção, são centrais de geração eólica; não obstante, 11% dos empreendimentos atualmente em construção são deste mesmo tipo. (ANEEL, 2013)

1.1 Considerações iniciais

A maior procura pela instalação de aerogeradores para conexão à rede elétrica pode dar origem a problemas de estabilidade, especialmente se eles não forem devidamente testados previamente. Para isso fazem-se necessários estudos do controle de tensão, frequência, reativos e fluxo de carga tanto em condições nominais como em situações de contingências, assim visando aumentar a qualidade da energia produzida, reduzindo os distúrbios causados pela conexão e reconexão de turbinas eólicas (WT) no sistema elétrico. (ROCHA, 2008)

O uso e a operação da geração eólica dependem de uma série de estudos e testes preliminar, tanto para sistemas isolados como para os conectados à rede. Desta forma é desejável se dispor de um ambiente controlado que reproduza o comportamento dos aerogeradores no seu âmbito de funcionamento para avaliação, testes e seleção das topologias mais adequadas de conversores de potência e suas correspondentes técnicas de controle.

Como solução para isto, há a possibilidade da construção de um protótipo em escala reduzida e a sua utilização em um túnel de vento, o que é geralmente utilizado para estudos aerodinâmicos. Entretanto, em pesquisas sobre conversão de energia, eletrônica de potência e controle, esta solução torna-se complexa e onerosa demais, demandando por uma solução sistemática, flexível e confiável.

Em alternativa, há a possibilidade de reproduzir o comportamento da turbina eólica através do acionamento de uma máquina primária, assim emulando os efeitos sentidos pelo aerogerador frente a um perfil de vento. Dentre estes os que merecem um estudo detalhado podem-se destacar os seguintes: movimentação do ângulo de ataque das pás, sombreamento da torre, efeito cortante do vento, efeitos do direcionamento da turbina em relação ao vento, bem como a carga ótima do gerador e novos tipos de geração eólica como a modelagem da turbina Magnus.

Por isso este trabalho propõe uma plataforma de emulação que permita a entrada de dados das turbinas eólicas para reproduzir em tempo real o comportamento delas. Para demonstração do comportamento do emulador, utilizou-se um motor de corrente contínua (CC) e o gerador síncrono de ímãs permanentes (PMSG), com os eixos diretamente acoplados entre si, de tal forma a exercer os mesmos valores de torque no gerador acoplado a turbina real. Ambas as máquinas são acionadas por conversores controlados em tempo real, com o uso de algoritmos implementados no ambiente LabVIEW[®], processador digital de sinais (DSP) e microcontrolador.

No protótipo desenvolvido para esta dissertação pretende-se emular em uma máquina CC tudo o que poderia ser visto pelo gerador com relação a parte aerodinâmica da turbina eólica. Isto inclui toda a transformação da potência do vento incidente sobre as pás da turbina em potência aerodinâmica girante no seu eixo, reproduzindo o modelo estático (ângulo de passo das pás e coeficiente de potência) e modelo dinâmico (sombreamento da torre, efeito cortante do vento, direcionamento da turbina em relação ao vento, compensação da inércia, relação de transformação da caixa de engrenagens e amortecimento dos eixos). Faz-se possível com isso representar qualquer dinâmica de vento e as características do sistema de transmissão.

1.2 Objetivo Geral

Desenvolver um emulador de turbina eólica (WTE, do inglês *wind turbine emulator*) que forneça para um gerador elétrico o mesmo torque dinâmico que seria gerado pelas pás de

uma turbina real sob determinado perfil de vento, representando, assim, seus modelos estático e dinâmico. Para maior equivalência com aerogeradores instalados em campo, foi reproduzido também a relação de transformação da caixa de engrenagens, o amortecimento do eixo da turbina e do motor, o efeito cortante do vento e o sombreamento da torre. Além de emular as turbinas convencionais, é incluído nesta dissertação um algoritmo de emulador que represente o modelo estático da turbina eólica do tipo Magnus, até então não descrito na literatura. Esta representação permitiu o controle manual da velocidade dos cilindros através de uma interface gráfica ou a possibilidade de ativar um rastreamento do ponto de máxima potência por meio do controle da velocidade dos cilindros. Considera-se este aspecto como uma contribuição do presente trabalho. Assim sendo, coloca-se a disposição da comunidade acadêmica os fundamentos gerais de uma plataforma controlada para teste e avaliação de estruturas de controle e análise de estabilidade, visando melhorar a qualidade de energia gerada.

A Figura 1.1 ilustra o objetivo desta dissertação, representando o aerogerador em campo (a) por um programa de computador, uma máquina primária e um circuito de acionamento que exercerá o controle do motor (b).

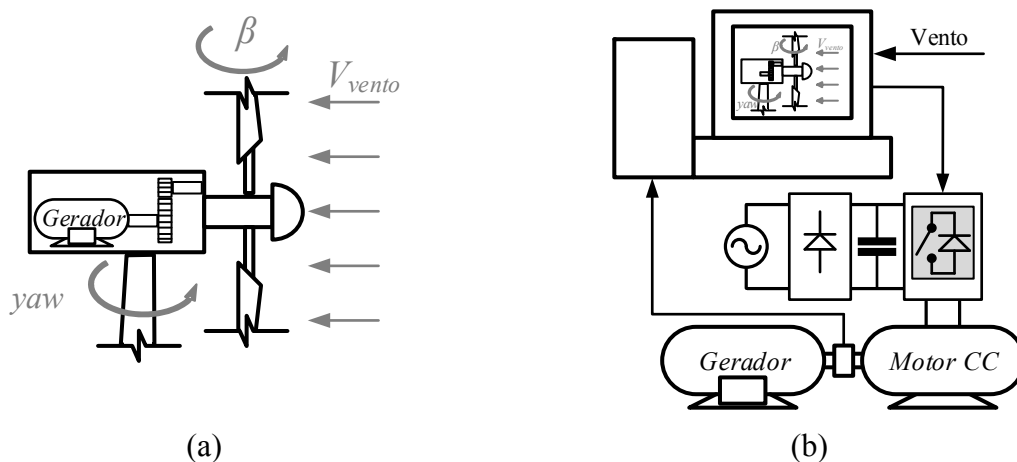


Figura 1.1 – Proposta de emulação de turbina eólicas. (a) aerogerador em campo; (b) plataforma de emulação.

1.3 Objetivos Específicos

- Realizar uma revisão sobre a modelagem de turbinas eólicas procurando reunir em um único emulador todos os aspectos das WT de eixo horizontal e a turbina baseada no efeito Magnus;

- Desenvolver um emulador que forneça a característica de torque para o WTE, incluindo toda a transformação da potência do vento incidente sobre as pás da turbina em potência aerodinâmica girante no seu eixo, reproduzindo o modelo estático (ângulo de passo das pás e coeficiente de potência) e modelo dinâmico (sombreamento da torre, efeito cortante do vento, direcionamento da turbina em relação ao vento, compensação da inércia, relação de transformação da caixa de engrenagens e amortecimento dos eixos);
- Efetuar uma pesquisa sobre o estado da arte em emuladores de turbinas eólicas;
- Propor uma topologia de emulação;
- Analisar os resultados experimentais.

1.4 Organização da Dissertação

O capítulo 1 introduz e motiva os assuntos abordados no trabalho.

O capítulo 2 aborda os principais métodos de emulação das turbinas eólicas onde é apresentada uma revisão do estado da arte em emuladores de turbinas eólicas.

O capítulo 3 expõe o referencial bibliográfico a respeito da potência contida no vento e sua conversão em potência mecânica; também apresenta os modelos das turbinas que serão emuladas e alguns efeitos aerodinâmicos e relações mecânicas características.

O capítulo 4 descreve a topologia de WTE proposta.

O capítulo 5 analisa os resultados simulados e experimentais obtidos.

O capítulo 6 apresenta as conclusões, a contribuição desta dissertação e as sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo faz uma revisão sobre os três principais métodos para emular turbinas eólicas, tais como fornecer uma mesma variação da velocidade, mesmo torque ou mesma inércia ao gerador. Em seguida é apresentado o estado da arte em WTE.

2.1 Métodos de Emulação de Turbinas Eólicas

Um emulador de turbina eólica é um importante equipamento para desenvolvimento de sistemas de conversão de energia eólica. Oferece um ambiente monitorado de testes que permite avaliar o projeto de controle para geradores elétricos. Isto seria difícil de se conseguir em uma turbina eólica no campo, já que a velocidade do vento varia aleatoriamente. Um motor CC usualmente é escolhido para prover a variação do torque de saída do aerogerador, uma vez que este torque é proporcional a corrente de armadura. (LOPES et al., 2005)

Os WTE são compostos, usualmente, por um motor controlado por malha de torque, o qual fornece as mesmas variações de potência mecânica a que seriam submetidas as turbinas eólicas reais. No método de emulação tradicional, a realimentação da velocidade do motor e determinada velocidade de vento são utilizadas para calcular o torque para o modelo estático da WT. No entanto, se os torques de saída do WTE e da WT forem exatamente os mesmos, as dinâmicas dos transitórios de velocidade entre os dois sistemas serão diferentes em função da diferença entre os coeficientes de amortecimento e os momentos de inércia. (GUO et al., 2009)

Existem três principais maneiras de se emular uma turbina eólica, conforme descrito em Rocha (2008): fornecer a mesma inércia, a mesma variação de velocidade ou mesmo torque.

Utilizando a mesma inércia, o sistema emulado tem a mesma inércia que teria o sistema real vista pelo eixo do gerador. Apesar da massa do sistema ser de elevada grandeza, a relação (3.20) mostra que a inércia da turbina é reduzida de modo inversamente proporcional ao quadrado da relação de transformação da caixa de engrenagens. O funcionamento deste sistema utiliza volantes de inércia, por isso apresenta a desvantagem de que para cada turbina a ser emulada é necessário um novo volante. (ARIFUJJAMAN; IQBAL; QUAICOE, 2006a)

Em WTE que utilizam mesma variação de velocidade, o sistema representado apresenta a mesma variação de velocidade que teria o sistema real que se deseja emular, produzindo assim condições dos regimes permanente e transitório. (ROCHA, 2008)

Utilizando o mesmo torque, a turbina emulada é representada pelo torque fornecido ao gerador, sendo este o mesmo torque que a turbina real possuiria para determinada velocidade de vento e de rotação. (LOPES et al., 2005) Neste caso, as características de regime permanente são levadas em conta, assim como os transitórios do sistema, logo permitindo a reprodução do efeito cortante do vento, da direção da turbina em relação ao vento e do sombreamento da torre, bem como a compensação da inércia. (GUO et al., 2009)

Portanto esta dissertação adota a emulação através de um motor de corrente contínua fornecendo o mesmo torque que uma turbina eólica exerceria ao gerador, considerando a diferença entre as inércias, coeficiente de amortecimento e relação de transformação da caixa de engrenagens, equacionado na Seção 3.6.

2.2 Emulador de Turbinas, Estado da Arte

Como discutido acima, o emulador tem o intuito de prever e reduzir a ocorrência de problemas em WECS (WECS, do inglês *Wind Energy Conversion System*), bem como de aumentar a qualidade da energia produzida, diminuindo os distúrbios e surpresas causadas pela conexão e reconexão de turbinas eólicas no sistema elétrico. Logo os emuladores de turbina eólica tornam-se uma ferramenta importante para desenvolvimento e teste de sistemas de conversão de energia eólica por oferecerem um ambiente controlado de teste. O emulador permite comparar o desempenho e aperfeiçoar técnicas de controle para geradores elétricos, o que é caro, demorado e complexo para se executar em um parque eólico, principalmente pela sazonalidade do vento.

Na literatura podem-se encontrar alusão a diversos tipos de motores que podem ser usados como máquinas primárias para o acionamento de WTE. Alguns autores argumentam

que o motor síncrono à ímãs permanentes (PMSG, do inglês *Permanent Magnet Synchronous Generator*) oferece vantagens em relação ao motor CC e ao de indução. Estas vantagens incluem o alto impulso de torque e a grande densidade de potência. Além disso, as máquinas CC são mais caras e exigem maior manutenção que as máquinas de indução. Porém o motor CC é largamente escolhido devido sua corrente de armadura ter uma relação direta com o torque produzido pela máquina, o que simplifica o controle e o circuito de acionamento. (LOPES et al., 2005)(NYE et al., 2012)(LU; CHANG-CHIEN, 2010)

Segundo descrito em Arifujjaman; Iqbal; Quaicoe (2006), a estrutura geral de um emulador de turbina eólica, consiste em um computador onde a característica da turbina é implementada, utilizando uma máquina primária CC ou CA para emular o rotor da turbina, um mecanismo de realimentação e circuitos de potência que acionam e controlam a máquina. O sinal de realimentação é usualmente adquirido pelo computador com conversor A/D. Os sinais para os equipamentos de eletrônica de potência vêm do computador através de um conversor D/A.

A topologia proposta ainda por Arifujjaman; Iqbal; Quaicoe (2006) discute um emulador para pequenos aerogeradores, incorporando o controle de velocidade, sistema de suprimento isolado para os equipamentos de eletrônica de potência e a extração da máxima potência. Para representar a dinâmica do rotor é acoplado ao eixo do motor CC um volumoso volante de inércia, o que limita sua aplicação, visto que é necessário um volante para cada turbina emulada. Neste trabalho as dinâmicas de acoplamento e a relação de velocidade da caixa de engrenagens não são consideradas no emulador, visto que o motor CC não emprega a compensação da inércia. Uma carga (*dump load*) é conectada ao gerador por meio de um conversor *buck-boost*, que utiliza a modulação por largura de pulso (PWM, do inglês *Pulse Width Modulation*) e através de um microcontrolador faz o rastreamento da máxima potência com o controle TSR.

Ainda sobre pequenas turbina eólicas, Gong e Xu (2008) afirmam que nenhum emulador de turbina eólica inclui o efeito da pequena inércia do conjunto turbina-gerador. Em algumas aplicações com pequenas turbinas eólicas ou turbinas de baixa velocidade ligadas diretamente ao gerador, a inércia do sistema é menor do que a do emulador devido a massa dos materiais empregados. Estes autores propõem um algoritmo de compensação da inércia que permite o emulador simular, em tempo real, tanto uma turbina com inércia grande ou pequena, porém não é considerado a relação de transformação da caixa de engrenagens, nem o amortecimento dos eixos. O torque do gerador é estimado com base em um observador de

segunda ordem desenvolvido para obter as variáveis de estado do sistema mecânico, assim o transdutor de torque (torquímetro) é eliminado.

A fim de incluir as pequenas inércias da turbina, a configuração do emulador é projetada para facilitar o fluxo bidirecional de potência. A topologia proposta pelos autores Gong e Xu (2008) consiste em um motor CC acionado por um conversor *chopper* de quarto quadrantes, o qual é conectado a um barramento CC alimentado por um retificador PWM.

Em Lopes et al. (2005) é apresentado um emulador de turbinas eólicas de eixo horizontal utilizando um motor de corrente contínua de ímãs permanentes, acionado por um conversor CC-CC. Este emulador representa os componentes harmônicos do torque devido ao efeito de sombreamento da torre (TS, do inglês *Tower Shadow*). Também implementa a compensação da inércia da turbina e o efeito do amortecimento do acoplamento do eixo e da caixa de engrenagens sem levar em conta sua relação de transformação.

O WTE encontrado em Monfared; Madadi Kojabadi; Rastegar (2008), também reproduz o comportamento do rotor de uma turbina eólica em condições dinâmicas através do acionamento do motor CC por um retificador semi-controlado, monofásico a tiristor empregando um controle de torque estimado através da corrente de armadura. A referência de torque desenvolvida pela turbina inclui o efeito de sombreamento da torre e cortante do vento (WS, do inglês *Wind Shear*), resultando em um torque de referência pulsado. São representados os comportamentos nos regimes permanente e transitório de uma turbina real. Como resultado são obtidas as características de C_p versus λ e P_m versus ω . No modelo dinâmico da turbina é feita a compensação da inércia, representando a relação de transformação da caixa de engrenagens, porém são considerados os amortecimentos do eixo da turbina e do motor.

Os autores Guo et al. (2009) apresentam uma topologia baseada no controle de torque de um motor de corrente contínua a ímãs permanentes, que permite a representação dos modelos estático e dinâmico de aerogeradores. No modelo dinâmico são representados os efeitos de TS e WS, é feita a compensação da inércia, levando em consideração o amortecimento do eixo, porém é desprezada a relação de transformação da caixa de engrenagens.

A análise em tempo real da curva torque-velocidade de um WTE em todo o processo de operação e comparação com uma turbina real é narrado por Li et al. (2007), no qual o emulador usa um motor CC e apenas as características estáticas de torque-velocidade são levadas em conta, assim não representando as características de uma turbina real. A topologia

descrita nesse trabalho analisa duas situações; na primeira o emulador provê as velocidades subsíncrona, síncrona e supersíncrona para testes da estratégia de controle do gerador. Nesta etapa de funcionamento aplicam o controle de velocidade através de uma malha interna de corrente e uma malha externa de velocidade. Na segunda situação, o emulador produz a característica torque-velocidade para pesquisa do rastreamento do ponto de máxima potência. Nesta situação, visto que o torque produzido é diretamente proporcional a corrente de armadura, empregam apenas o controle de corrente do motor CC. O controle e o modelo da turbina são implementados através de um DSP, que calcula o torque de referência e altera suavemente entre as duas situações descritas de acordo com o modo de operação. O protótipo também dispõe de uma interface gráfica.

O trabalho descrito por Chinchilla; Arnaltes; Rodríguez-Amenedo (2004), compreende apenas a comparação entre turbinas eólicas de velocidade fixa e variável; os efeitos de WS e TS são levados em consideração, porém a compensação da inércia é desconsiderada. Os autores utilizam um motor CC e um programa de computador para o controle. O protótipo também apresenta uma interface gráfica com o usuário, permitindo a entrada dos parâmetros da turbina e do vento, e a visualização dos principais resultados experimentais (velocidade, torque, potência e energia). É utilizado por estes autores, dois tipos de geradores, o gerador síncrono a ímã permanente (PMSG) e o gerador de indução gaiola de esquilo. Quando empregado o GI, o coeficiente de potência da turbina com controle de *stall* é escolhido pois, segundo os autores, a limitação de potência para as velocidades de vento maiores que a nominal é feita por este tipo de controle para turbinas de velocidade fixas. Quando utilizado o PMSG, o coeficiente de potência é função do ângulo de passo das pás, pois a limitação de potência para velocidades de vento maiores que a nominal é feita pelo controle de β em turbinas de velocidade variável.

Outra configuração de emulador de turbina eólica, baseada na teoria do momento das pás, é descrito em Ohyama e Nakashima (2010). Os autores consideram os coeficientes sustentação e arrasto. Portanto, os fluxos de ar para diferentes tipos de turbinas podem ser calculados pela análise do fluido. Logo, este emulador pode emular novos projetos de turbinas eólicas sem a construção das mesmas. Segundo os autores, através da análise do fluido, o controle e os parâmetros do motor e o projeto da turbina eólica podem ser otimizados simultaneamente. O modelo mecânico e as condições do gerador são consideradas e esta topologia não leva em consideração a relação de transformação da caixa de engrenagem, nem

o amortecimento dos eixos. O vento, porém foi colocado em condições arbitrárias e o efeito de sombreamento não foi considerado.

Em Martínez; De Pablo; Herrero (2011) é apresentado um emulador para turbinas eólicas de passo fixo utilizando o controle em malha aberta. O emulador apresentado é um acoplamento em série de uma fonte variável de tensão CC e uma resistência de potência a um motor CC. A variação da tensão CC tem o mesmo efeito que a mudança de velocidade do vento em uma turbina eólica. Neste trabalho, os autores alegam que não é necessário um sistema realimentado para proporcionar curvas de potência similares as da turbina eólica, porém sem um laço de controle não se pode afirmar que o torque exercido realmente é o mesmo de referência, obtendo, assim, um resultado duvidoso quanto a semelhança com turbinas reais. O sistema consiste de duas máquinas CC, uma utilizada como motor e a outra como gerador. A tensão CC para alimentar o motor vem de um retificador monofásico semi-controlado e um inversor semi-controlado é conectado ao gerador com a finalidade de regular sua velocidade. Este trabalho objetiva obter as curvas de potência mecânica do emulador em função da rotação para diferentes valores de tensão de alimentação. Ao trabalhar em malha aberta, o sistema de emulação fica mais simples, pois não precisa da realimentação de medidas do motor e então não há nenhum problema de interação entre os laços de controle (emulador da turbina e gerador). Porém, segundo os autores, este emulador tem limitações em baixas velocidades devido ao incremento de potência da resistência série.

Para esta dissertação a topologia proposta está descrita no CAPÍTULO 4 e é baseada nas referências apresentadas, utilizando também um motor de corrente contínua. Porém o grande diferencial é a implementação de um emulador para representar o modelo de regime permanente da turbina eólica do tipo Magnus, ainda não descrito na literatura. Além disso, um único emulador pode fornecer um ambiente de teste para estruturas de controle e avaliação em problemas de qualidade de energia, e representar o torque dinâmico gerado pelas pás da turbina. O emulador aqui proposto além de reproduzir o modelo estático, representa também o modelo dinâmico das massas girantes, incluindo a relação de transformação da caixa de engrenagens, o amortecimento do eixo da turbina e do motor, o efeito cortante do vento e o sombreamento e a direção do vento em relação à turbina, da torre para turbinas tradicionais de eixo horizontal.

CAPÍTULO 3

MODELOS ESTÁTICO E DINÂMICO DE HAWT E TURBINA MAGNUS

O vento vem sendo utilizado como fonte de energia por centenas de anos para propulsão de navios, moagem de grãos e bombeamento d'água. Todavia o primeiro registro do uso de uma turbina eólica para geração de eletricidade data apenas de 1891, quando foi construída por Poul la Cour uma central que utilizou a eletricidade gerada para eletrólise de água, assim produzindo hidrogênio para iluminar uma escola local. (MASTERS, 2004)

Esta seção aborda uma breve introdução sobre os principais tipos de turbinas eólicas, potência disponível no vento e sua máxima relação com a potência convertida pela turbina. Ainda nesta seção é apresentado o modelo aerodinâmico em regime permanente das turbinas de eixo horizontal e da turbina Magnus. Por fim aborda-se o modelo dinâmico obtido através da análise das massas girantes, o efeito cortante do vento e o sombreamento da torre.

3.1 Tipos de Turbina Eólica

As turbinas eólicas são dispositivos que transformam a energia cinética do vento em energia mecânica, conversão esta determinada pelas forças aerodinâmicas do vento. Um método de classificação das turbinas eólicas é quanto a posição do eixo de giro das pás. Existem turbinas de eixo vertical e horizontal, sendo o segundo tipo dividido em *upwind* (contra o vento) e *downwind* (a favor do vento), as quais, atualmente, são as mais utilizadas para geração de energia elétrica, conforme ilustrado nas Figura 3.1 (a) e (b). A posição de giro das turbinas de eixo vertical é em relação ao solo e estão esboçadas na Figura 3.1 (c). (MASTERS, 2004)

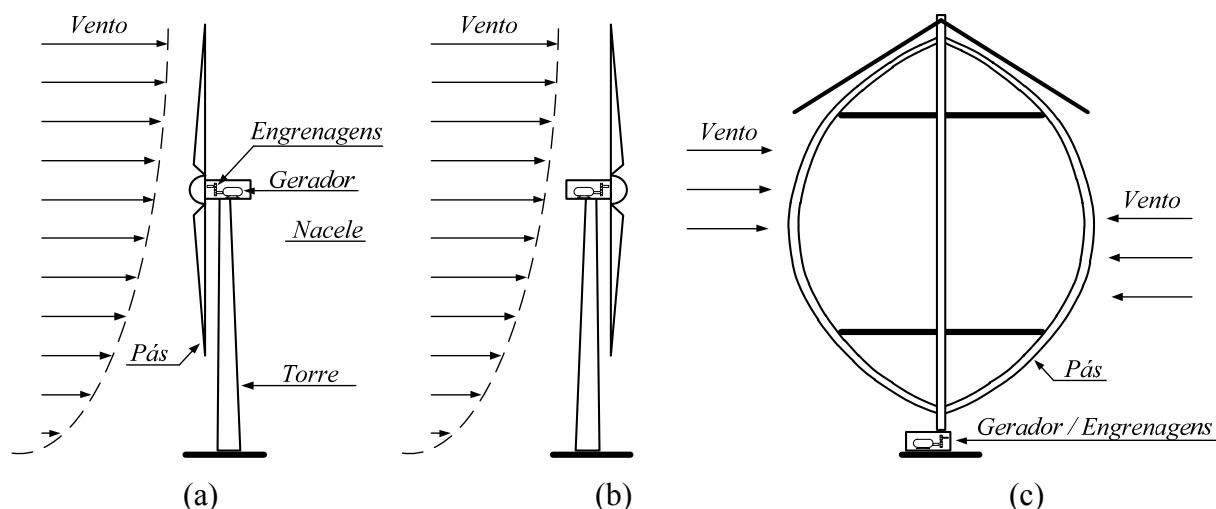


Figura 3.1 – Turbinas de eixo horizontal (HAWT) tipo *upwind* (a) e *downwind* (b) e turbinas de eixo vertical (VAWT) (c).

As turbinas de eixo vertical têm como vantagens não necessitar um mecanismo de direcionamento tornando possível que o maquinário que abriga a nacela (que contém o gerador, caixa de engrenagem e outras partes) possa ficar ao nível do solo. Esta medida facilita a manutenção periódica e reduz o peso no topo da torre, acarretando menor custo em obras de construção civil. Todavia, as desvantagens desta topologia incluem a impossibilidade de controle da rotação para proteção do gerador, necessitando obrigatoriamente de um sistema de frenagem. Também por estarem mais próximas ao solo, são incididas por ventos mais turbulentos e de menores velocidades, além de necessitarem uma fonte externa de energia para acionar as pás durante a partida. (GASCH; MAURER; HEILMANN, 2011)

As turbinas de eixo horizontal necessitam estar sempre perpendiculares ao fluxo do vento, afim de capturar o máximo de energia. Elas são as mais utilizadas para produção de energia elétrica. As vantagens deste tipo de turbina incluem a alta eficiência, alta densidade de potência, baixas velocidades no início de operação (denominada por velocidade de *cut-in*) e menor custo por unidade de potência. No entanto, apesar da maioria das turbinas instaladas serem de eixo horizontal, ainda é controversa qual seja a melhor topologia. (MASTERS, 2004)

Baseadas na configuração do rotor em relação à direção do fluxo de vento, as turbinas de eixo horizontal são divididas em dois tipos, as *downwind* e as *upwind*. Nas turbinas *downwind*, o vento sopra primeiro na nacela e torre e depois atinge as pás (Figura 3.1 (b)). A vantagem deste tipo de turbina é a de adotar um formato aerodinâmico na nacela onde o

próprio vento faz o controle de direção. Porém, o efeito do sombreamento da torre (identificado na Seção 3.5) é maior nessa configuração, aumentando a fadiga sobre as pás, reduzindo assim a potência de saída e durabilidade. (MASTERS, 2004) (TONG, 2010)

A maioria das turbinas usadas são *upwind*, onde o rotor está de frente para o vento (Figura 3.1 (a)). A principal vantagem deste tipo é que evita a distorção do fluxo quando o vento passa pela torre e nacela. Além disso, opera mais suavemente e entrega maior potência em comparação com a topologia *downwind*, porém exige um controle mais complexo de alinhamento com o vento (*yaw control*).

O controle de direção da turbina em relação ao vento, abordado em mais detalhes na Seção 3.7, consiste basicamente em um sistema de controle de direcionamento da nacela com a finalidade de alinhar o rotor na mesma direção do vento, maximizando a potência de saída e minimizando a ação de cargas assimétricas nas pás e na torre. (TONG, 2010) (FADAEINEDJAD; MOSCHOPOULOS; MOALLEM, 2009)

Outro aspecto construtivo das turbinas de eixo horizontal engloba o número de pás. Todavia as turbinas com elevado número de pás são comuns em bombeamento d'água e moagem de grãos. Estas máquinas geralmente necessitam de um elevado torque inicial para vencer a inércia do equipamento acoplado ao eixo, ainda que não necessitem operar em elevada rotação. Não obstante, turbinas com múltiplas pás operam em baixa rotação. A medida que a rotação aumenta, a turbulência causada por uma pá sobre a outra aumenta, afetando a seguinte, o que acarreta perda de velocidade e potência. Por consequência, quanto menor a quantidade de pás, menor é a influência mútua e maior pode ser a velocidade da turbina (MASTERS, 2004).

Ainda existe a turbina Magnus, cujo princípio de funcionamento é baseada no efeito Magnus. A grande novidade desta turbina é o fato dela possuir cilindros giratórios no lugar das tradicionais pás das turbinas eólicas convencionais, ilustrada na Figura 3.2. Seu modelo em regime permanente é descrito na Seção 3.4. O emulador estudado nesta dissertação apresenta um diferencial importante por incluir também a emulação deste tipo de turbina.

O efeito Magnus é um fenômeno físico no qual um objeto, neste caso um cilindro, girando em torno de seu eixo imerso em um fluxo de fluido cria uma camada limite de ar ao redor dele mesmo, induzindo nele um movimento circular. (CORRÊA et al., 2013a)

3.2 Potência do Vento

É conhecido da física clássica que a energia cinética de uma massa pode ser descrita pela Equação (3.1).

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_\infty^2 \quad (3.1)$$

Sabe-se, também, que a potência é a variação da energia em um determinado intervalo de tempo. Para as turbinas eólicas, utiliza-se a variação no tempo de uma dada massa de vento atravessando certa área circular varrida pelas pás da turbina, esboçada na Figura 3.4 e demonstrada na Equação (3.2). (GASCH; MAURER; HEILMANN, 2011)

$$P_{mec} = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \cdot v_\infty^2 \cdot \frac{dm}{dt} \quad (3.2)$$

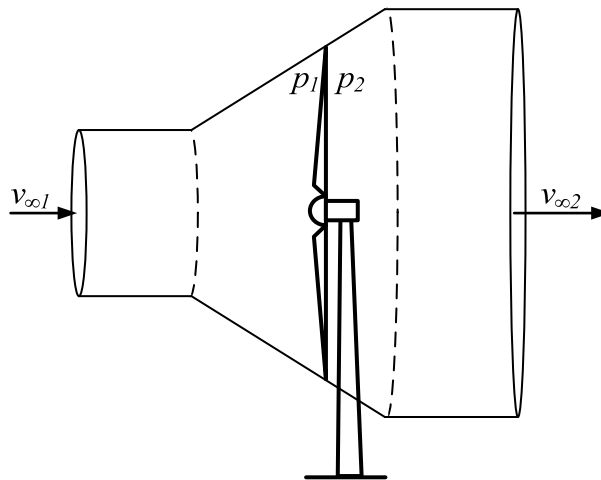


Figura 3.4 – Fluxo de ar através de uma determinada área A.

Considerando que o fluxo médio de um fluido, de densidade ρ e volume V , é definido pelo produto da velocidade média escoando por uma determinada área ($\bar{Q} = A \cdot \bar{v}_\infty$), como indicado pela Equação (3.3). (FARRET; SIMÕES, 2006)

$$\frac{dm}{dt} = \rho \cdot A \cdot \left(\frac{v_{\infty 1} + v_{\infty 2}}{2} \right) \quad (3.3)$$

Contudo, devido a queda de pressão entre p_1 e p_2 , ocorre uma diferença de velocidade entre $v_{\infty 1}$ e $v_{\infty 2}$, acarretando uma diferença na energia cinética que caracteriza a potência mecânica líquida, expressa em W/m^2 , estimada pela Equação (3.4).

$$P_{mec} = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (v_{\infty 1}^2 - v_{\infty 2}^2) \cdot A \cdot \left(\frac{v_{\infty 1} + v_{\infty 2}}{2} \right) \quad (3.4)$$

Baseando-se na Equação (3.4), é usual adotar a potência mecânica em função da velocidade $v_{\infty 1}$, com isso obtendo-se a Equação (3.5).

$$P_{mec} = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot v_{\infty 1}^3 \cdot \left(1 - \frac{v_{\infty 2}^2}{v_{\infty 1}^2} \right) \cdot \left(1 + \frac{v_{\infty 2}}{v_{\infty 1}} \right) \quad (3.5)$$

Reescrevendo a Equação (3.5) emprega-se o conceito de coeficiente de potência da turbina (C_p) nas Equações (3.6) e (3.7) para expressar o quão eficiente é a conversão da energia do vento em energia mecânica. Todavia, se considerar C_p uma função de $v_{\infty 2}/v_{\infty 1}$, seu valor máximo vai ser quando $v_{\infty 2}/v_{\infty 1} = 1/3$, resultando em $C_p = 16/27 = 0,5926$. Este valor é conhecido como limite de Betz, o qual indica a máxima relação possível de conversão de energia. (CATANÃ; SAFTA; PANDURU, 2010)

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_{\infty 1}^3 \cdot C_p \quad (3.6)$$

$$C_p = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{v_{\infty 2}^2}{v_{\infty 1}^2} \right) \cdot \left(1 + \frac{v_{\infty 2}}{v_{\infty 1}} \right) \quad (3.7)$$

O processo de conversão da energia cinética do vento em energia mecânica pode ser melhor descrito utilizando a definição de velocidade na ponta de cada pá (TSR, do inglês *Tip Speed Ratio*), definido pela Equação (3.8) como a relação entre a velocidade tangencial da turbina (ωR) e a velocidade do vento.

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{V_{\infty}} \quad (3.8)$$

Uma turbina eólica pode operar com TSR variando dentro de uma larga faixa. Porém o coeficiente de potência máximo é obtido apenas para um valor ótimo de λ , que resulta na máxima eficiência da conversão de energia para dada turbina, correlacionado com determinada velocidade de vento. A Seção 3.8 introduz alguns dos principais métodos de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT, do inglês *Maximum Power Point Tracking*) aplicados em sistemas de conversão de energia eólica.

3.3 Modelo Estático da Turbina com Eixo Horizontal

A equação genérica usada para modelagem do coeficiente de potência de uma turbina eólica de eixo horizontal é enunciada pelas Equações (3.9) e (3.10), onde: $c_1 = 0,5179$; $c_2 = 116$; $c_3 = 0,4$; $c_4 = 5$; $c_5 = -21$ e $c_6 = 0,0068$ são os parâmetros das turbina. (MOLIN; MERCADO, 2009) (HEIER; WADDINGTON, 2006).

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \cdot \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \cdot \beta - c_4 \right) \cdot e^{\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 \cdot \lambda \quad (3.9)$$

$$\lambda_i = \left(\frac{1}{\lambda + 0,089 \cdot \beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \right)^{-1} \quad (3.10)$$

A Figura 3.5(a) ilustra a característica em regime permanente de um aerogerador C_p versus TSR para diversos ângulos de passos das pás e (b) ilustra a superfície de $C_p(\lambda, \beta)$ para diversas situações. Através desta figura, é possível distinguir que para cada velocidade do vento existe um ponto de máxima potência (MPP, do inglês *Maximum Power Point*). Assim sendo, para se obter o melhor rendimento do sistema se faz necessário um método de controle, que resulte na operação com velocidade variável do rotor. Alguns destes métodos serão descritos na Seção 3.8.

3.4 Modelo Estático para a Turbina Magnus

O aerogerador Magnus (Figura 3.2) é uma turbina de eixo horizontal cuja principal característica, em relação às turbinas convencionais, é possuir cilindros que giram em seu próprio eixo ao invés de utilizar as tradicionais pás, assim produzindo o efeito Magnus.

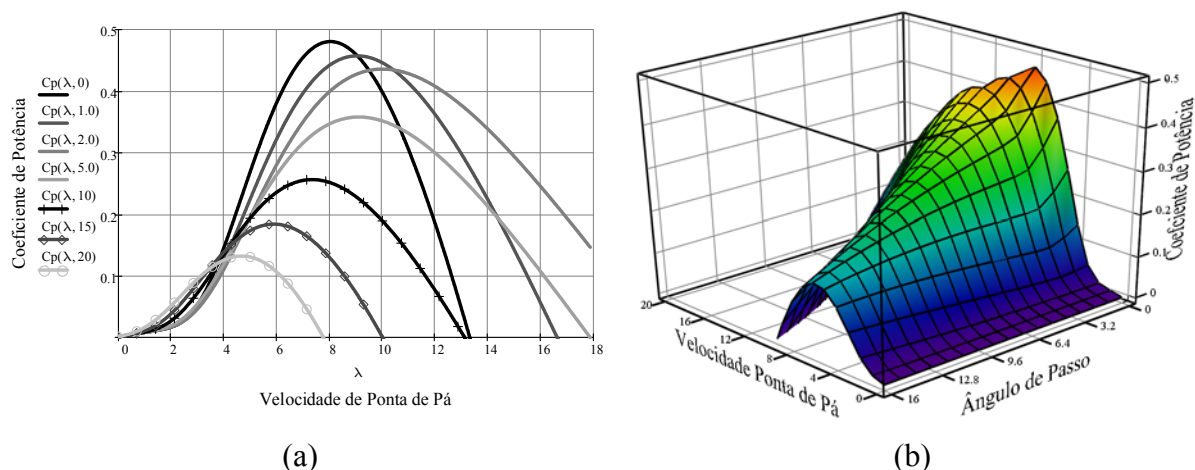


Figura 3.5 – Coeficiente de potência versus Velocidade de ponta de pá para diversos ângulos de passo das pás. (a) $\beta = 0, \beta = 1, \beta = 2, \beta = 5, \beta = 10, \beta = 15$ e $\beta = 20$; (b) Curva da superfície $C_p(\lambda, \beta)$.

As características das turbinas eólicas com cilindros giratórios dependem de parâmetros geométricos, cinemáticos e energéticos. Logo, as forças de sustentação podem ser aprimoradas através da modificação do formato da superfície do cilindro e do controle de sua velocidade. (BYCHKOV; DOVGAL; SOROKIN, 2008)

A Figura 3.3 identifica as ações das forças de sustentação (*lift*) e arrasto (*drag*) geradas pela rotação de um cilindro imerso em um fluxo de fluido. A força de sustentação pode ser obtida usando o teorema de Kutta-Joukowski, que resulta na Equação (3.11), onde Γ é a circulação do fluido, definido pela Equação (3.12). (LUO; HUANG; WU, 2011)

$$L = \rho \cdot (\Gamma \times V_\infty) \quad (3.11)$$

$$\Gamma = \oint V ds = 2\pi\omega_c r_c^2 \quad (3.12)$$

Agrupando as Equações (3.11) e (3.12), sendo ω_c a rotação do cilindro e r_c seu raio; a expressão final para força de sustentação, por unidade de comprimento, é descrita pela Equação (3.13).

$$L = 2\pi\rho r_c^2 \cdot \omega_c \cdot V_\infty \quad (3.13)$$

O modelo da turbina Magnus utilizado nesta dissertação é inferido por Barbero et al. (2010), no qual são avaliados os torques gerados pelas forças de sustentação e arrasto de cada

cilindro. A potência dispendida por fricção dos cilindros durante a rotação, assumindo um fluxo laminar do fluido, é expressa pela Equação (3.14), onde Re identifica o número de Reynolds.

$$P_{perda} = T \cdot \omega_c = 1,328 \frac{\pi \rho d^4 \omega_c^3 (R - R_0)}{16 \sqrt{Re}} \quad (3.14)$$

Assim como nas turbinas convencionais, a turbina Magnus também utiliza o conceito de TSR especificado pela Equação (3.8). Além deste conceito, analogamente, é usada uma velocidade relativa para os cilindros (λ_c), identificada pela Equação (3.15).

$$\lambda_c = \frac{\omega_c \cdot r}{V_\infty} \quad (3.15)$$

Por consequência, o comportamento do coeficiente de potência da turbina Magnus em relação ao TSR e a velocidade relativa dos cilindros são interpretados graficamente pela curva de superfície da Figura 3.6 e equacionados pela Equação (3.16). (CORRÊA et al., 2013b)

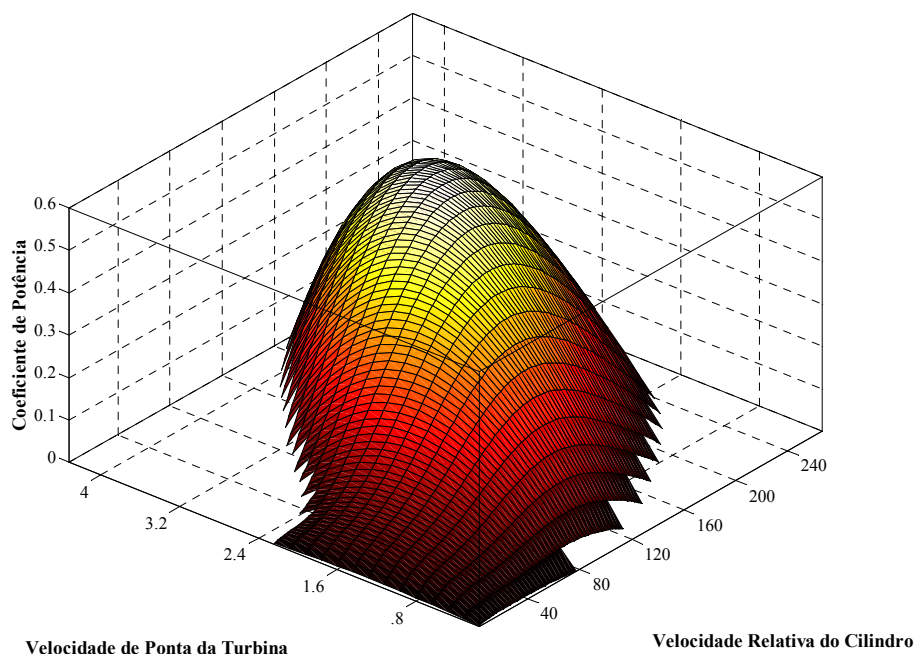


Figura 3.6 – Coeficiente de potência em função de λ e λ_c .

$$C_p = n_c \cdot \frac{(T_L - T_D) \cdot \omega}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_\infty^3} \quad (3.16)$$

O modelo de turbina utilizado nesta seção ainda inclui as perdas para o acionamento dos motores dos cilindros (P_{ac}), as quais foram especificadas para não ultrapassar 10% da potência nominal total da turbina (1,9 kW), logo 190 W, resultando num limite de rotação dos cilindros em 1500 rpm (0,126 W/rpm de perdas). Assim a potência total é dada pela Equação (3.17).

$$P_t = P_{mec} - P_{per} - P_{ac} \quad (3.17)$$

Uma contribuição paralela a este trabalho é a proposta de um algoritmo de maximização da potência baseado na otimização da rotação dos cilindros, visto que até então na literatura só consta para este tipo de turbina apenas a velocidade fixa de rotação dos cilindros. O controle sugerido é baseado no método *hill-climbing* com passo dividido, diminuindo a oscilação, logo a perda de potência, em torno do ponto de máxima potência uma vez que este foi alcançado. (CORRÊA et al., 2013b) (CORRÊA et al., 2013a)

3.5 Efeito Cortante do Vento e Sombreamento da Torre

Durante o giro das hélices de um aerogerador, a pá que aponta para cima encontra uma maior velocidade de vento do que a que está apontando para baixo, acabando por receber ventos em diversas alturas, como esboçado na Figura 3.7 (a). Esta variação da velocidade do vento em função da altura (h) é chamada de efeito cortante do vento (WS, do inglês *Wind Shear*). Um modelo exponencial do efeito cortante do vento, descrito pela Equação (3.18), é usualmente adotado para descrever esta diferença de velocidade. A variável $v_\infty(h_c)$ é a velocidade média do vento na altura de referência h_c , o expoente α representa rugosidade da superfície (para o mar ou deserto, $\alpha = 0,12$; área urbana, $\alpha = 0,2$). (PENG, 2011)

$$v_\infty(h) = v_\infty(h_c) \cdot \left(\frac{h}{h_c} \right)^\alpha \quad (3.18)$$

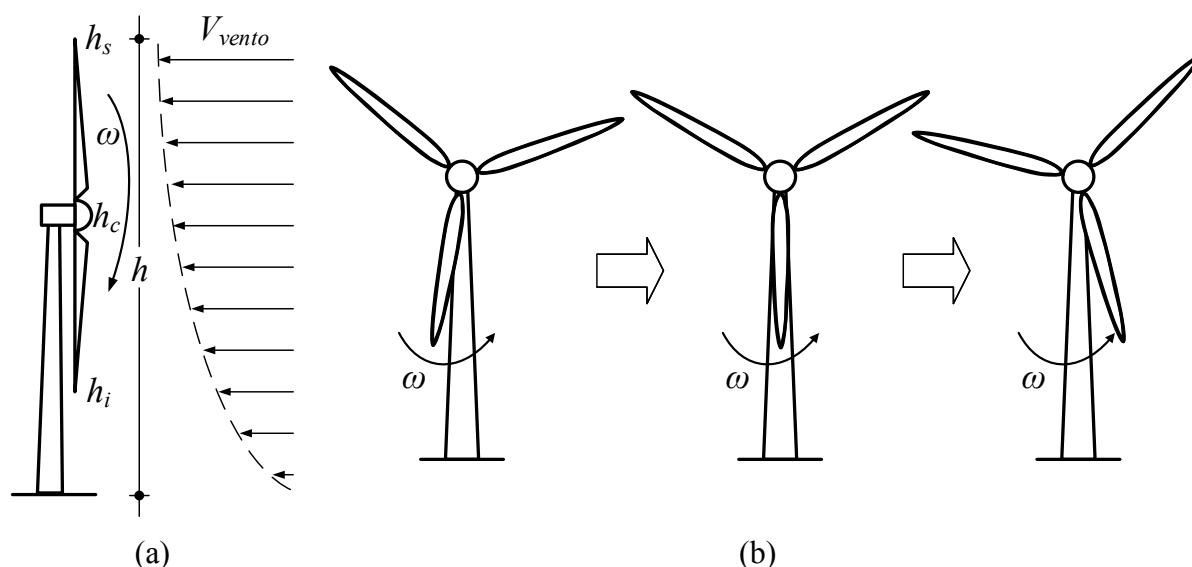


Figura 3.7 – Esquema do efeito cortante do vento (a) e sombreamento da torre (b).

Portanto, pulsações de torque são observadas devido às variações periódicas da velocidade do vento em diferentes alturas das pás. Estas pulsações ocorrem três vezes por rotação, devido a cada pá da turbina passar pelo ponto de mínimo e máximo vento durante uma volta. Há aí, também uma redução de torque ao passar em frente à torre, efeito conhecido como sombreamento da torre, acrescentando mais uma parcela nos harmônicos de terceira ordem, como esboçado na Figura 3.8 (b).

Assim, o modelo do WS e TS introduzindo harmônicos de 1ª e 3ª ordem de torque é descrito pela Equação (3.19) e ilustrado graficamente no domínio do tempo pela Figura 3.8 (a), onde $A_1 = 0,2$, $A_2 = 0,4$ e T_{turb} é torque aerodinâmico da turbina eólica (obtido pelo seu modelo estático). A Figura 3.8 (b) representa estes efeitos no domínio da frequência, sendo possível visualizar as componentes espectrais inseridas no torque. (MONFARED; MADADI KOJABADI; RASTEGAR, 2008) (GUO et al., 2009) (LOPES et al., 2005)

$$T_{shear} = T_{turb} \cdot [1 + A_1 \cdot \sin(\omega t) + A_3 \cdot \sin(3\omega t)] \quad (3.19)$$

3.6 Modelo Dinâmico das Massas Girantes e Compensação de Torque

O modelo dinâmico da turbina inclui a relação de conversão de velocidade através caixa de engrenagens, esta transmissão ainda possui um coeficiente de amortecimento (ou coeficiente de fricção) para eixo da turbina e do motor do emulador e o conjunto de inércias

da turbina, do gerador e do motor CC utilizado no acionamento. Este modelo é obtido igualando a aceleração do gerador do sistema real ao emulado em laboratório. (GUO et al., 2009).

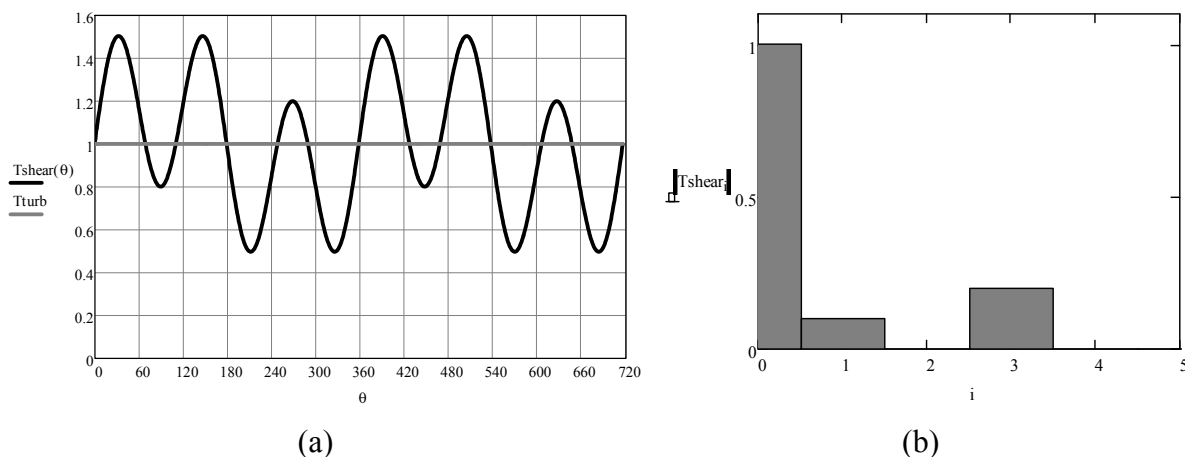


Figura 3.8 – Torque resultante do efeito do cortante do vento e sombreamento da torre (a) no domínio do tempo e (b) no do domínio da frequência.

O torque mecânico calculado a partir do modelo estático é utilizado como variável de entrada para o modelo dinâmico. Com isso é possível se emular aerogeradores de maior inércia que o motor utilizado, apenas alterando o torque que o motor de corrente contínua produz em resposta a determinada velocidade de vento. (MONFARED; MADADI KOJABADI; RASTEGAR, 2008)

O diagrama mecânico do sistema real e do sistema emulado é mostrado na Figura 3.9, onde o significado de cada variável é apresentado na Tabela 3.1.

As equações do movimento das pás em torno do eixo da turbina podem ser obtidas para ambos os sistemas aplicando a 2ª Lei de Newton. As Equações (3.20) e (3.21) descrevem as dinâmicas do sistema real e do emulado, respectivamente.

$$\frac{T_{turb}}{n} - T_{ger} = nB_{turb} \omega_{ger} + \left(\frac{J_{turb}}{n^2} + J_{ger} \right) \frac{d\omega_{ger}}{dt} \quad (3.20)$$

$$T_{motor} - T_{ger} = B_{motor} \omega_{ger} + \left(J_{motor} + J_{ger} \right) \frac{d\omega_{ger}}{dt} \quad (3.21)$$

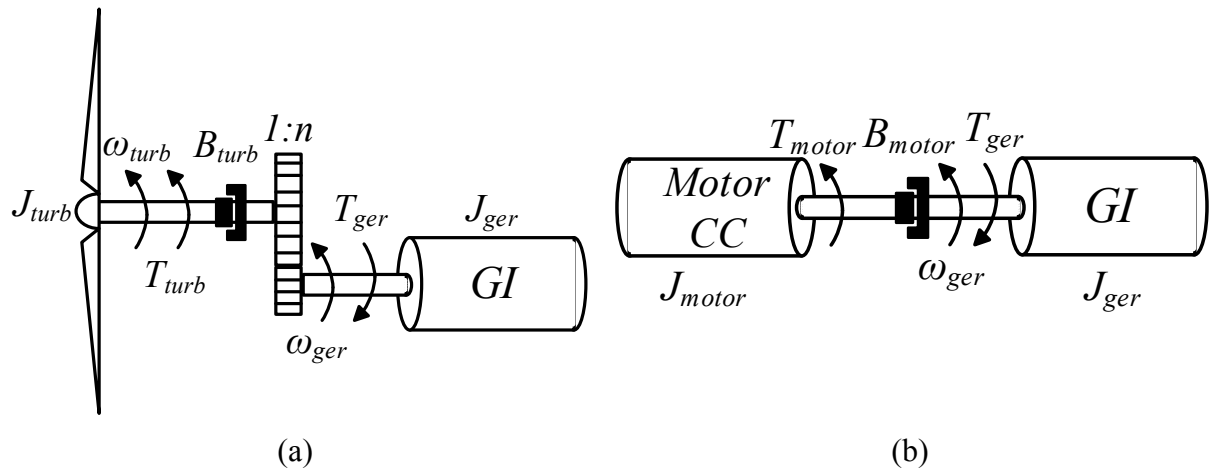


Figura 3.9 – Modelo mecânico do sistema real (a) e do sistema emulado (b).

Tabela 3.1. Simbologia utilizada na Figura 3.9.

Símbolo	Identificação
J_{turb}	Inércia da turbina
ω_{turb}	Velocidade da turbina
T_{turb}	Torque da turbina
B_{turb}	Coefficiente de amortecimento do eixo da turbina
$1:n$	Relação de transformação da caixa de engrenagens
ω_{ger}	Velocidade do gerador
T_{ger}	Torque do gerador
J_{ger}	Inércia do gerador
J_{motor}	Inércia do motor CC
T_{motor}	Torque do motor CC
B_{motor}	Coefficiente de amortecimento do eixo do motor

Visto que o objetivo do emulador é fornecer ao gerador o mesmo torque que uma turbina eólica real em pleno funcionamento possuiria, as Equações (3.20) e (3.21) podem ser reescritas pela Equação (3.22), para representar o torque que o motor CC deverá exercer para compensar a diferença de inércia e coeficiente de amortecimento.

$$T_{motor} = T_{turb} + (B_{motor} - nB_{turb})\omega_{ger} + \left(J_{motor} - \frac{J_{turb}}{n^2} \right) \frac{d\omega_{ger}}{dt} \quad (3.22)$$

Pela análise da Equação (3.22) a compensação do torque consiste de duas partes: compensação da inércia e compensação do coeficiente de amortecimento. A compensação da

inércia representa o processo dinâmico, visto que $d\omega/dt$ é zero para uma velocidade constante. Assim, a diferença de inércia não tem nenhuma influência sobre o efeito da emulação em regime permanente. Desta forma, a compensação do coeficiente de amortecimento permite que o gerador acoplado ao WTE receba o mesmo torque e potência de uma WT real. (GUO et al., 2009) Por conseguinte, o WTE representará com precisão a turbina eólica real se o torque de acionamento T_{motor} for controlado de acordo a Equação (3.22).

A Figura 3.10 detalha a Equação (3.22) representativa do torque de compensação que o motor deve exercer caso a turbina esteja rodando a determinada velocidade arbitrária apresentada em (a) e empregando um torque fixo. Em (b) é mostrado a influência do amortecimento do eixo no torque emulado, ilustrando que quanto maior for o coeficiente de fricção maior serão as perdas, logo não alcançando o torque ideal. Este fenômeno está representado na Figura 3.10 pela curva $T_{motorB}(t)$ em comparação ao torque sem o efeito de B_{urb} sintetizado em (b) por $T_{motor}(t)$. Também é constatado que quando não houver mudanças na velocidade, a parcela de compensação da inércia não exerce efeito no torque.

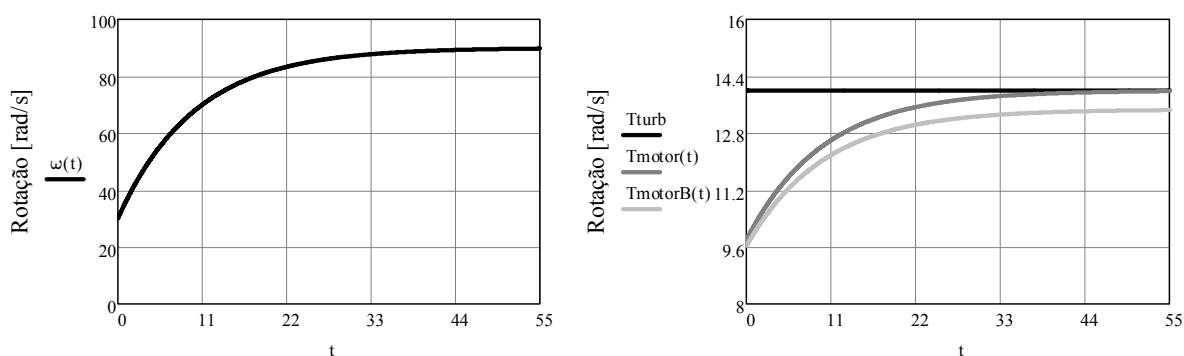


Figura 3.10 – Compensação da inércia no modelo dinâmico a uma dada velocidade; (a) Velocidade de rotação do motor; (b) Torque em regime permanente e torque compensado com e sem amortecimento do eixo.

3.7 Controle de Direção (*Yaw control*)

As turbinas eólicas de eixo horizontal necessitam de um dispositivo para alinhar seus rotores na direção do vento, a fim de maximizar a potência de saída e minimizar a ação de cargas assimétricas nas pás e na torre. Este mecanismo, conhecido como *yaw*, pode ser dividido em dois tipos: passivo e ativo. (TONG, 2010) (FADAEINEDJAD; MOSCHOPOULOS; MOALLEM, 2009)

No direcionamento passivo a turbina se alinha livremente na direção do vento usando sua cauda, sem a necessidade de medição de vento. Tal mecanismo é geralmente utilizado em WT de pequeno porte. Os aerogeradores com configuração *downwind* são outro exemplo de aplicação de *yaw* passivos. (FARRET; PFISCHER; BERNARDON, 2000)

Os mecanismos de *yaw* ativos são geralmente utilizados em turbinas maiores, com potência superior a 50 kW, quando então motores e caixas de engrenagens controlam o direcionamento da nacela para manter a turbina alinhada com o vento. Para isso, geralmente é montada uma pequena central que mede a velocidade e a direção do vento na parte superior da torre. Todavia há sistemas de controle sem sensores (*sensorless yaw*), como apresentado por Farret; Pfitscher; Bernardon (2001) e Xin; Yanping; Wei (2012).

O desalinhamento do eixo do rotor em relação ao sentido do vento é conhecido como erro de *yaw*, esboçado na Figura 3.11, causando perda de potência e provocando vibração na estrutura mecânica. (FADAEINEDJAD; MOSCHOPOULOS; MOALLEM, 2009)

Todavia a modelagem deste efeito seja complexa e envolva componentes oscilatórias em mais de uma direção, devido a vibração causada pela incidência assimétrica do vento, a potência resultante para determinada velocidade vento (v_∞), em função do ângulo relativo de incidência (δ), pode ser simplificada pela decomposição trigonométrica da potência da turbina, demonstrada na Equação (3.23).

$$P_{yaw} = P_{turb} \cdot \cos(\delta) \tag{3.23}$$

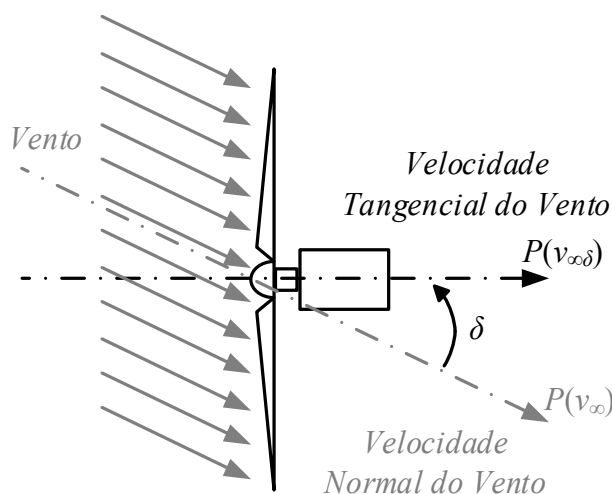


Figura 3.11 – Mecanismo de direcionamento da nacela.

3.8 Métodos de MPPT em Sistemas de Conversão de Energia Eólica

A energia eólica, ainda que abundante, varia continuamente com a mudança da velocidade do vento ao longo do dia. A potência de saída de WECS depende da precisão com que a máxima potência é rastreada, independente do tipo de gerador utilizado.

Os métodos de MPPT podem ser classificados em três principais tipos: controle por *tip speed ratio*, controle por realimentação do sinal de potência (PSF, do inglês *Power Signal Feedback*) e controle *hill-climbing* (HCC). Não obstante, Molin e Mercado (2009) propõe o método perturbação e observação (P&O) aplicado à geração eólica, visto que este algoritmo de controle é largamente utilizado e prova ser eficiente também em sistemas fotovoltaicos.

A potência para determinada velocidade de vento é máxima numa dada velocidade do rotor. Esta é a chamada velocidade ótima (ω_{opt}), como apresentada na Figura 3.12. Esta velocidade corresponde a um TSR ótimo (λ_{opt}) com o qual, a turbina deve operar para extração da maior potência. (THONGAM; OUHROUCHE, 2011)

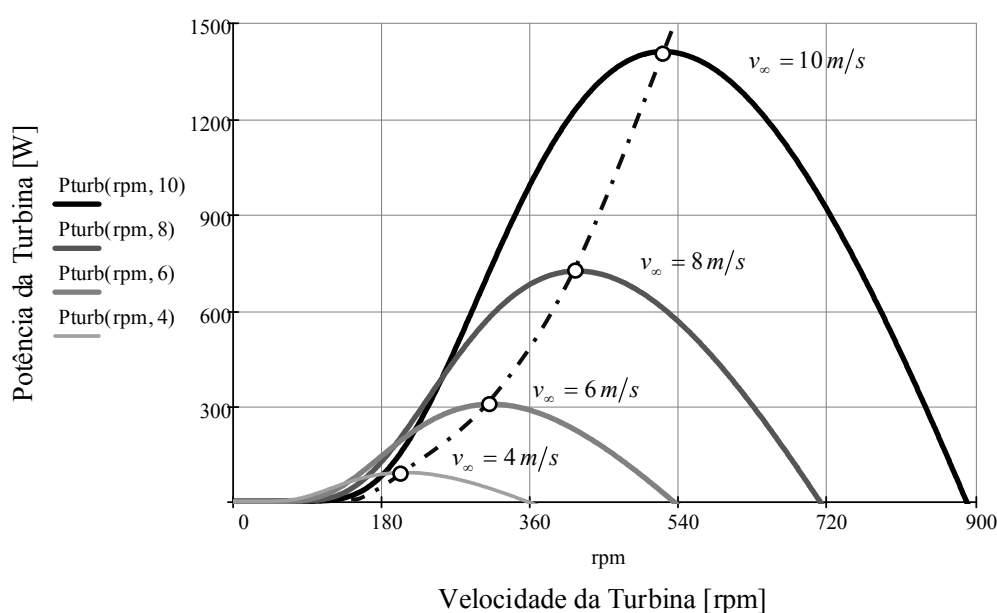


Figura 3.12 – Potência mecânica de uma turbina em função da rotação para diferentes velocidades de vento.

3.9 Resumo do capítulo

Este capítulo abordou, brevemente, alguns dos principais tipos de turbinas eólicas classificando-as quanto à posição do seu eixo de giro, assim diferenciando as HAWT das turbinas de eixo vertical. As turbinas de eixo horizontal foram divididas em *upwind* (contra o vento) e *downwind* (a favor do vento), os quais fazem referência a relação à direção do fluxo de vento incidido nelas.

Devido ao fato de que as turbinas eólicas convertem a energia cinética do vento em energia mecânica fornecida ao eixo de um gerador, foi abordada neste capítulo a potência contida em uma determinada massa de ar atravessando uma seção circular, fundamentando, assim, o limite de Betz, o qual define esta máxima relação de conversão.

Neste capítulo foi discutido analiticamente e demonstrado graficamente o comportamento dos modelos estáticos de uma HAWT e de uma turbina Magnus, apresentando as curvas de seu coeficiente de potência. Na turbina de eixo horizontal foi indicado o desempenho do C_p em função da velocidade de ponta de pá para diversos ângulos de passo das pás, já na turbina Magnus, avaliou-se, em uma curva de superfície, o coeficiente de potência com variação na velocidade da turbina e na rotação dos cilindros.

Foi feita uma análise do modelo dinâmico para HAWT levando em consideração o efeito cortante do vento e sombreamento da torre, que adicionam componentes harmônicos de primeira e terceira ordem da velocidade no torque calculado pelo modelo estático. O amortecimento do eixo, a inércia da turbina e a relação de transformação da caixa de engrenagens são levados em conta quando foi equacionada uma função para compensação da inércia, permitindo emular máquinas de grande inércia com motores menores.

O efeito do erro de alinhamento da nacela em relação à direção do vento foi demonstrado na seção 3.7, que, simplificando, decompõe trigonometricamente a potência disponível.

Esse capítulo ainda salientou alguns dos principais métodos de rastreamento de máxima potência aplicados em WECS, destacando o controle por *tip speed ratio*, controle por realimentação do sinal de potência e controle *hill-climbing*.

CAPÍTULO 4

TOPOLOGIA DO EMULADOR PROPOSTO

Neste capítulo é descrito a plataforma de emulação desenvolvida para esta dissertação. Para melhor interpretação, a análise do protótipo é apresentada em duas seções: a primeira descreve a implementação do WTE para as tradicionais turbinas de eixo horizontal e a segunda conceitua a topologia utilizada para a representação da turbina Magnus.

A descrição do circuito de potência para o acionamento do motor de corrente contínua e o projeto do controlador da malha de corrente com sua representação no domínio discreto e implementação digital através do DSP (DSP, do inglês *Digital Signal Processor*) *Texas Instruments* TMS320F28335 também são apresentadas neste capítulo. A modelagem do motor CC é apresentada no ANEXO A

Não obstante, é importante avaliar o comportamento entre a máquina primária e o gerador. Assim o modelo do sistema de geração é composto por um PMSG acoplado a um retificador trifásico não controlado alimentando um conversor *buck*. Este conversor é responsável por realizar o MPPT utilizando o controle *hill-climbing*, destarte regulando a corrente de carga, logo a velocidade de rotação do gerador. O ANEXO B apresenta os parâmetros do gerador, bem como as principais características do MPPT.

A estrutura do emulador é implementada através do ambiente virtual de instrumentação da *National Instruments*, LabVIEW[®], o qual é responsável pelo cálculo do modelo estático da turbina e disponibiliza a interface gráfica do processo, apresentada ainda neste capítulo. O LabVIEW[®], por meio de uma placa de aquisição da *National Instruments* NI-6009, executa a aquisição de dados da velocidade do motor e envia o torque da turbina e a velocidade do motor através de seu conversor digital-analógico (DAC, do inglês *Digital-to-Analog Converter*), ao DSP, servindo as variáveis de entrada para o modelo dinâmico.

4.1 Estrutura do Emulador de Turbinas de Eixo Horizontal

A Figura 4.1 apresenta um diagrama de blocos da topologia implementada, na qual salienta-se que a potência mecânica de uma turbina eólica é calculada através de seu modelo estático definido pelas Equações (3.9) e (3.10), que têm como entrada os coeficientes, velocidade ângulo de passo das pás da turbina, bem como a velocidade do vento.

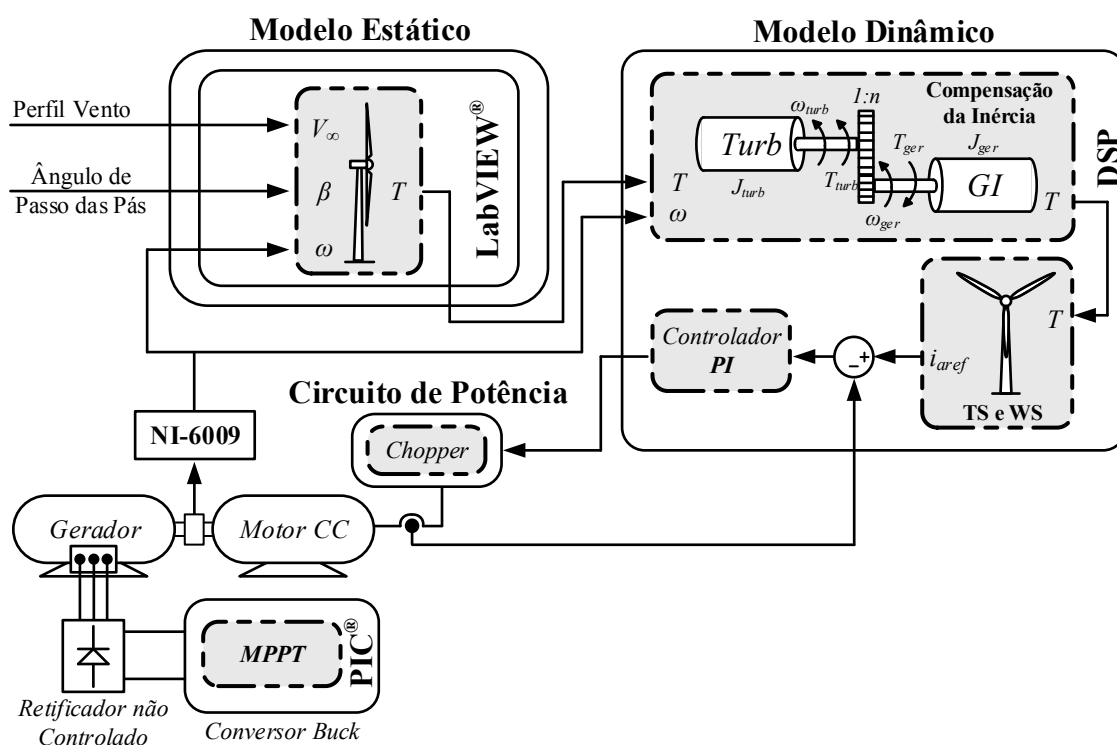


Figura 4.1 – Diagrama de blocos do emulador proposto.

Os programa desenvolvido no LabVIEW® permite a entrada de diversos parâmetros, tais como: c_1, c_2, \dots, c_6 , que definem o modelo da turbina nas Equações (3.9) e (3.10), ângulo de passo das pás, direcionamento da nacela em relação a velocidade do vento, que resultará na decomposição da potência gerada devido ao erro de *yaw*, equacionado pela Equação (3.23) e o perfil de vento. A velocidade de rotação da turbina, que determinará o ponto de operação na curva C_p versus λ é obtida através da placas de aquisição de dados. Com isso é possível o cálculo da potência mecânica e do torque disponível no modelo estático. Um diagrama de bloco apresentado as equações envolvidas é esboçado na Figura 4.2.

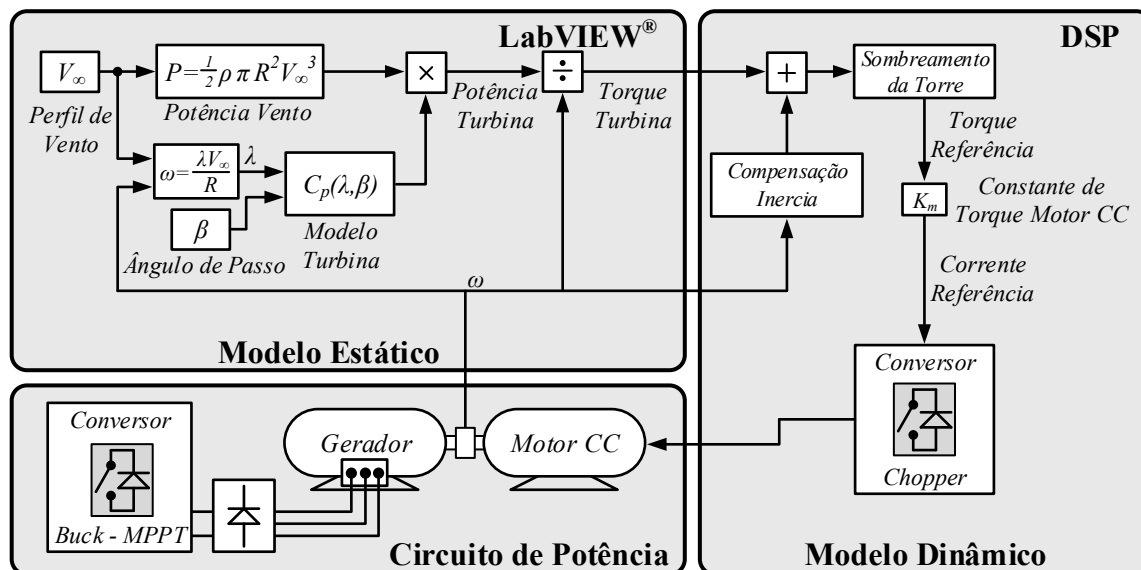


Figura 4.2 – Diagrama de blocos detalhado do emulador proposto.

O modelo dinâmico da turbina genérica usa um DSP para exercer as funções de controle, o qual faz a compensação da inércia por meio da Equação (3.22) e representa o efeito cortante do vento e sombreamento da torre através da Equação (3.19). Os parâmetros da turbina utilizados na simulação e emulação são apresentados no ANEXO C.

4.2 Estrutura do Emulador para a Turbina Magnus

A estrutura proposta para emulação da turbina Magnus, analogamente as demais turbinas, consiste em aplicar um perfil de vento em seu modelo estático, enunciado pela Equação (3.16). Os parâmetros de entrada do programa são o vento e a velocidade de rotação dos cilindros. Porém, o programa desenvolvido não só permite o controle manual da velocidade dos cilindros através de uma interface gráfica, mas também a possibilidade de ativar um rastreamento do ponto de máxima potência por meio do controle da velocidade dos cilindros, utilizando o HCC, como proposto em Corrêa et al. (2013b) e Corrêa et al. (2013a).

O rastreamento de máxima potência através do controle da rotação dos cilindros é uma das contribuições do presente trabalho, visto que a literatura registra, até o presente momento, este tipo de turbina operando apenas com velocidade constante dos cilindros. Entretanto, optou-se por não reproduzir o efeito dinâmico através da compensação da inércia devido a carência de informações na literatura e a premência de tempo disponível, como os valores de J_{turb} , B_{turb} e $I:n$. Também não são representados os efeitos de WS e TS pois, como esta não é

uma turbina largamente difundida, não se pode afirmar com certeza se a Equação (3.19) é válida também neste caso.

Todavia, a representação do modelo estático deste tipo de turbina ainda é inédito, como WTE. A Figura 4.3 esquematiza o emulador para turbina do tipo Magnus em um diagrama de blocos.

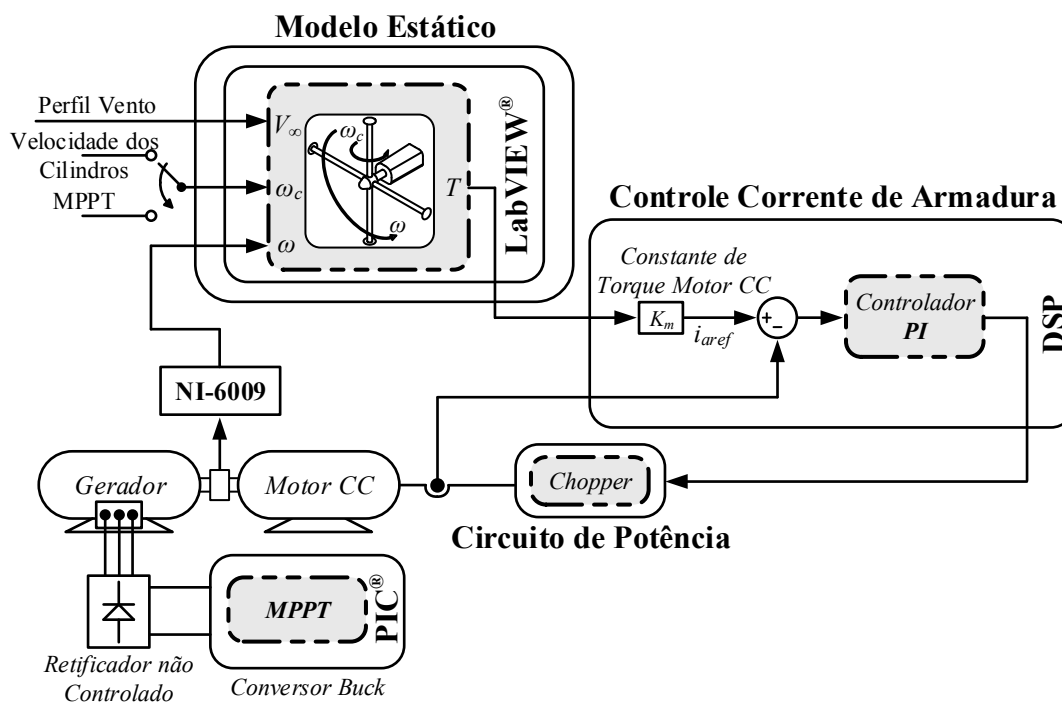


Figura 4.3 – Diagrama de blocos detalhado do emulador de turbina Magnus proposto.

4.3 Circuito de Potência e Controle do Motor CC

Os motores de corrente contínua têm sido amplamente utilizados em aplicações industriais de velocidade variável devido à sua característica desejável de velocidade *versus* torque e sua simplicidade de controle. (DJATMIKO; SUTOPO, 2001)

Para controlar a velocidade e/ou torque de motores de corrente contínua, basta controlar as tensões nos terminais do motor, de armadura e/ou de campo. Geralmente empregam-se conversores CC-CC chaveados, que fornecem uma tensão CC de saída regulada mesmo com uma tensão CC de entrada pouco regulada. Em comparação com as fontes de alimentação lineares, estes conversores possuem maior eficiência e densidade de potência. No chaveamento destas fontes empregam-se dispositivos de estado sólido operando como interruptores e elementos de armazenamento de energia, incluindo capacitores e indutores,

que são utilizados como filtros passa-baixa e para fornecer uma tensão de saída praticamente livre de ondulações. (GUO, 2007)

Em conversores CC-CC a tensão de saída é uma função da tensão entrada, da razão cíclica e da corrente de carga. Logo, com eles pode-se ajustar a magnitude das tensões que entram nos terminais motores, e assim controlar a velocidade e/ou torque do motor. Em particular, nesta dissertação utilizou-se um conversor do tipo *chopper* acionado por IGBT para regular a corrente de armadura do motor, e assim o seu torque, esquematizado na Figura 4.4 (a) que ilustra o seu emprego acoplado ao circuito de armadura do motor CC.

O controle por realimentação de corrente é aplicado aos conversores para ajustar automaticamente seu *duty cycle* e obter com alta precisão a tensão ou corrente de saída desejada. Nesta etapa utiliza-se um controlador proporcional-integral (PI), que garante erro nulo em regime permanente, operando em malha fechada de corrente cujo projeto é apresentado na próxima seção.

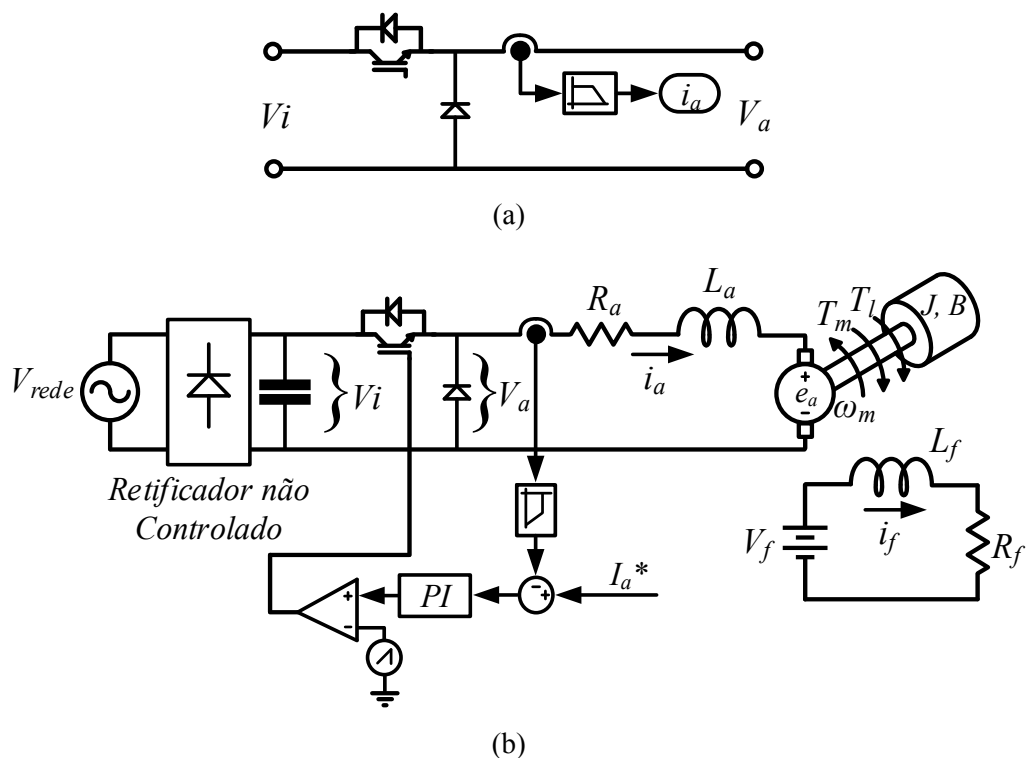


Figura 4.4 – Conversor CC-CC *chopper* (a) e sua aplicação no controle da tensão de armadura do motor CC (b)

O modelo dinâmico, no caso da HAWT e o estático da turbina Magnus fornecem um torque de referência a partir da velocidade do vento, que escalonado pela constante de torque

do motor serve como corrente de referência para o controle do motor CC. Com isso o DSP executa uma malha de controle gerando o PWM para a etapa de acionamento do *chopper*. O fluxograma de controle é apresentado na Figura 4.5.

Devido à elevada potência do motor utilizado (20 kW), o DSP ainda executa uma rotina de partida suave antes do início da emulação.

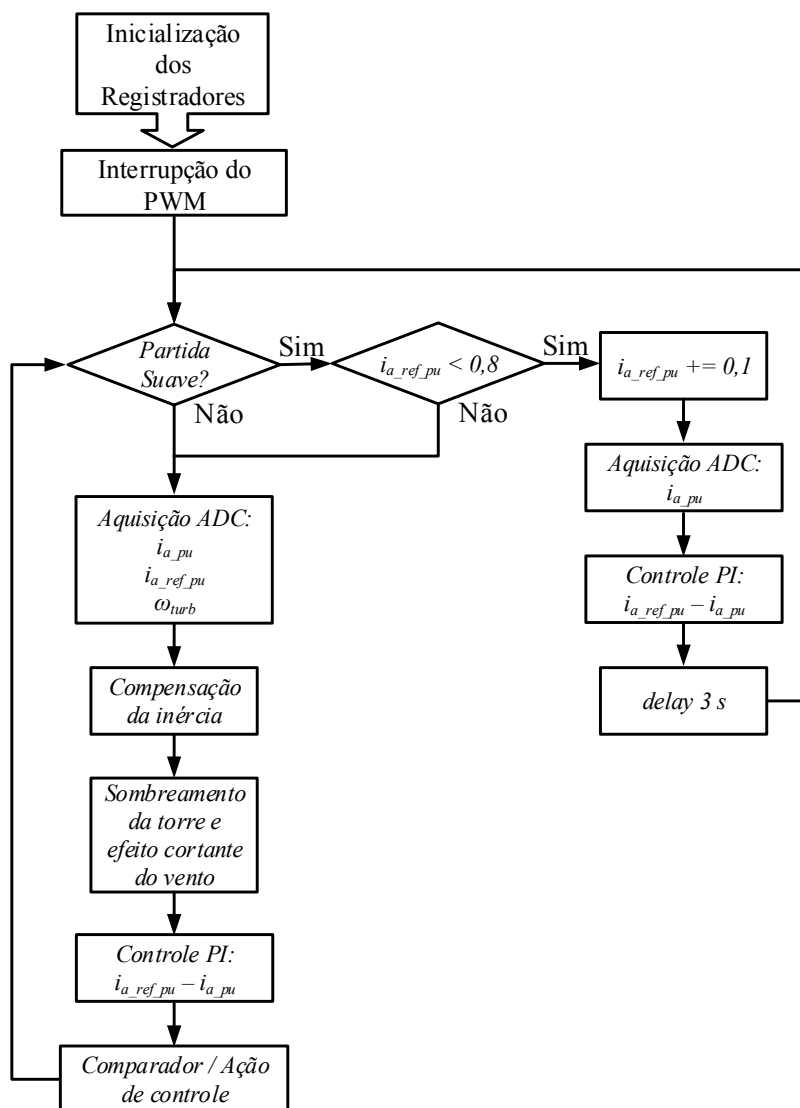


Figura 4.5 – Fluxograma de controle executado pelo DSP.

4.4 Projeto do controlador de corrente de armadura

Na Figura 4.6 é apresentada a malha de corrente de armadura, formada por um controlador PI, $C_{PI}(s)$, um modulador por largura de pulso, M_{PWM} , um sensor de realimentação para corrente, H_i e a planta do motor, $G_{ia/d}$.

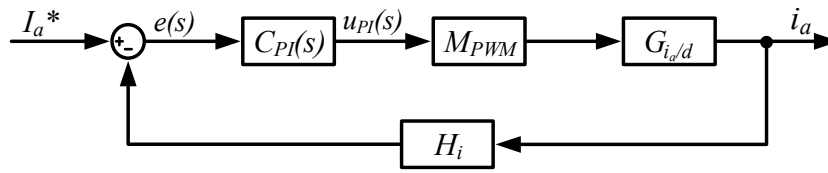


Figura 4.6 – Representação da malha de corrente.

O projeto do controlador de corrente de armadura baseia-se na ideia de que o sistema deve apresentar erro nulo em regime permanente e frequência de cruzamento (f_{cz}) em 200 Hz (definida em duas décadas abaixo da frequência de chaveamento).

Logo, utiliza-se um controlador proporcional-integral cuja característica é garantir erro nulo em regime permanente para referências constantes, ou seja, elevado ganho CC. Sua função de transferência é descrita pela Equação (4.1). Para o projeto do controlador deste motor CC necessita-se uma função de transferência em malha aberta não compensada ($T_{MA,NC}$) da planta de controle dada na Equação (4.2). Ao multiplicar C_{PI} por $T_{MA,NC}$ obtém-se a função transferência em malha aberta compensada ($T_{MA,C}$), identificada pela Equação (4.3).

$$C_{PI}(s) = \frac{u_{PI}(s)}{e(s)} = K_{PI} \frac{s + z_i}{s} \quad (4.1)$$

$$T_{MA,NC}(s) = M_{PWM} G_{ia/d}(s) H_i \quad (4.2)$$

$$T_{MA,C}(s) = C_{PI}(s) M_{PWM} G_{ia/d}(s) H_i \quad (4.3)$$

Na Figura 4.7 (a), a $T_{MA,NC}$ destaca-se por possuir pequenos ganhos em baixas frequências. Assim, a parcela integral do controlador PI favorece o incremento deste ganho em baixa frequência através de um polo na origem. Contudo, a margem de fase (MF) é obtida aplicando-se um ganho, K_{PI} , suficiente para $T_{MA,C}$ ser nula na frequência de cruzamento logo após a alocação de um zero (z_i) em duas décadas abaixo da f_{cz} (200 Hz). Portanto, o controlador $C_{PI}(s)$ é descrito pela Equação (4.4).

$$C_{PI}(s) = 0,1745 \frac{(s + 1257)}{s} \quad (4.4)$$

O comportamento tanto de $T_{MA,NC}$ como de $T_{MA,C}$ são ilustrados pela Figura 4.7 (a) e (b), respectivamente, na qual (b) evidencia a frequência de cruzamento em 200 Hz e o elevado

ganho CC (em frequência zero) do sistema compensado, o que emprega os valores determinados para o projeto final.

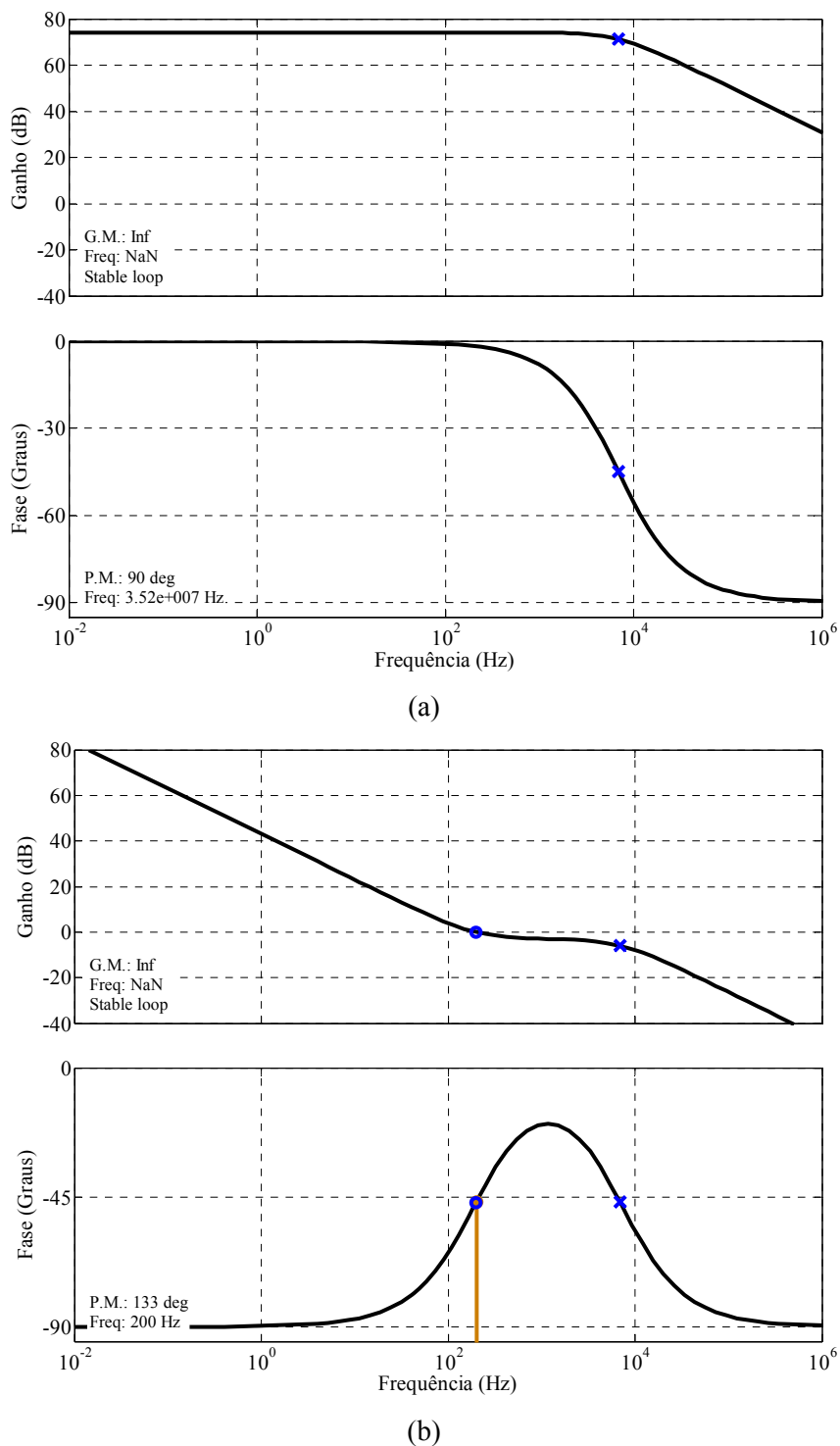


Figura 4.7 – Curvas de saída do controlador da malha de corrente $i_{ia}(t)$. (a) resposta em frequência da função transferência em malha aberta da planta não compensada. (b) resposta em frequência do sistema compensado $T_{MA,C}(s)$.

A fim de verificar o comportamento do controlador no domínio do tempo, foram efetuadas simulações no PSIM® aplicando um degrau de referência na corrente de armadura, detalhada na Figura 4.8. Nela é possível verificar que a corrente de armadura, i_{a_pu} , segue com bastante precisão a sua referência, $i_{a_ref_pu}$.

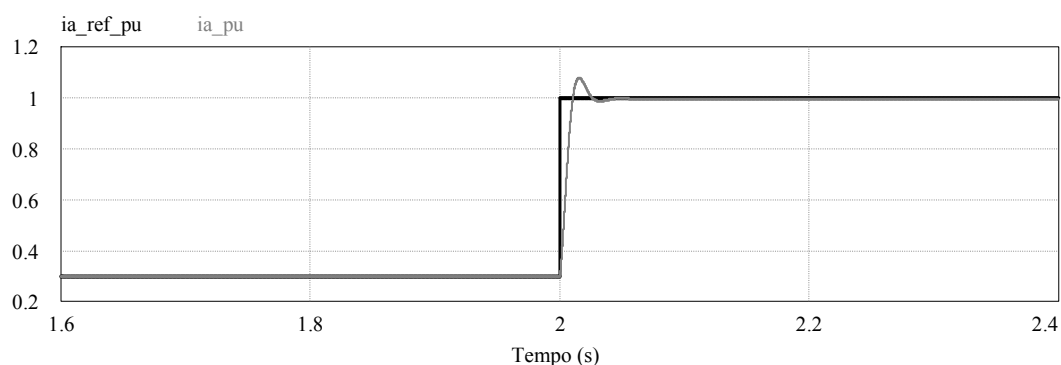


Figura 4.8 – Resposta ao degrau da corrente de armadura.

4.4.1 Discretização do Controlador e Implementação Digital

A implementação digital de controladores pode ser realizada com a discretização de um controlador projetado no domínio contínuo ou através de um projeto já em tempo discreto. Nesta dissertação optou-se por projetar o compensador de corrente no domínio contínuo, como apresentado na Seção 4.4. Logo para sua implementação em um processador digital de sinais é necessário um processo de discretização.

A literatura apresenta diversos métodos de discretização, dentre eles os três principais são: *forward difference* (conhecido também como *forward Euler* ou mesmo discretização de Euler), *backward difference* e *trapezoidal approximation* (conhecido também como aproximação de Tustin's). Cada método apresenta uma relação característica entre o plano s e o plano z . Dentre os métodos de discretização relacionados foi utilizado o método de discretização de Euler por sua simplicidade de implementação e não ter maiores implicações na qualidade dos resultados. Neste método a sua relação entre o domínio s e o domínio z é dado pela Equação (4.5), onde T_a representa o período de amostragem. A Figura 4.9 esboça o mapeamento da região de estabilidade do domínio contínuo (semi-plano esquerdo de 1 em s) em relação ao domínio complexo do plano z (círculo de raio unitário).

$$s \rightarrow \frac{1}{T_a} \frac{z-1}{z} \quad (4.5)$$

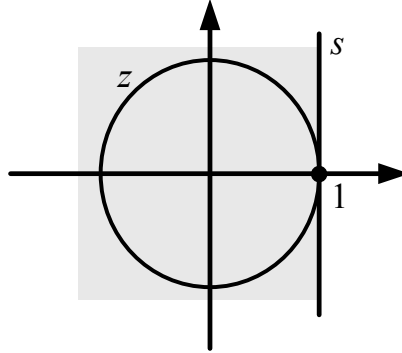


Figura 4.9 – Mapeamento entre o domínio contínuo (s) e domínio complexo (z) através do método *backward difference*.

Assim, o PI descrito na Equação (4.1), pode ser rearranjado algebricamente pela Equação (4.6) e discretizado através da relação dada na Equação (4.5), e demonstrado pela Equação (4.7).

$$C_{PI}(s) = \frac{u_{PI}(s)}{e(s)} = K_{PI} \frac{s+z_i}{s} \rightarrow u_{PI}(s) \cdot s = K_{PI} (s+z_i) e(s) \quad (4.6)$$

$$u_{PI}(z) \cdot \frac{z-1}{T_a} = K_{PI} \left(\frac{z-1}{T_a} + z_i \right) e(z) \quad (4.7)$$

A fim de implementar o compensador em um DSP, a Equação (4.7) deve ser representada por uma equação de diferenças, deduzida pela Equação (4.8). Assim, fazendo o deslocamento no tempo de $n = n+1$, a ação do controlador em função de variáveis de tempo atual seu valor passado ($u_{PI}(n)$), é descrito pela Equação (4.9).

$$u_{PI}(z) \cdot \frac{z-1}{T_a} = K_{PI} \left(\frac{z-1}{T_a} + z_i \right) e(z) \rightarrow$$

$$u_{PI}(z) \cdot \frac{z}{T_a} - u_{PI}(z) \cdot \frac{1}{T_a} = K_{PI} e(z) \frac{z}{T_a} + K_{PI} \left(z_i - \frac{1}{T_a} \right) e(z) \rightarrow \quad (4.8)$$

$$\left(u_{PI}(n+1) - u_{PI}(n) \right) \cdot \frac{1}{T_a} = \frac{K_{PI}}{T_a} e(n+1) + K_{PI} \left(z_i - \frac{1}{T_a} \right) e(n)$$

$$u_{PI}(n) = u_{PI}(n-1) + K_{PI} e(n) + K_{PI} (z_i T_a - 1) e(n-1) \quad (4.9)$$

No processador digital de sinais utilizado a frequência de amostragem é igual à frequência de chaveamento do conversor *chopper* ($T_a = 1/20000\text{s}$). Assim, a função de transferência discreta do controlador substituindo o ganho e o zero da Equação (4.4) na Equação (4.9) é descrito pela Equação (4.10).

$$u_{PI}(n) = u_{PI}(n-1) + 0,1745 \cdot e(n) - 0,76175 \cdot e(n-1) \quad (4.10)$$

4.4.2 Interface do Emulador de Turbinas de Eixo Horizontal no LabVIEW®

A Figura 4.10 apresenta a interface gráfica do programa do emulador desenvolvida no LabVIEW®, a qual permite a entrada dos parâmetros do modelo da turbina, do ângulo de passo das pás e do ângulo do eixo da turbina relativo ao vento. Não obstante, o aplicativo possibilita a visualização a curva C_p versus rotação da turbina indicando o ponto emulado, os dados de rotação do motor CC, rotação da turbina, coeficiente de potência atual e ótimo e os valores das variáveis enviadas para o DSP.

Na Figura 4.11 e na Figura 4.12 é apresentado programa do cálculo do modelo estático da turbina de eixo horizontal. Em Figura 4.12(a) é enviado um sinal em nível alto ao DSP, através da placa de aquisição de dados NI-6009, inicializando a partida suave do motor; na Figura 4.12 (b) é detalhado o envio ao DSP da corrente de referência para o controle da corrente de armadura e a rotação atual da turbina para representar o efeito cortante do vento e a compensação da inércia; Figura 4.12 (c) mostra a leitura dos pulsos do encoder e calcula a rotação do motor, que através da relação da caixa de engrenagens é obtida a rotação da turbina; Figura 4.12 (d) identifica a decomposição da potência caso seja modificado o ângulo de *yaw* e Figura 4.12 (e) possibilita a aplicação de um perfil periódico de vento.

O cálculo da potência e do torque da turbina, bem como o coeficiente de potência do modelo estático propriamente dito usa as Equações (3.9) e (3.10) e está indicado pela Figura 4.11.

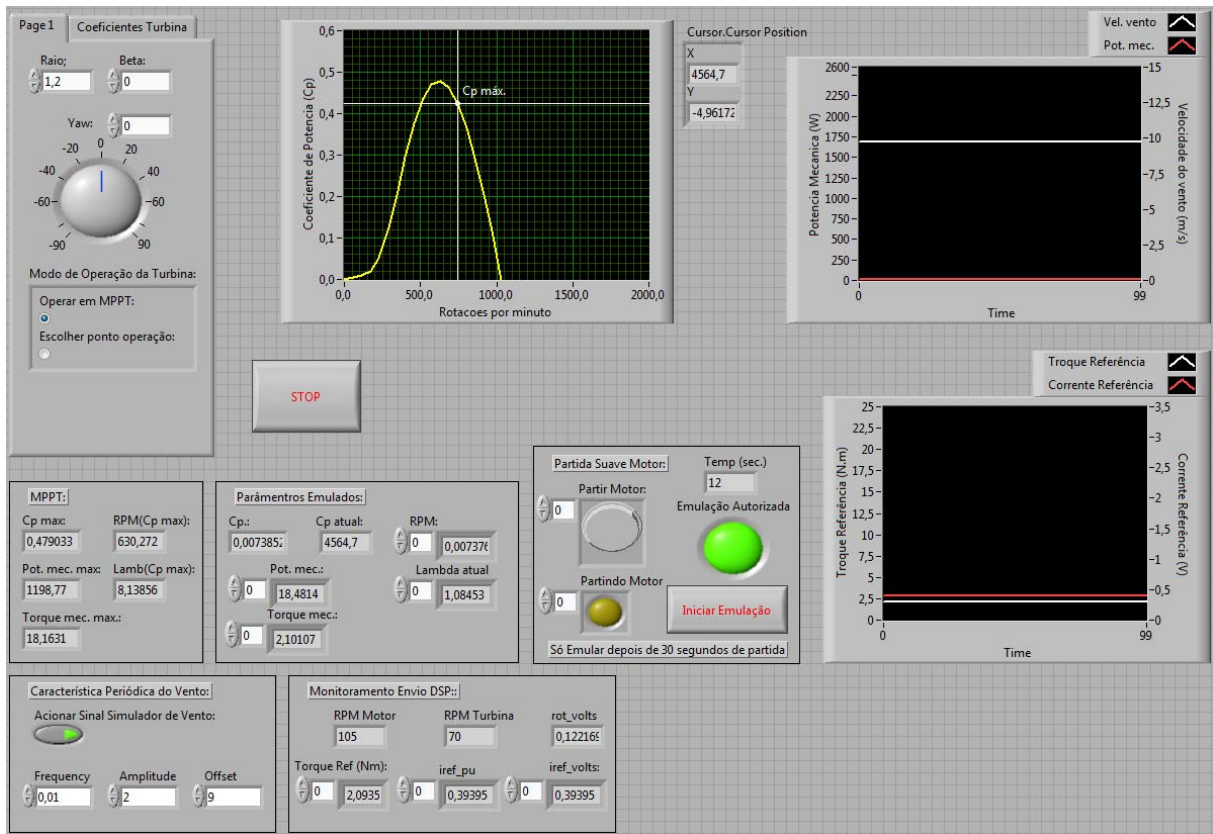


Figura 4.10 – Interface gráfica no LabVIEW® do emulador para turbinas de eixo vertical.

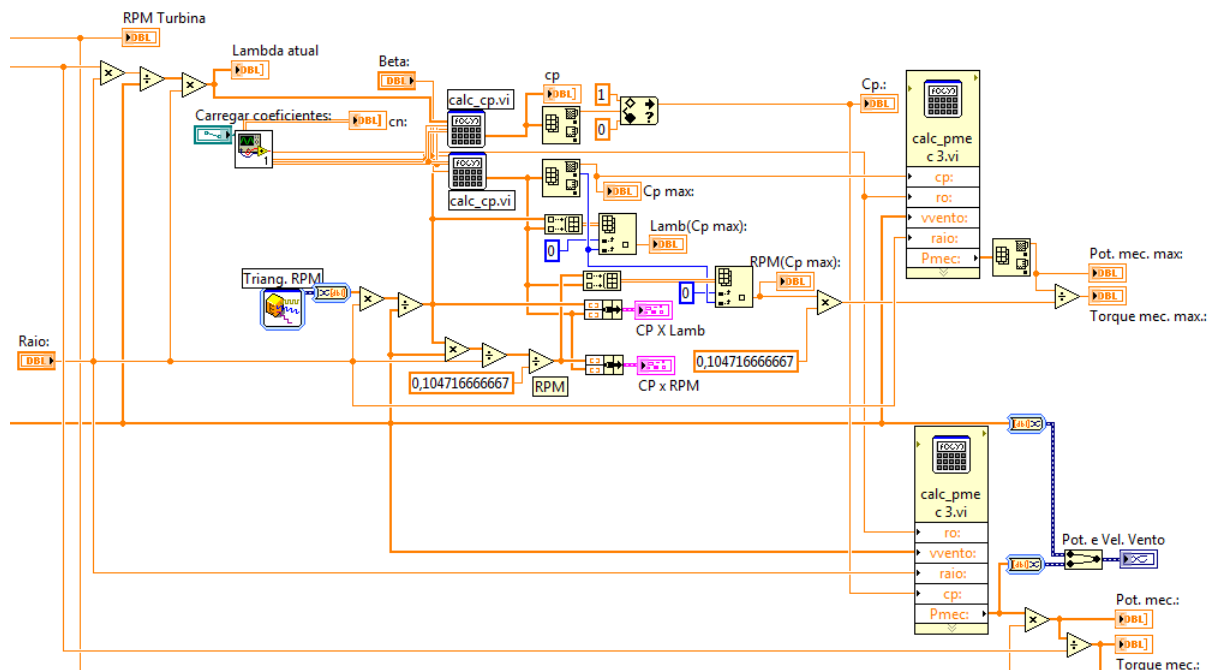


Figura 4.11 – Ambiente virtual de instrumentação, aplicativo desenvolvido.

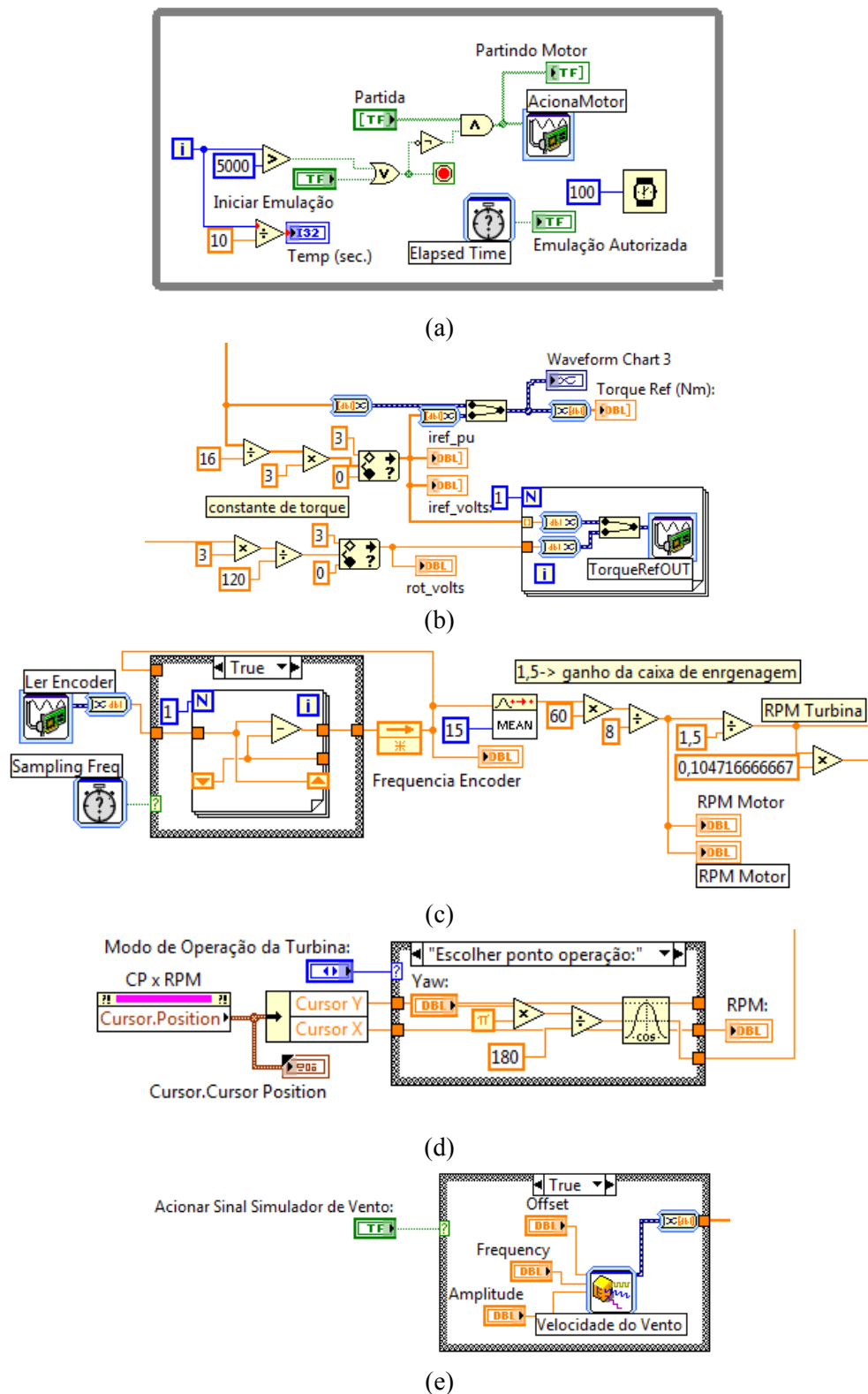


Figura 4.12 – Ambiente virtual de instrumentação, aplicativo desenvolvido. (a) tempo de aguardo e sinal de referência ao DSP para partida suave do motor; (b) envio ao DSP da corrente de armadura de referência através da NI-6009; (c) leitura da rotação do moto e conversão da caixa de engrenagens; (d) decomposição da potência devido ao direcionamento da nacela; (e) configuração de um perfil periódico de vento e (f).

4.4.3 Interface no LabVIEW® do Emulador para Turbina Magnus

A Figura 4.13 apresenta a interface gráfica do programa do emulador desenvolvida no LabVIEW®, que permite a visualização da curva de superfície $C_p(\omega_b, \omega_c)$ e a curva C_p versus rotação do cilindro; a segunda curva ainda indica os valores ótimos de ω_c e C_p . Não obstante, também são informados os dados de rotação do motor CC, rotação da turbina, coeficiente de potência atual e os valores das variáveis enviadas para o DSP.

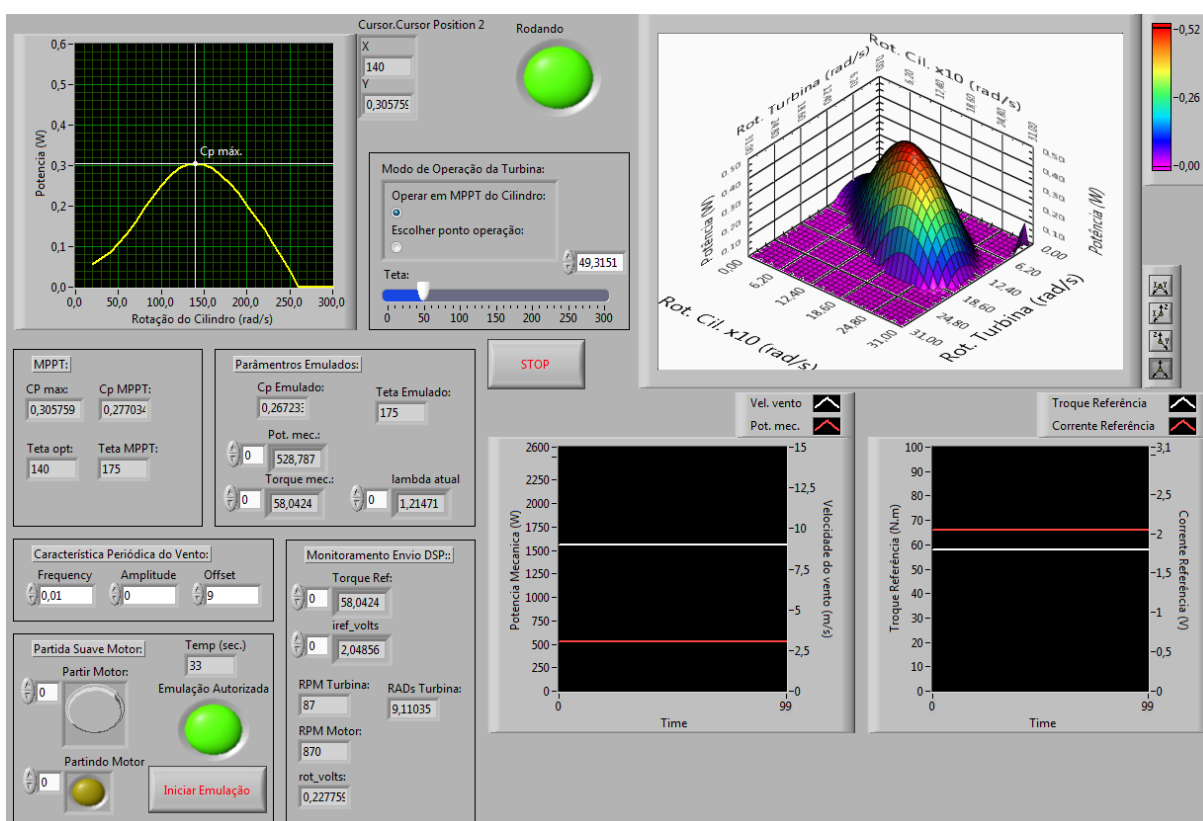


Figura 4.13 – Interface gráfica no LabVIEW® do emulador para turbina Magnus.

Na Figura 4.14 apresenta-se o programa de cálculo do modelo estático da turbina, o qual executa uma rotina do MATLAB® contendo as características dos torques de empuxo e de arrasto da turbina Magnus. O modelo é executado três vezes: para o cálculo dos valores ótimos de C_p e ω_c ; para o rastreamento da máxima potência pelo controle da rotação dos cilindros e para o cálculo do coeficiente de potência utilizado na emulação. O programa, analogamente ao emulador de HAWT, ainda envia um sinal em nível alto ao DSP através da placa de aquisição de dados NI-6009, inicializando a partida suave do motor e a corrente de referência para o controle da corrente de armadura.

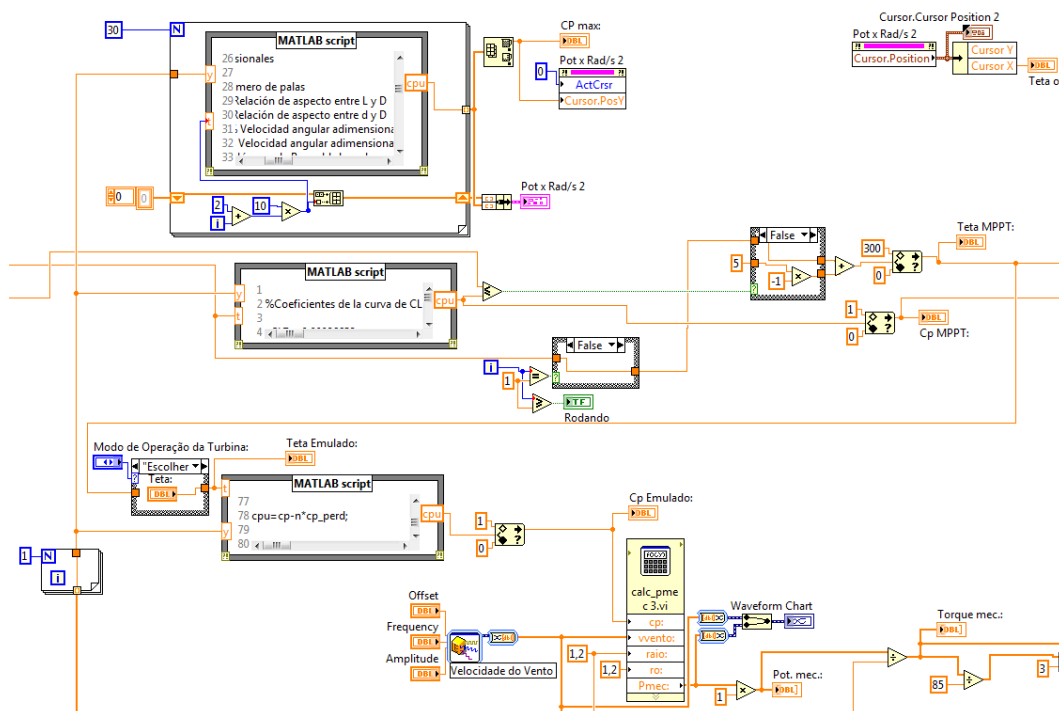


Figura 4.14 – Ambiente virtual de instrumentação, aplicativo desenvolvido

4.5 Resumo do capítulo

Este capítulo discutiu a plataforma de emulação proposta, dividindo-a em duas seções: WTE para turbinas de eixo horizontal e a topologia utilizada para a representação da turbina Magnus. A estrutura implementada utilizou o LabVIEW[®] para o cálculo do modelo estático, para aquisição dos dados da velocidade do motor e envio do torque de referência e a velocidade da turbina para DSP, além de disponibilizar uma interface gráfica do processo.

O modelo dinâmico, composto pela compensação da inércia e sombreamento da torre foi executado pelo DSP, o qual recebe o torque de referência e a velocidade da turbina em seu ADC. Com estes dados, o processador digital de sinais calcula o torque compensado e faz o controle da corrente de armadura.

Foi apresentado o circuito *chopper* utilizado no acionamento do motor CC, o projeto do controlador da malha de corrente e sua discretização para implementação no DSP *Texas Instruments TMS320F28335*.

Foi explicado o modelo do sistema de geração utilizado, composto por um PMSG acoplado a um retificador trifásico não controlado alimentando um conversor *buck*., responsável por realizar o MPPT da corrente.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados das simulações aqui apresentados foram obtidos através do software PSim[®], para os quais aplicou-se um perfil de vento variável para verificar o comportamento dos modelos estático e dinâmico da turbina. Com a análise destes resultados é possível visualizar a importância da compensação da inércia, através de seu modelo dinâmico.

Este capítulo, para fins de melhor interpretação dos resultados, é dividido em duas partes: resultados do emulador para HAWT e resultados do emulador para a turbina Magnus. Não obstante, cada seção compara os resultados simulados com os resultados experimentais.

5.1 Resultados do emulador para Turbina de Eixo Horizontal

Inicialmente é simulado o modelo estático da turbina de eixo horizontal, no qual é aplicado um perfil com velocidades aleatórias de vento. Após, são mostrados os resultados do modelo dinâmico da HAWT submetido a variações em degrau de vento, assim verificando a compensação da inércia. Todos os parâmetros utilizados na simulação e implementação do protótipo são apresentados na Tabela 5.1, a curva característica da turbina utilizada é detalhada pela Figura A.7 no ANEXO C.

Neste estudo, os transitórios iniciais foram desprezados e assim a emulação da turbina tem início a partir do momento que o rotor da turbina já está estabilizado, girando a uma determinada velocidade inicial.

Para fins de análise dos modelos da turbina são apresentados resultados de simulações utilizando o gerador síncrono a ímãs permanentes. Estes resultados avaliam o comportamento da turbina quando o algoritmo de MPPT está em operação e quando há uma carga fixa puramente resistiva, nos terminais do gerador.

Tabela 5.1. Parâmetros da turbina de eixo horizontal utilizada.

Identificação	Valor
Potência nominal da turbina	500 W
Velocidade nominal do vento	8,10 m/s
Rotação nominal da turbina	530 rpm
Raio da turbina	1,00 m
Densidade do ar	1,22 kg/m ³
Momento de inércia	1,47 kg·m ²
Amortecimento do eixo da turbina	0,025 N·m·s
Relação da caixa de engrenagens	2

5.1.1 Resultados de Simulação

Os resultados mostrados na Figura 5.1 detalham a simulação do modelo estático da HAWT como definido na seção 2.3, sem a compensação da inércia. Um perfil de vento é aplicado ao modelo da turbina e seu comportamento analisado quando acoplada ao PMSG. Note-se que as variáveis de potência mecânica (apresentada na figura por $P_{turb_semJcomp}$), potência da carga (apresentada na figura por $P_{carga_semJcomp}$) e rotação da turbina (apresentada na figura por $rpm_turb_semJcomp$) apresentam um mesmo comportamento das variações do vento. Na Figura 5.1(c) a potência gerada não se sobrepõe com grande exatidão à curva da potência disponível da turbina devido à inércia do gerador e motor CC.

A Figura 5.1 ainda ilustra a resposta da turbina perante um perfil aleatório de vento, na qual a rotação da turbina acompanha esta variação do vento. Assim observando que a potência mecânica da turbina e a potência gerada dependem da rotação da turbina (visto que a rotação determina o ponto de operação da turbina na curva C_p versus TSR) e, por consequência, também acompanhando a variação do vento.

O gerador acoplado à turbina tem sua corrente de carga regulada, operando em seu MPP, logo disponibilizando para a carga a máxima potência disponível para qualquer velocidade de vento. Isto é destacado pela característica da potência na carga ser praticamente a mesma potência mecânica e o C_p apresentar poucas variações, assumindo valores entre 0,46 e 0,48 na maior parte do tempo. Nas simulações são desprezadas as perdas no motor CC e seu acionamento, no acoplamento mecânico, no gerador e nos circuitos de MPPT.

O torque (apresentado na figura por $T_{ref_semJcomp}$) é uma variável que depende diretamente da potência disponível e da rotação da turbina. Os valores de torque detalhados na Figura 5.1 foram obtidos com o modelo estático da turbina. Após um escalonamento matemático este torque é equivalente a uma corrente em p.u. (por unidade), que é apresentada na figura por $i_{aref_pu_semJcomp}$.

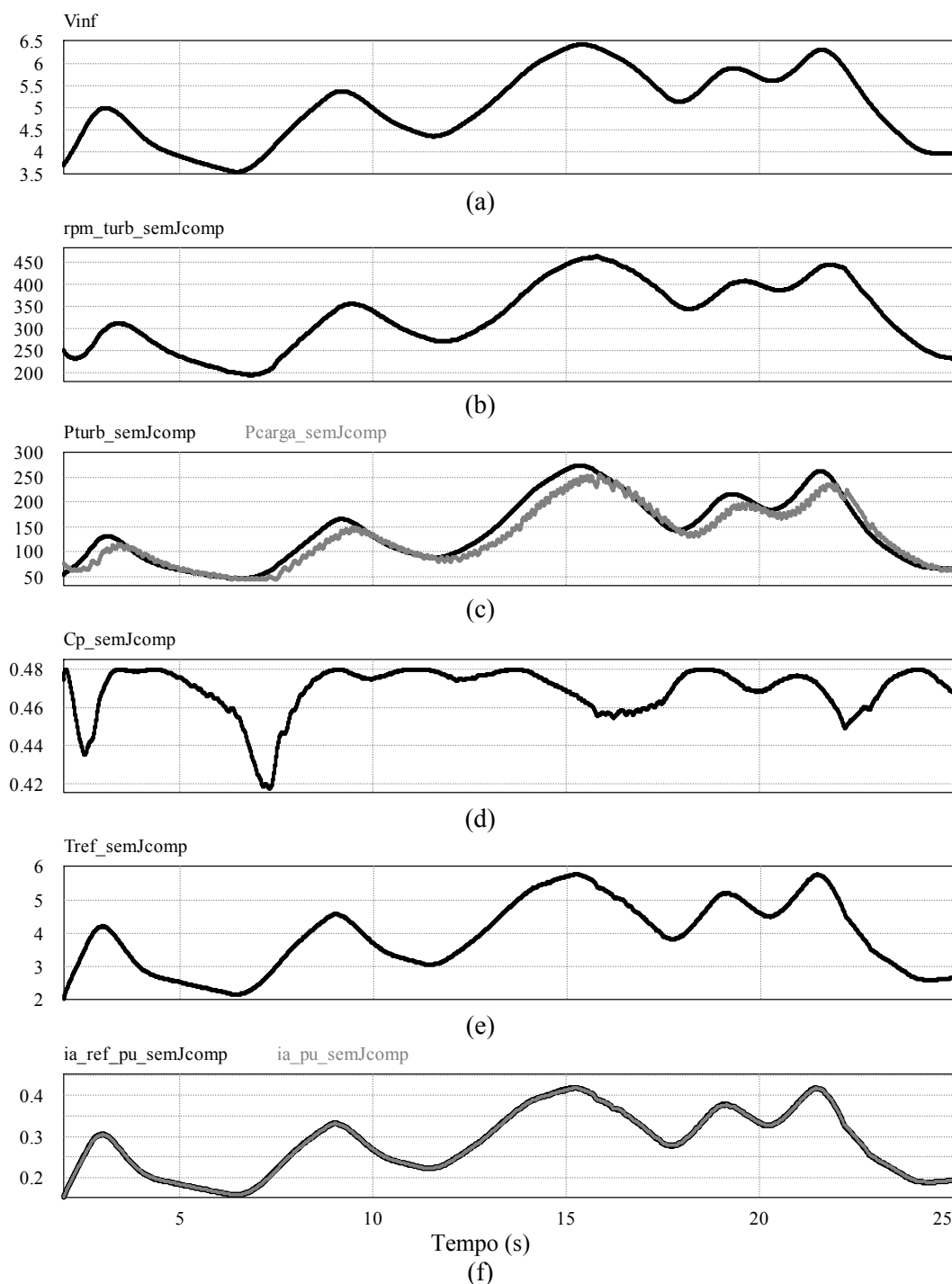
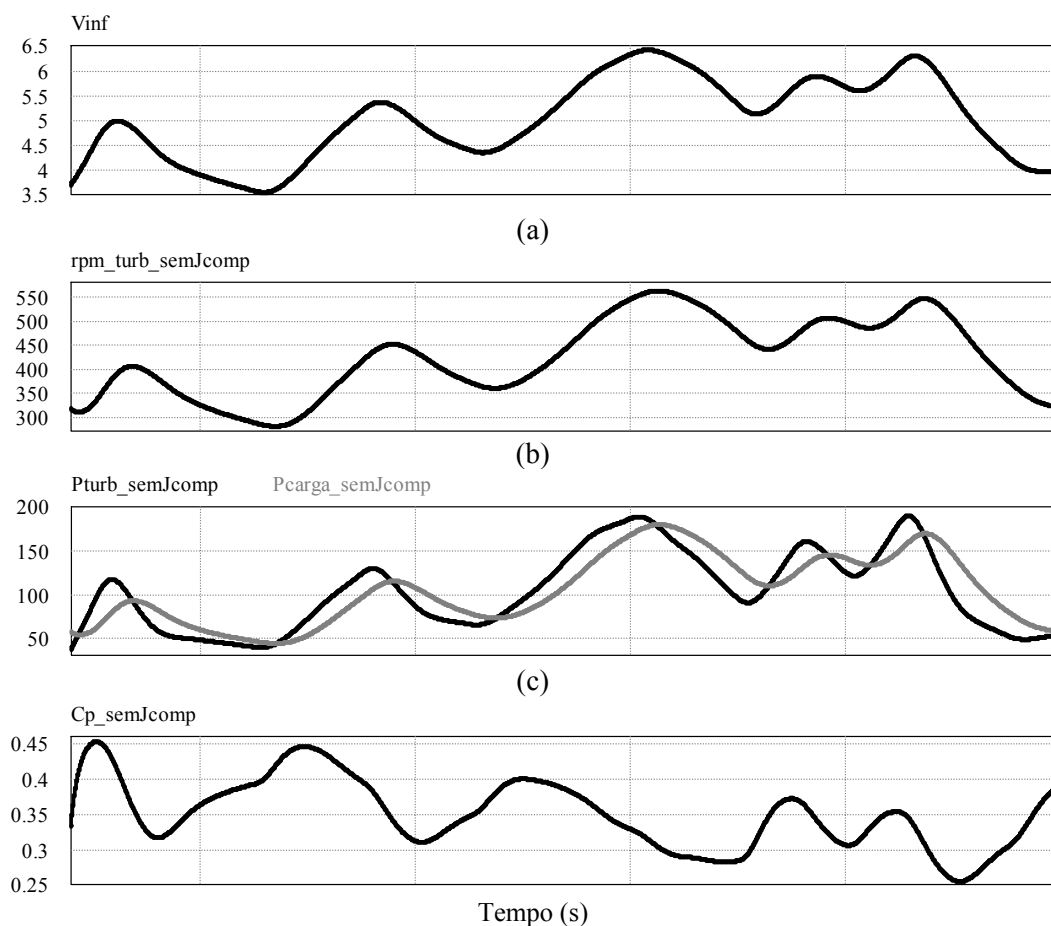


Figura 5.1 – Resultados de simulação para o modelo estático de uma HAWT com perfil suave de vento e PMSG operando em MPPT; (a) perfil de vento; (b) rotação da turbina; (c) potência mecânica e potência gerada; (d) coeficiente de potência; (e) torque de referência e (f) corrente de armadura de referência e medida.

A variável `iapu_semJcomp` indica a grandeza da corrente de armadura medida, utilizada como variável de entrada para que controlador PI forneça a ação de controle, a qual visa erro nulo em regime permanente. Isto pode ser constatado por `iaref_pu_semJcomp` e `iapu_semJcomp` se apresentarem sobrepostos na Figura 5.1 (f).

Na Figura 5.2 pode ser identificado o comportamento de uma HAWT acoplada a um PMSG com carga fixa de 2Ω , logo como a corrente do gerador não é regulada, não é rastreado o ponto de máxima potência; neste caso optou-se por não usar desta sistemática pois o objetivo não é o controle da turbina, e sim analisar o comportamento e operação geral desta. Nesta Figura 5.2 é possível verificar que a turbina opera em baixo rendimento, apresentando coeficiente de potência inferior a 0,40 na maior parte do tempo, não obstante a turbina opera em velocidade mais elevada, devido a potência demanda pela carga ser menor que a potência mecânica disponível.



(d)

Figura 5.2 – Resultados de simulação para o modelo estático de uma HAWT perante um perfil suave de vento com PMSG operando fora de MPPT; (a) perfil de vento; (b) rotação da turbina; (c) potência mecânica e potência gerada e (d) coeficiente de potência.

Na Figura 5.2 fica evidente a importância dos estudos de algoritmos de MPPT e sua aplicação, já que a potência extraída depende da operação da turbina em sua velocidade ótima, a qual varia em relação ao vento. Não obstante, comparando a potência gerada para uma carga fixa, Figura 5.2 (c), em relação a uma em MPP, Figura 5.1 (c), pode-se concluir que a segunda opera em torno de 50% mais potência da que opera fora do ponto de MPP, fundamentando a relevância dos algoritmos de rastreamento de máxima potência.

A Figura 5.3 detalha os resultados obtidos com a aplicação de um perfil de vento com variação em degraus. Através desta é possível visualizar o comportamento da rotação da turbina, da potência gerada e o coeficiente de potência para o modelo estático de uma HAWT. Esta figura evidencia a variação da velocidade do vento refletindo no aumento ou decréscimo quase instantâneo (limitado pela inércia do motor CC e gerador) na velocidade da turbina e na potência gerada. Isto não ocorre em turbinas de médio à grande porte, devido sua elevada inércia, logo não retratando o comportamento transitório real de uma turbina, que só pode ser feito pelo modelo dinâmico. O coeficiente de potência apresenta-se praticamente constante, característica, esta, de operação no ponto de máxima potência. As oscilações apresentadas no C_p são devidas as variações abruptas na velocidade do vento, fazendo que por frações de segundo seu TSR assumam valores elevados, em consequência da turbina estar girando em elevada rotação e logo o vento sofrer uma acentuada queda, como previsto pela Equação (3.8).

Analisando a Figura 5.4, se visualiza os resultados da emulação de uma turbina de eixo horizontal incluindo seu modelo dinâmico, que emprega a compensação da inércia. Para isso aplicou-se uma variação de vento em degraus com a finalidade de se obter uma variação abrupta, e assim avaliar a influência da inércia da turbina na sua rotação e na potência da carga. Com a análise desta figura, nota-se que a rotação e a potência não variam instantaneamente com o vento como previamente detalhado na Figura 5.3. Isso dá-se devido ao fato da elevada à inércia da turbina conforme discutido na seção 3.6. As variáveis de velocidade da turbina e potência gerada acompanham a mudança do vento, porém, agora com certo amortecimento na resposta, comparada à do modelo estático da turbina.

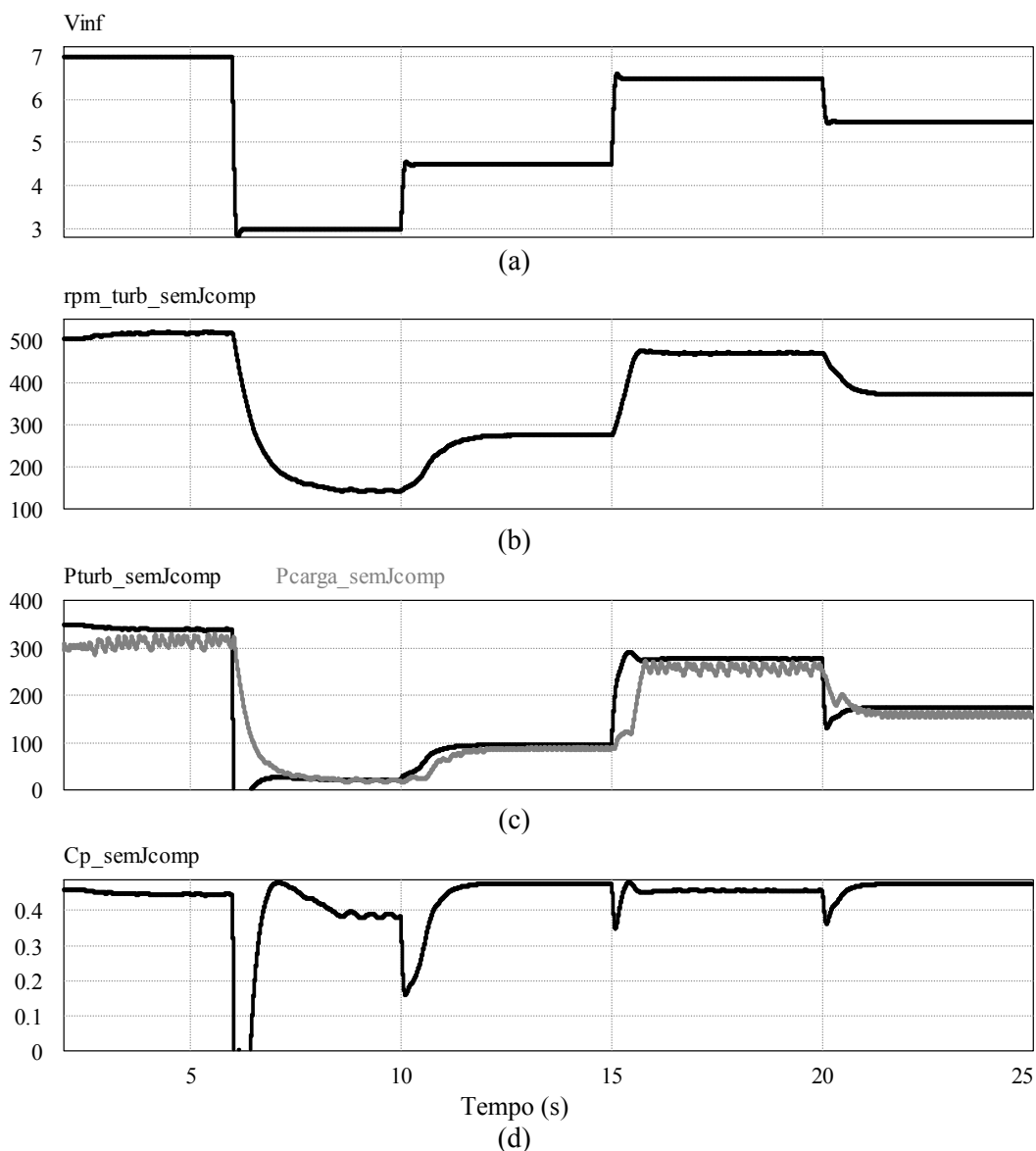


Figura 5.3 – Resultados de simulação para o modelo estático de uma HAWT perante degraus de vento com PMSG operando em MPPT; (a) perfil de vento; (b) rotação da turbina; (c) potência gerada e (d) coeficiente de potência.

A Figura 5.5 mostra com clareza a diferença entre a emulação da turbina utilizando apenas seu modelo estático e a inclusão do modelo dinâmico. Os resultados de rotação da turbina e potência na carga do modelo estático (apresentados nesta figura por $rpm_turb_semJcomp$ e $Pcarga_semJcomp$ respectivamente) são indicados pelas curvas em preto; já os resultados de rotação da turbina e potência na carga do modelo dinâmico (apresentados na figura por rpm_turb_Jcomp e $Pcarga_Jcomp$ respectivamente) são descritos pelas curvas em cinza.

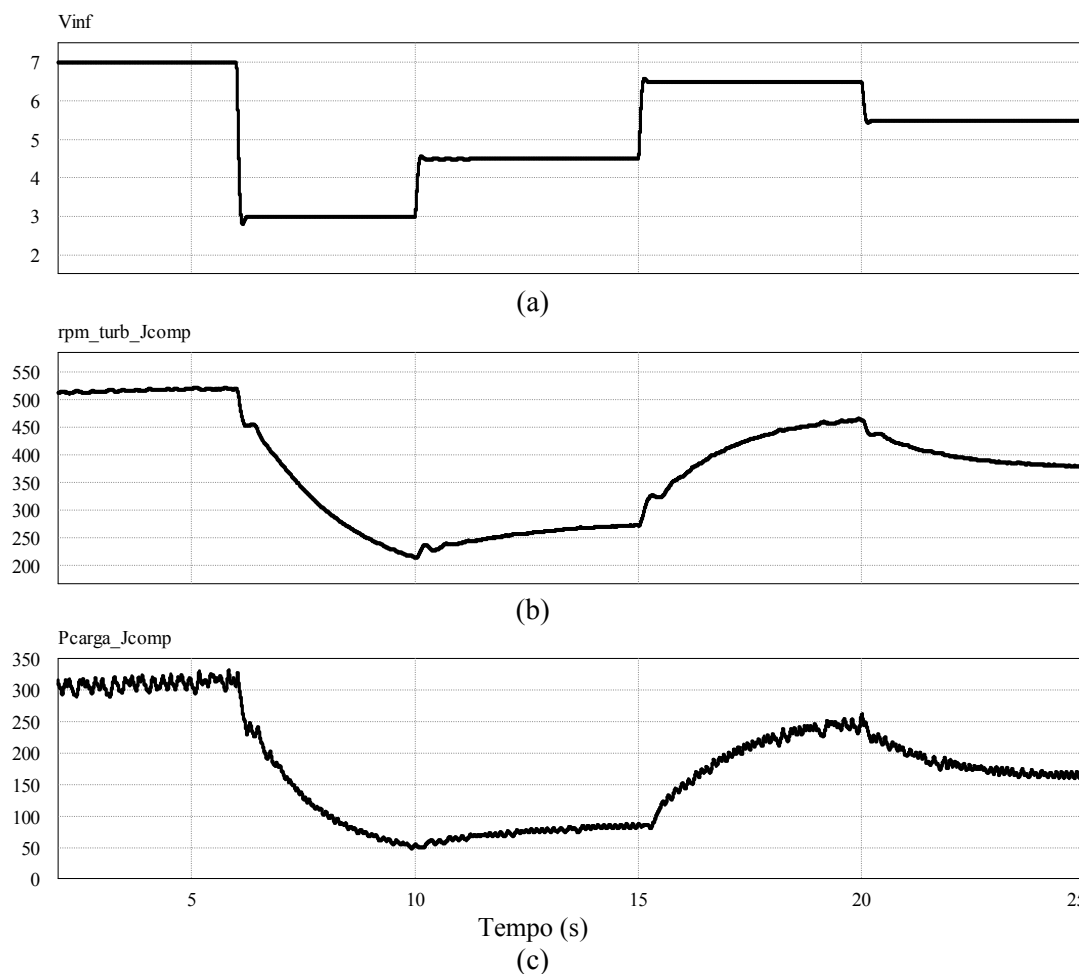


Figura 5.4 – Resultados de simulação para o modelo dinâmico de uma HAWT perante um perfil de vento com a compensação da inércia e com PMSG operando em MPPT; (a) perfil de vento; (b) rotação da turbina e (c) potência gerada.

Com a análise desta figura salienta-se o amortecimento da rotação da turbina operando em seu modelo dinâmico em comparação com a rápida variação do modelo estático, logo representando o comportamento mais similar possível ao de uma turbina real.

A Figura 5.6 interpreta o comportamento de uma turbina de eixo horizontal com a adição do efeito cortante do vento e sombreamento da torre, conceituado pela Equação (3.19). Em (c) é apresentado o torque de referência (apresentado na figura por $T_{ref_semJcomp}$) para o cálculo do sombreamento e o torque sombreado (apresentado na figura por T_{shear}), no qual é caracterizado pela inserção de harmônicos de primeira e terceira ordem da velocidade, refletindo em uma referência de corrente com caráter ondulatório, verificado em (d).

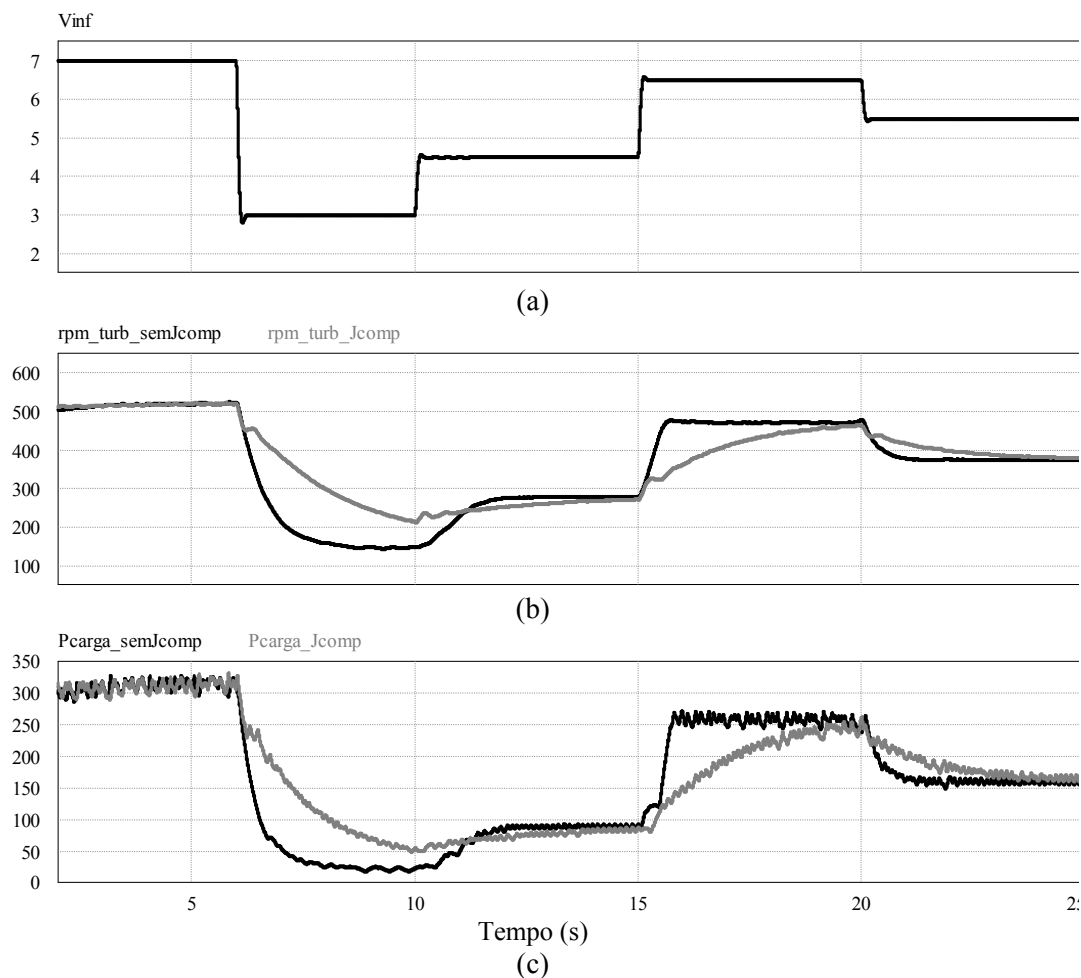


Figura 5.5 – Resultados de simulação para o modelo estático e dinâmico de uma HAWT perante um perfil de vento com PMSG operando em MPPT; (a) perfil de vento; (b) rotação da turbina e (c) potência gerada.

Para melhor visualização da atuação do controle na Figura 5.6 (d) é apresentado uma ampliação no eixo do tempo, identificando a corrente de armadura que responde com o mesmo comportamento de sua referência, através do controlador PI.

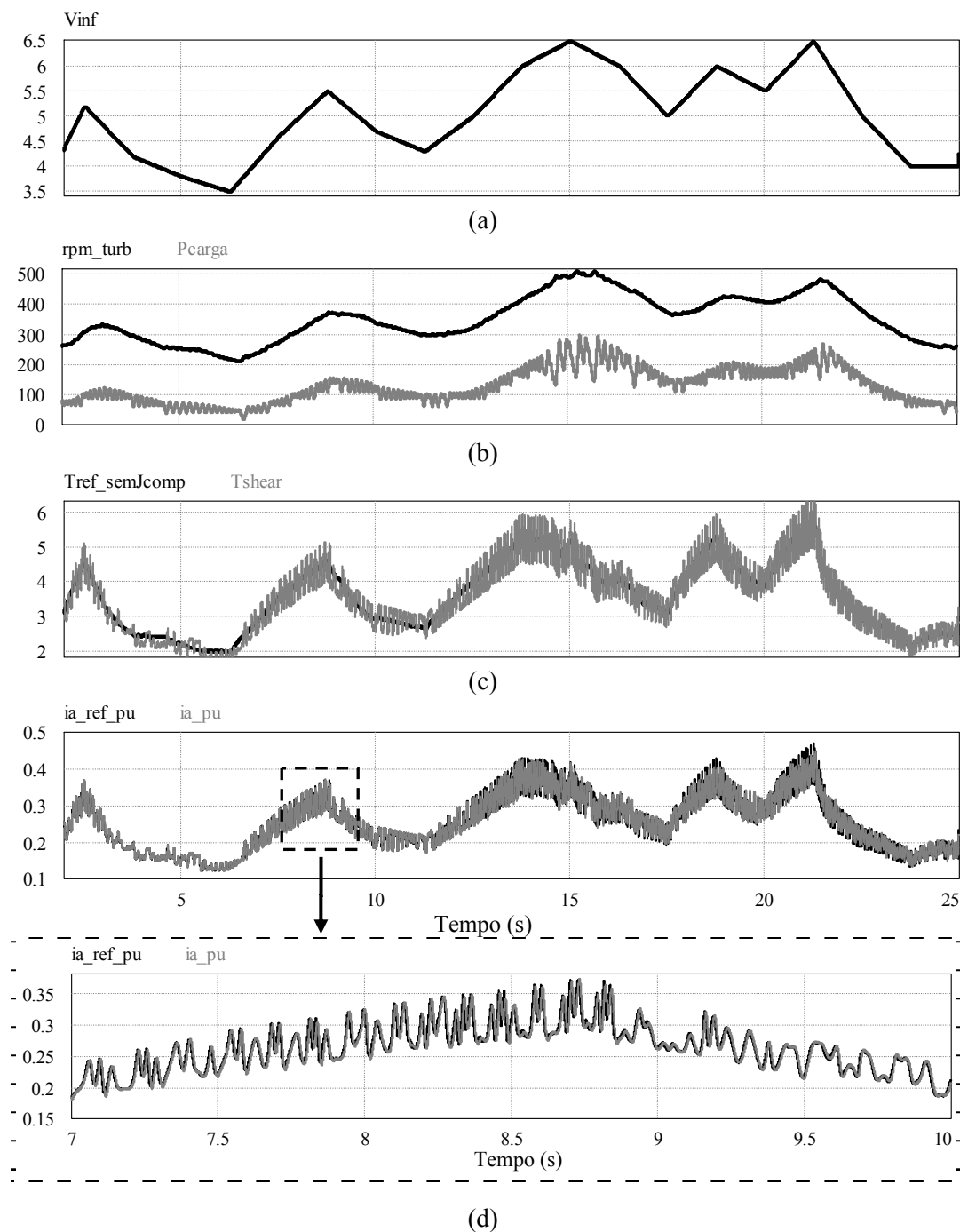


Figura 5.6 – Resultados de simulação para o modelo estático com efeito cortante do vento e sombreamento da torre de uma HAWT perante um perfil de vento com PMSG operando em MPPT; (a) perfil de vento; (b) rotação da turbina e potência gerada, (c) torque modelo estático e torque sombreado e (d) corrente de armadura de referência e medida.

5.1.2 Resultados Experimentais

Os resultados experimentais a seguir são apresentados junto com a respectiva situação obtida através de simulação no software PSim[®]. O motor CC do WTE foi acoplado a um PMSG conectado a um retificador trifásico alimentando um conversor *buck* com carga resistiva de $1,15 \Omega$ que executa o MPPT. Os dados de placa do gerador são apresentados na Tabela A.2 no ANEXO B. As figuras apresentando os resultados experimentais foram obtidas através de um osciloscópio Tektronix[®] TDS2014 e destacam no *CHI* a tensão entregue à carga, no *CH3* a corrente na carga e no *CH4* o comportamento da corrente de armadura do motor CC.

As Figura 5.7, Figura 5.8, Figura 5.9, Figura 5.10, Figura 5.11, Figura 5.12 e Figura 5.13 apresentam os resultados experimentais (a) e simulados (b) para a emulação de uma turbina de eixo horizontal com os dados apresentados na Tabela 5.1 para velocidades de vento de 4,0 m/s, 4,6 m/s, 5,0 m/s, 5,5 m/s, 6,0 m/s, 6,5 m/s e 7,0 m/s.

A Figura 5.7 apresenta os resultados da tensão, corrente na carga e corrente de armadura para $V_{\infty} = 4,0 \text{ m/s}$. A velocidade de operação da turbina resulta em 275 rpm.

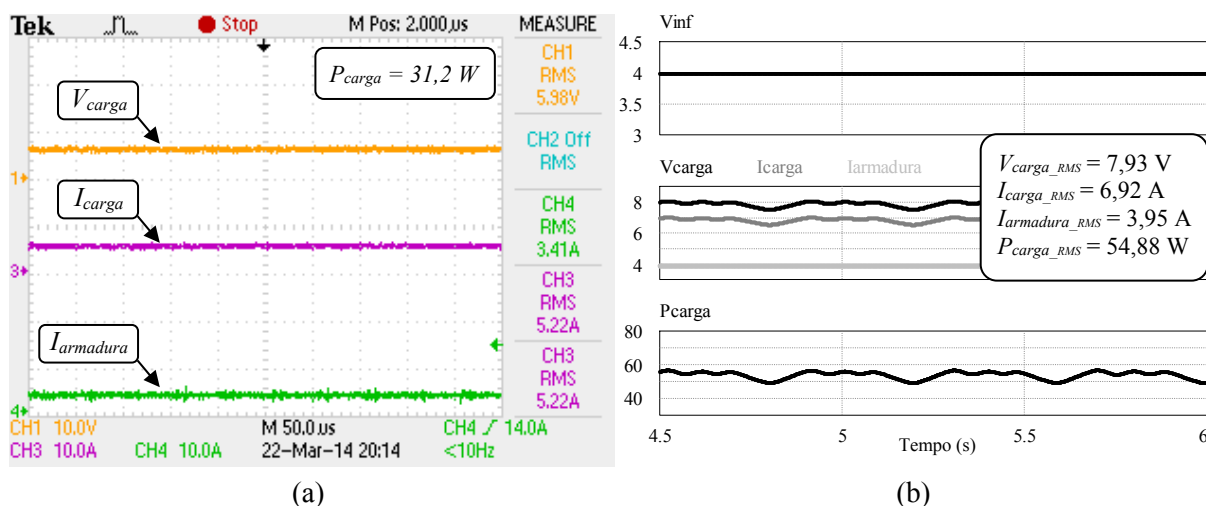


Figura 5.7 – Resultados da emulação de uma HAWT para $V_{\infty} = 4,0 \text{ m/s}$, resultando na operação em 275 rpm da turbina. (a) Dados experimentais (b) Simulação.

A Figura 5.8 apresenta os resultados da tensão, corrente na carga e corrente de armadura para $V_{\infty} = 4,6 \text{ m/s}$. A velocidade de operação da turbina resulta em 335 rpm.

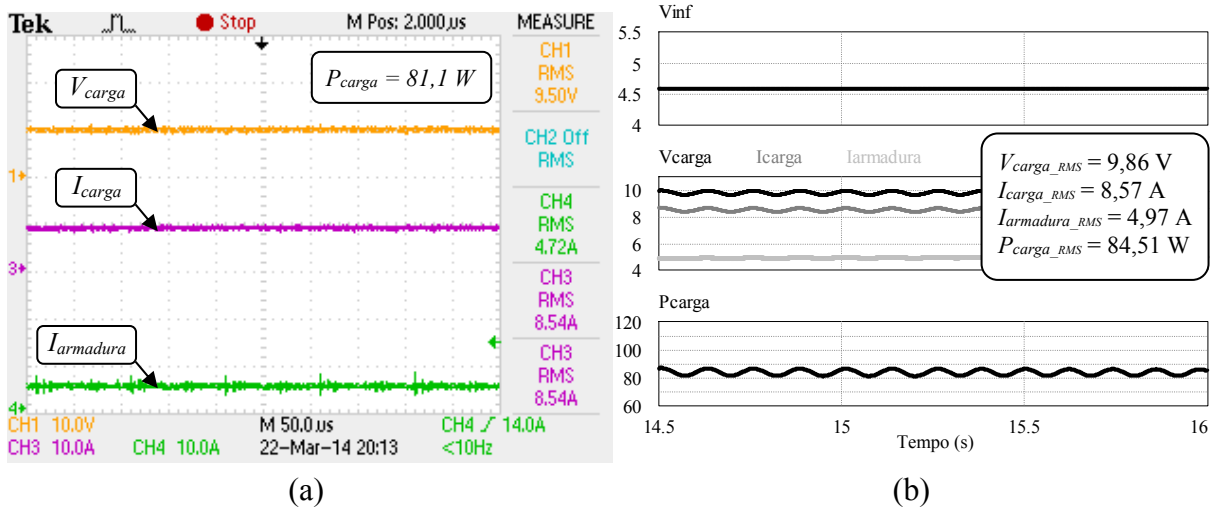


Figura 5.8 – Resultados da emulação de uma HAWT para $V_{\infty} = 4,6 m/s$, resultando na operação em 335 rpm da turbina. (a) Dados experimentais e (b) Simulação.

A Figura 5.9 apresenta os resultados da tensão, corrente na carga e corrente de armadura para $V_{\infty} = 5,0 m/s$. A velocidade de operação da turbina resulta em 372 rpm.

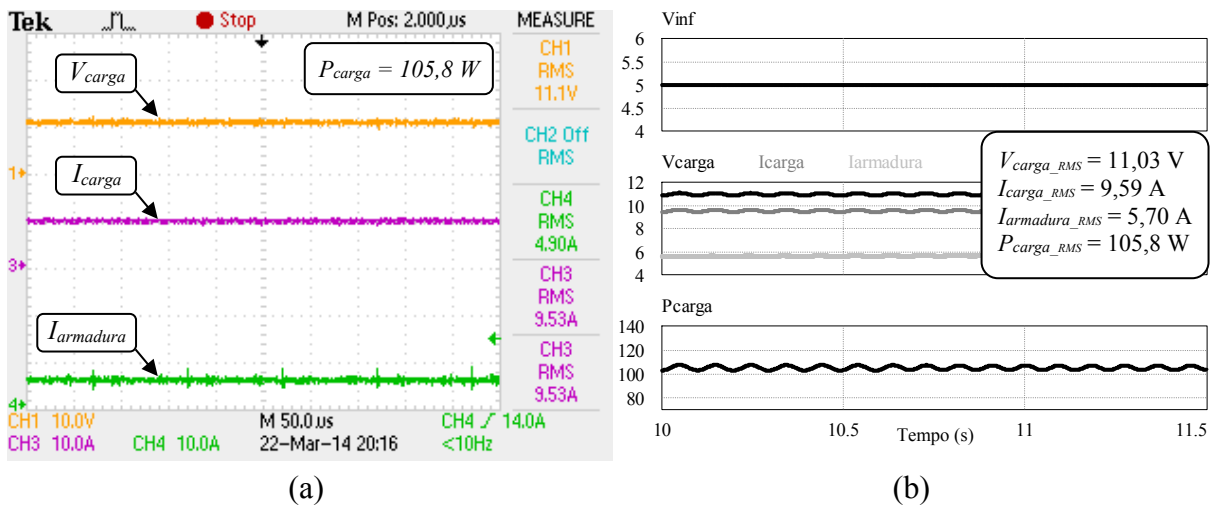


Figura 5.9 – Resultados da emulação de uma HAWT para $V_{\infty} = 5,0 m/s$, resultando na operação em 372 rpm da turbina. (a) Dados experimentais e (b) Simulação.

A Figura 5.10 apresenta os resultados da tensão, corrente na carga e corrente de armadura para $V_{\infty} = 5,5 m/s$. A velocidade de operação da turbina resulta em 413 rpm.

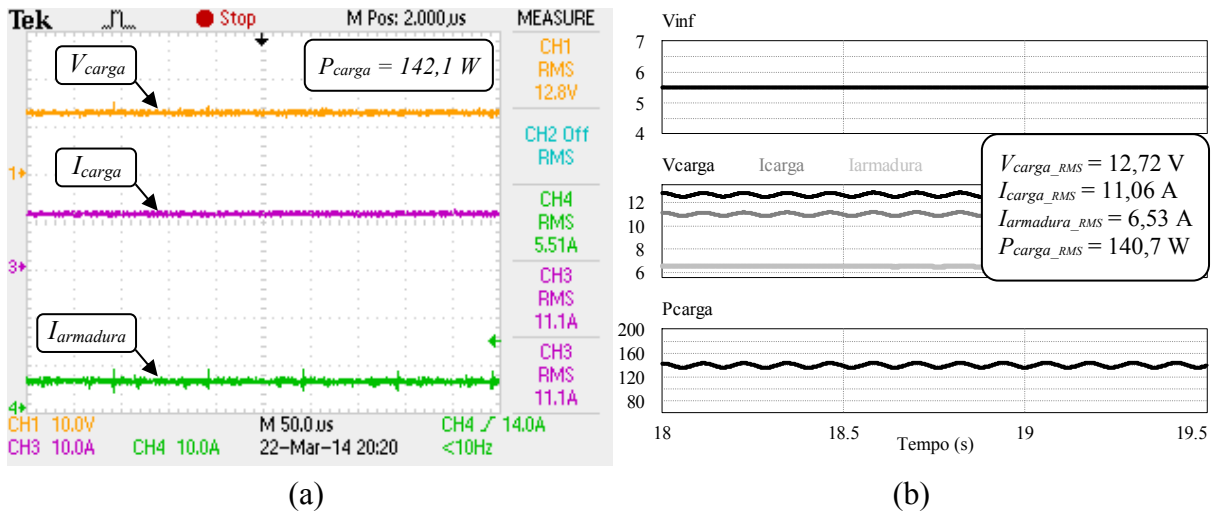


Figura 5.10 – Resultados da emulação de uma HAWT para $V_{\infty} = 5,5 m/s$, resultando na operação em 413 rpm da turbina. (a) Dados experimentais e (b) Simulação.

A Figura 5.11 apresenta os resultados da tensão, corrente na carga e corrente de armadura para $V_{\infty} = 6,0 m/s$. A velocidade de operação da turbina resulta em 456 rpm.

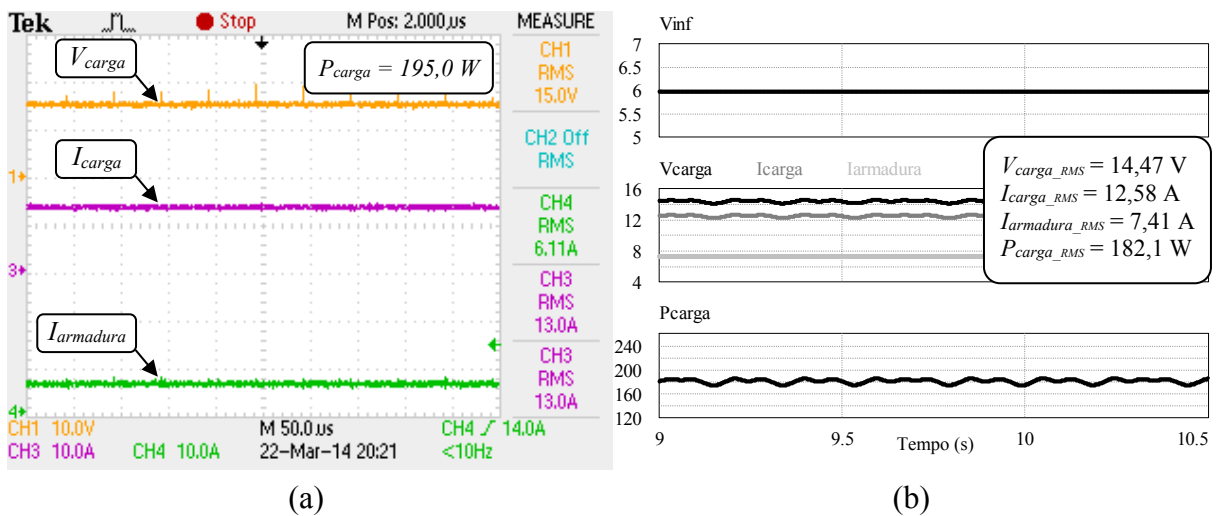


Figura 5.11 – Resultados da emulação de uma HAWT para $V_{\infty} = 6,0 m/s$, resultando na operação em 456 rpm da turbina. (a) Dados experimentais e (b) Simulação.

A Figura 5.12 apresenta os resultados da tensão, corrente na carga e corrente de armadura para $V_{\infty} = 6,5 m/s$. A velocidade de operação da turbina resulta em 496 rpm.

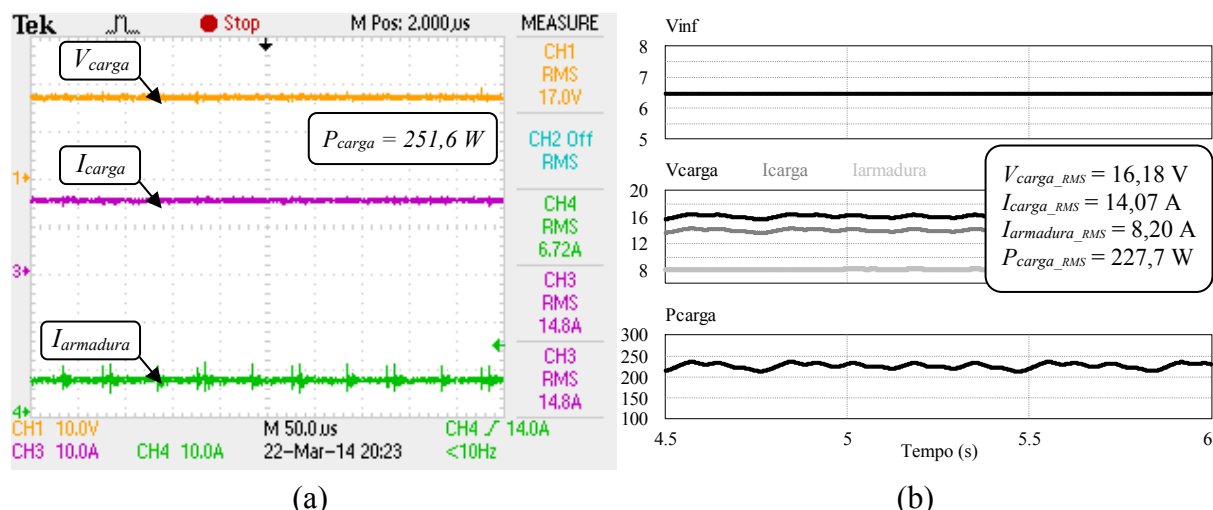


Figura 5.12 – Resultados da emulação de uma HAWT para $V_{\infty} = 6,5 \text{ m/s}$, resultando na operação em 496 rpm da turbina. (a) Dados experimentais e (b) Simulação.

A Figura 5.13 apresenta os resultados da tensão, corrente na carga e corrente de armadura para $V_{\infty} = 7,0 \text{ m/s}$. A velocidade de operação da turbina resulta em 534,5 rpm.

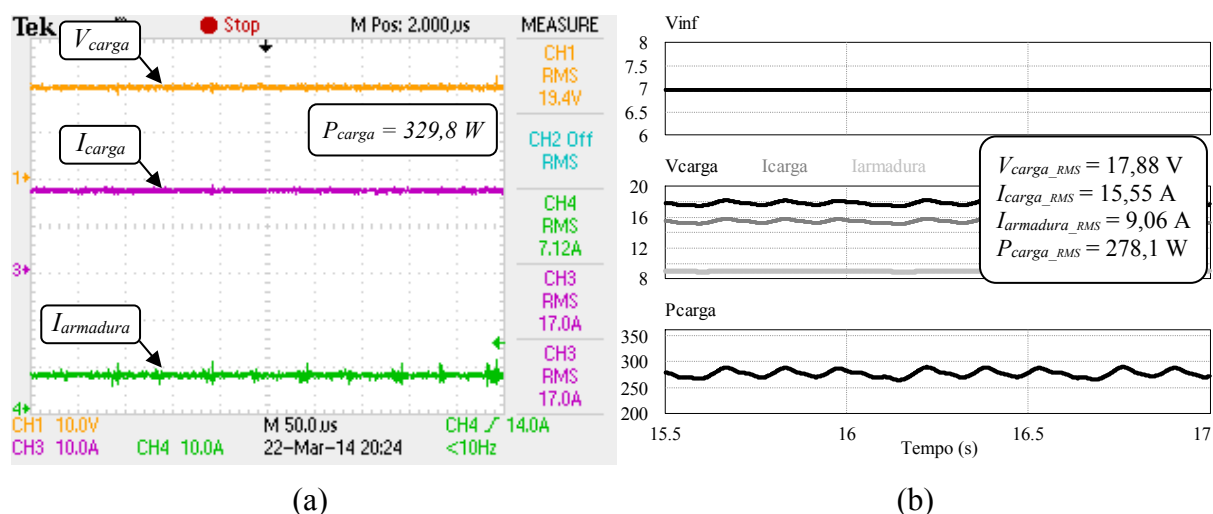


Figura 5.13 – Resultados da emulação de uma HAWT para $V_{\infty} = 7,0 \text{ m/s}$, resultando na operação em 534,5 rpm da turbina. (a) Dados experimentais e (b) Simulação.

Avaliando a corrente de armadura do motor CC constata-se que está é incrementada a medida que a turbina é emulada com velocidades maiores de vento, sendo reflexo do maior torque disponível, logo resultando no acréscimo da potência entregue à carga e elevação na velocidade da turbina.

Comparando os resultados simulados com os experimentais nota-se certa discrepância, isto devido o motor CC ter sofrido variação paramétrica ou o ensaio de Martins (1994) fora

focado na obtenção das resistências e indutâncias, acarretando uma diferença no valor da constante de torque utilizado na simulação. A Tabela 5.2 apresenta as diferenças observadas na potência de carga e corrente de armadura do motor. Apesar da potência na carga diferir em 5,83% e a corrente de armadura em 18,07% os valores experimentais dos simulados, na Figura 5.14 são sobrepostos os resultados obtidos com o protótipo prático do emulador na curva característica potência *versus* rotação.

Tabela 5.2. Comparação entre resultados experimentais e simulados para emulação de uma turbina de eixo horizontal.

V_{∞}	Pcarga (W)			Iarmadura (A)			
	Experimental	Simulado	Δ	Experimental	Simulado	Δ	
4,0	32	54,88	1,72	3,41	3,95	1,16	
4,6	82	84,51	1,03	4,72	4,97	1,05	
5,0	106	105,8	1,00	4,9	5,7	1,16	
5,5	143	140,7	0,98	5,51	6,53	1,19	
6,0	195	182,1	0,93	6,11	7,41	1,21	
6,5	252	227,7	0,90	6,72	8,2	1,22	
7,0	330	278,1	0,84	7,12	9,06	1,27	
Média			1,0583	Média			1,1807

A Figura 5.14 ainda apresenta os dados obtidos por LIMA, (2009) quando ensaiou em um túnel de vento a turbina emulada.

Com a análise da Figura 5.14 é possível concluir que o resultado obtido na emulação segue a mesma linha de tendência do pontos de máxima potência da curva da turbina, não obstante, os pontos obtidos não estão sobrepostos à curva pois esta é puramente teórica, não considerando as perdas no gerador e circuito de carga.

A Figura 5.15 compara resultados na aplicação de um degrau de vento, em (a) de 4,0 m/s para 6,5 m/s, e (b) de 6,5 para 4 m/s. Nesta figura é possível avaliar o incremento na corrente de armadura (descrita pelo *CHI* com ganho de 265,8 mV/A) manifestado pelo aumento do torque da turbina, e a redução da corrente de armadura refletida na queda do torque disponível na WT. Esta figura também comprova a velocidade de resposta do PI, que apresenta um pequeno sobressinal, porém logo estabilizando, sem oscilações, no seu valor final.

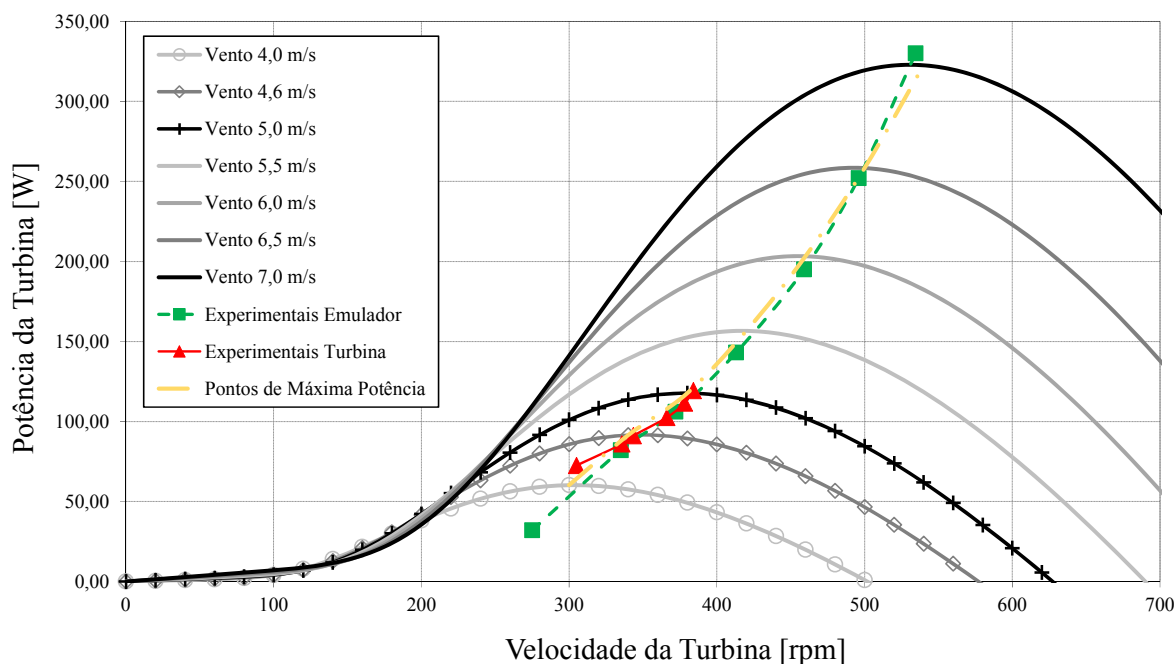


Figura 5.14 – Curva característica de Potência *versus* Rotação da HAWT emulada com os dados experimentais obtidos através do emulador e com um túnel de vento.

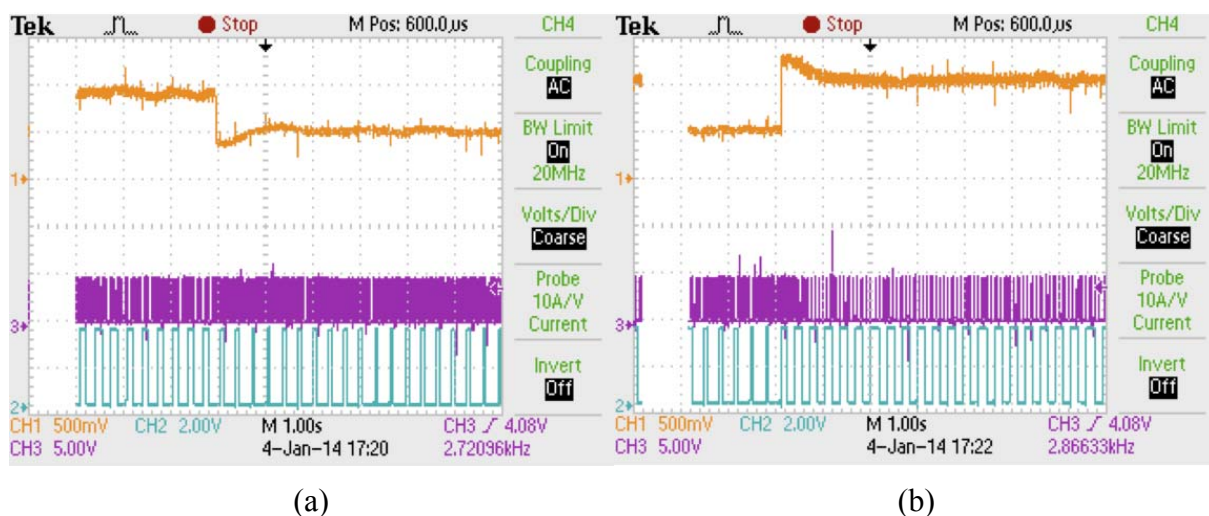


Figura 5.15 – Resultados experimentais da emulação de uma HAWT para um degrau de vento (a) 6,5 para 4,0 m/s e (b) 4,0 para 6,5 m/s.

Na Figura 5.16 (a) apresenta-se no CH2 o torque de referência com o efeito cortante do vento e sombreamento da torre para uma rotação de 100 rpm modulado por largura de pulso. No CH3 é utilizado um filtro passa-baixas de 200 Hz para análise visual de seu comportamento, o qual apresenta coerência se comparado à Figura 3.8. Na Figura 5.16(b) ilustra-se a aplicação do efeito de WS e TS para uma HAWT operando sob um vento de 4,0 m/s, rotação de 271 rpm e PMSG operando com carga em MPP.

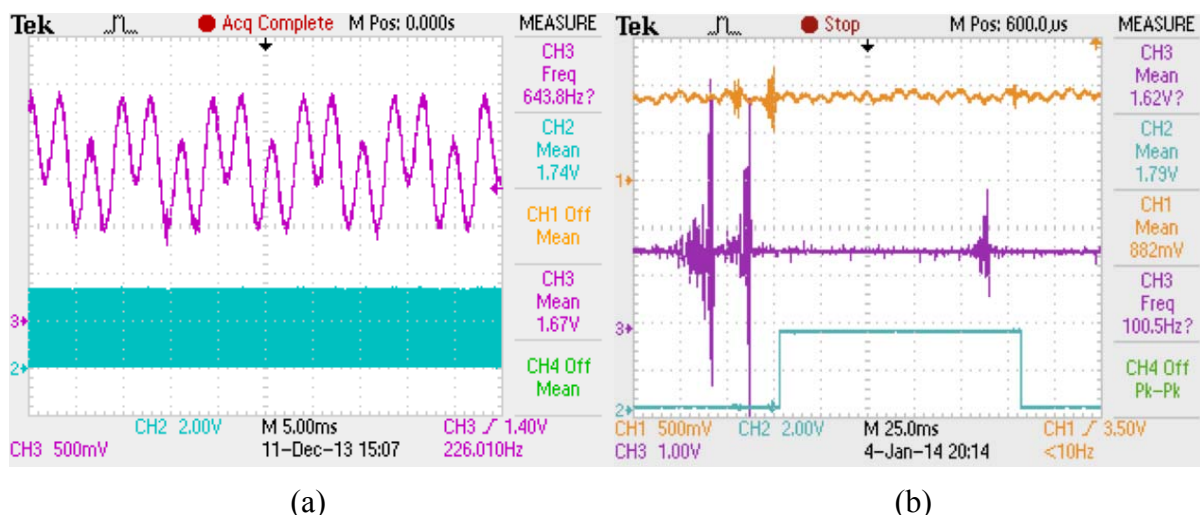


Figura 5.16 – Resultados experimentais de uma HAWT para ilustrar o efeito de sombreamento da torre. (a) torque de referência calculado para 100 rpm e (b) corrente de armadura do motor para $V_{\infty} = 4,0 \text{ m/s}$ e rotação de 271 rpm.

5.2 Resultados do Emulador para uma Turbina Magnus

O emulador desenvolvido é analisado experimentalmente para diversas velocidades de vento, comparando a corrente de armadura do motor CC e a potência entregue à carga. Esta avaliação é feita com os cilindros operando em velocidade fixa. As simulações e análises quantitativas referentes à turbina Magnus acionando geradores elétricos com velocidades fixa e variável nos cilindros quando este opera com e sem MPPT tal como enunciadas em Ribeiro (2014).

Os resultados experimentais obtidos são comparados com a mesma situação em simulação para a emulação do modelo da turbina Magnus acoplada a um gerador síncrono à ímãs permanentes alimentando um retificador trifásico conectado a um conversor *buck* com carga resistiva de $1,15 \Omega$ que executa o MPPT através do HCC.

As figuras apresentando os resultados experimentais foram obtidas através de um osciloscópio Tektronix® TDS2014 e destacam as medidas na instrumentação de corrente e tensão da carga, respectivamente no CH1 e CH2, com ganhos de $5,35 \text{ mV/A}$ *offset* de $65,29 \text{ mV}$ e $22,42 \text{ mV/V}$ *offset* de $8,02 \text{ mV}$; o comportamento da corrente de armadura do motor CC é medido pelo CH4. Os ganhos e aferimento do circuito de instrumentação são apresentados pelas Figuras Figura A.8 e Figura A.9 no 0.

5.2.1 Comparação entre Resultados Experimentais e Simulação

A fim de avaliar o comportamento do torque disponibilizado, por consequência a corrente de armadura do motor CC, amostra-se a turbina Magnus frente a quatro situações de vento. As Figuras Figura 5.17, Figura 5.18, Figura 5.19 e Figura 5.20 apresentam os resultados experimentais (a) e os simulados (b) para a emulação de uma turbina Magnus com os dados apresentados na Tabela 5.3 para velocidades de vento de 3,0 m/s, 4,0 m/s, 5,0 m/s e 6,0 m/s.

Tabela 5.3. Parâmetros da turbina Magnus utilizada.

Identificação	Valor
Potência nominal da turbina	1900 W
Velocidade nominal do vento	6,00 m/s
Rotação nominal da turbina	35 rpm
Raio da turbina	2,90 m
Relação da caixa de engrenagens	100

Na Figura 5.17 podem-se visualizar os resultados da tensão, corrente na carga e torque, demonstrado pela corrente de armadura para $V_{\infty} = 3,0 \text{ m/s}$. A velocidade de operação da turbina resulta em 4,95 rpm.

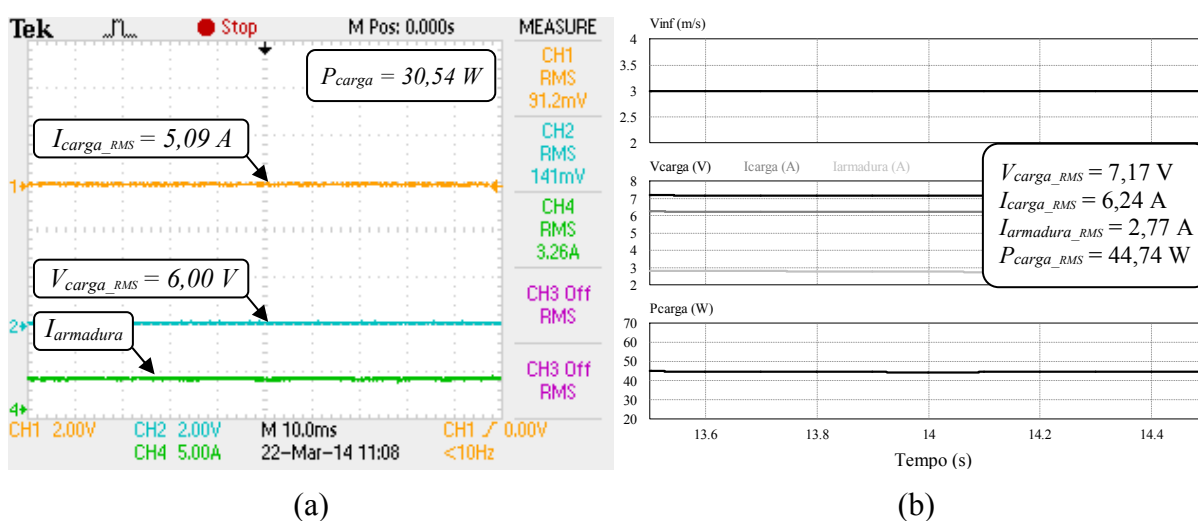


Figura 5.17 – Resultados da emulação de uma turbina Magnus para $V_{\infty} = 3,0 \text{ m/s}$, resultando na operação em 4,95 rpm da turbina. (a) Dados experimentais e (b) Simulação.

A Figura 5.18 apresenta os resultados da tensão, corrente na carga e corrente de armadura para $V_{\infty} = 4,0 \text{ m/s}$. A velocidade de operação da turbina resulta em 7,70 rpm.

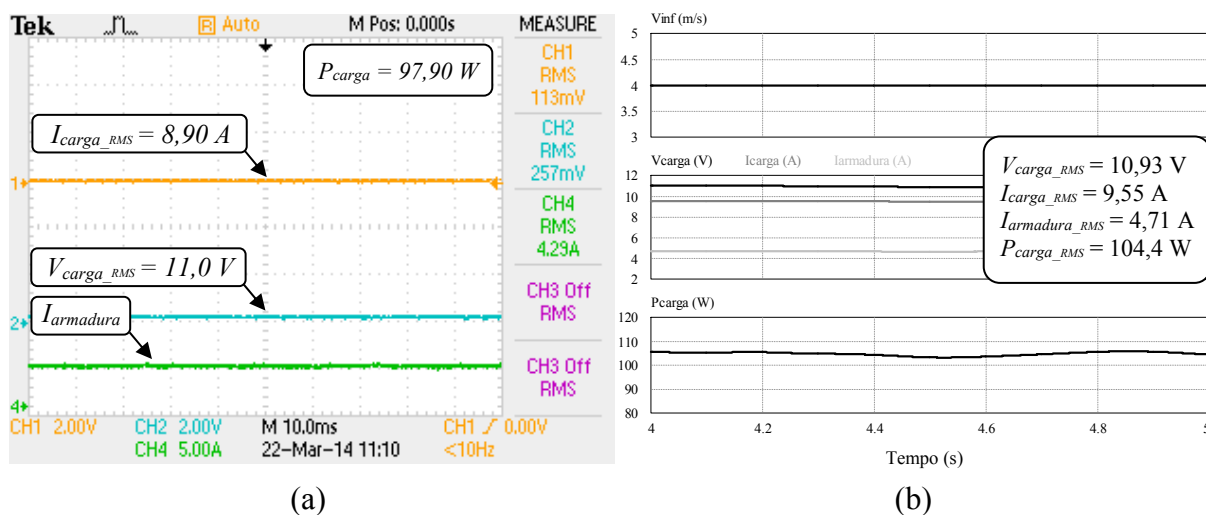


Figura 5.18 – Resultados da emulação de uma turbina Magnus para $V_{\infty} = 4,0 \text{ m/s}$, resultando na operação em 7,70 rpm da turbina. (a) Dados experimentais e (b) Simulação.

A Figura 5.19 apresenta os resultados da tensão, corrente na carga e corrente de armadura para $V_{\infty} = 5,0 \text{ m/s}$. A velocidade de operação da turbina resulta em 9,96 rpm.

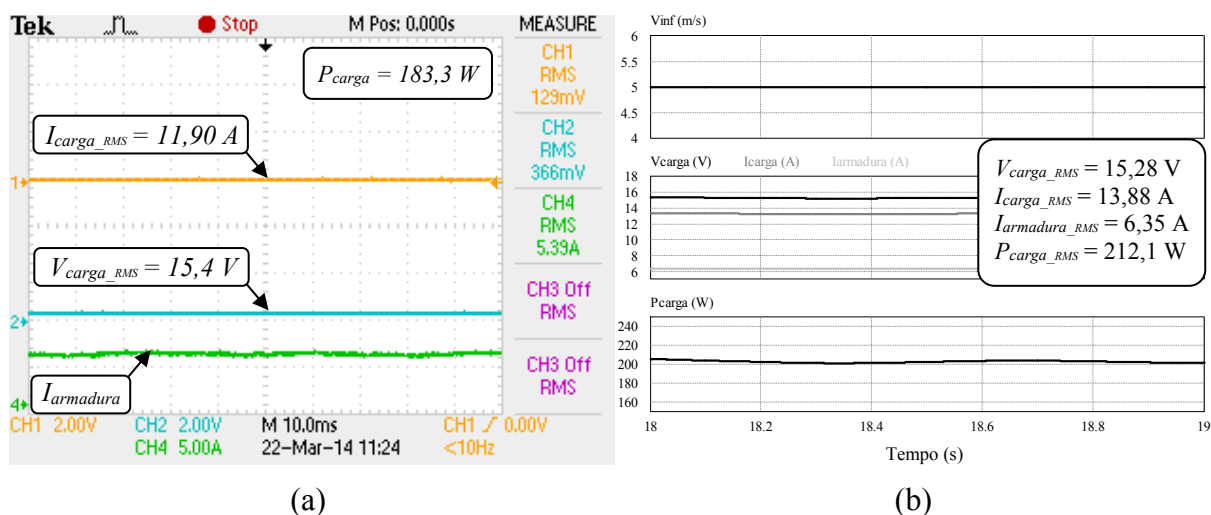


Figura 5.19 – Resultados da emulação de uma turbina Magnus para $V_{\infty} = 5,0 \text{ m/s}$, resultando na operação em 9,96 rpm da turbina. (a) Dados experimentais e (b) Simulação.

A Figura 5.20 apresenta os resultados da tensão, corrente na carga e corrente de armadura para $V_{\infty} = 6,0 \text{ m/s}$. A velocidade de operação da turbina resulta em 11,13 rpm.

Avaliando a corrente de armadura do motor CC constata-se que está é incrementada a medida que a turbina é emulada com velocidades maiores de vento, sendo

reflexo do maior torque disponível, logo resultando no acréscimo da potência entregue à carga e elevação na velocidade da turbina.

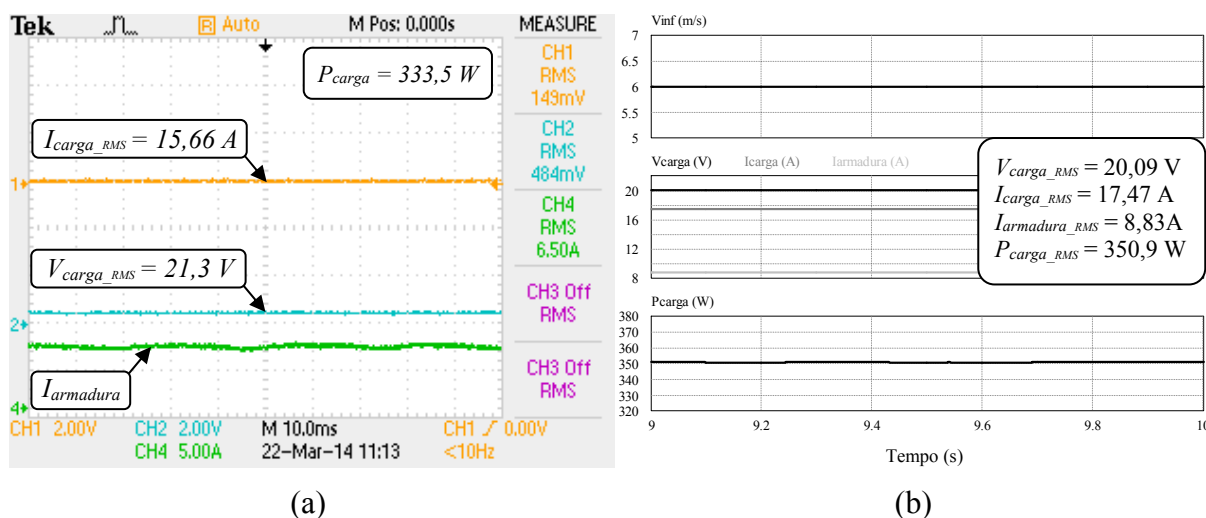


Figura 5.20 – Resultados da emulação de uma turbina Magnus para $V_{\infty} = 6,0 \text{ m/s}$, resultando na operação em 11,3 rpm da turbina. (a) Dados experimentais e (b) Simulação.

Comparando os resultados simulados com os experimentais nota-se uma certa discrepância. A Tabela 5.4 apresenta as diferenças observadas na potência da carga e corrente de armadura do motor. Apesar da potência na carga diferir em 18,52% e a corrente de armadura em 12,10% nos valores experimentais dos simulados, na Figura 5.21 são sobrepostos os resultados obtidos experimentalmente com o emulador na curva característica de potência *versus* rotação da turbina Magnus, para velocidade fixa do cilindro em 100 rad/s .

Tabela 5.4. Comparação entre resultados experimentais e simulados para emulação de uma turbina Magnus.

V_{∞}	Pcarga (W)			Iarmadura (A)		
	Experimental	Simulado	Δ	Experimental	Simulado	Δ
3,0	30,54	44,74	1,46	3,26	2,77	0,85
4,0	97,90	104,38	1,07	4,29	4,71	1,10
5,0	183,26	212,09	1,16	5,39	6,35	1,18
6,0	333,56	350,97	1,05	6,5	8,83	1,36
		Média	1,1852		Média	1,1210

Com a análise da Figura 5.21 é possível concluir que o resultado obtido na emulação segue a mesma linha de tendência dos pontos de máxima potência da curva da turbina. Não obstante, os pontos obtidos não estão sobrepostos à curva, pois está é puramente teórica e não considera as perdas no gerador e circuito de carga.

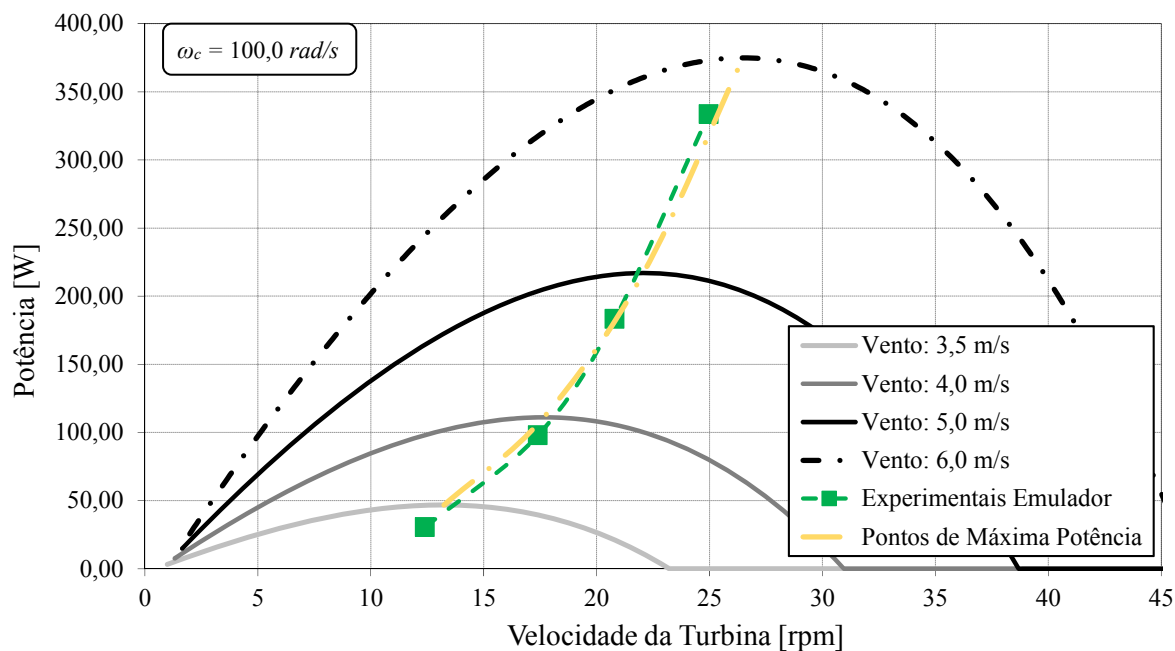


Figura 5.21 – Curva característica de Potência *versus* Rotação da turbina Magnus emulada com os dados experimentais obtidos através do emulador.

5.3 Resumo do capítulo

Este capítulo apresentou os resultados experimentais e os obtidos em simulação. Na simulação foi analisado o comportamento do emulador utilizando o modelo de uma HAWT acoplada a um PMSG operando com carga em MPP e fora de MPP, ficando evidente a importância de estudos nesta área, visto que houve grande diferença na potência gerada.

O emulador simulado representou o comportamento da turbina de eixo horizontal no que se refere à rotação, torque e potência gerada para acompanhar as variações de vento. O modelo dinâmico demonstrou o amortecimento na rotação da turbina, característico da compensação da inércia quando comparado à simulação apenas do modelo estático.

Os resultados experimentais, tanto para a turbina Magnus, como para a HAWT emulada evidenciou o aumento e o decréscimo da corrente de armadura do motor CC quando variado o vento, o que é reflexo da mudança do torque disponível, acarretando alteração na velocidade do PMSG, logo na potência gerada.

Foram plotados os dados experimentais de rotação da turbina e da potência na carga junto com a curva característica de potência *versus* rotação da WT emulada, resultando que os valores obtidos seguem a mesma linha de tendência dos MPP.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões desta dissertação, ressaltando a proposta e seus resultados obtidos, bem como os problemas encontrados. São discutidas a emulação do modelo estático de turbinas de eixo vertical e a do tipo Magnus. Representa-se também o comportamento dinâmico das HAWT descrevendo o efeito ocorrido pela da incidência de diferentes velocidades de ventos em função da altura da torre e empregando o sombreamento desta pela adição de componentes harmônicas de primeira e terceira ordens na velocidade no torque da WT.

Para acionar o gerador elétrico no emulador, foi utilizado um motor de corrente contínua que tem seu torque controlado por um laço de controle proporcional integral visando obter erro nulo em regime permanente. Sua eficácia foi comprovada na simulação e na prática, quando aplicado um degrau na velocidade do vento. Esse controlador foi discretizado e implementado em um processador digital de sinais *Texas Instruments*[®] TMS320F28335.

Uma plataforma gráfica e intuitiva foi desenvolvida no LabVIEW[®], com o cálculo dos valores no modelo estático de cada turbina, fornecendo ao DSP os valores de referência de torque para o controlador da corrente de armadura. Na emulação das HAWT o LabVIEW[®], além de decompor trigonometricamente a potência pelo erro de alinhamento da turbina em relação ao vento, ainda envia a rotação atual da turbina para o cálculo do efeito cortante do vento, sombreamento da torre e a compensação da inércia. A compensação da inércia utilizada permite a representação da dinâmica de turbinas de maior inércia usando pequenas máquinas, apenas alterando a referência de torque imposto ao gerador.

Nesta dissertação são brevemente comentadas algumas técnicas de maximização de potência através do controle da corrente do gerador. Entretanto, o controle *hill-climbing* foi empregado para regular a corrente de carga do gerador, logo controlando sua velocidade. O

HCC também é utilizado na otimização da velocidade de rotação dos cilindros da turbina Magnus, como proposto por Corrêa et al. (2013b), sendo uma das contribuições deste trabalho. Além disso, é visível em simulação a importância de o PMSG operar em MPP, apresentando considerável aumento na potência gerada em comparação a uma carga fixa.

Os resultados obtidos em simulação mostram como o emulador se comporta com uma HAWT para variações suaves de vento, descrevendo seu modelo estático tanto com MPPT quanto para carga fixa. É exposta também a importância de pesquisas de métodos de controle dos aerogeradores, visto que a quantidade de energia extraída de um WT depende de quão preciso é o rastreamento do ponto de máxima potência. Além do mais, o modelo dinâmico verificou através da aplicação de degraus de vento o amortecimento da resposta da velocidade da turbina frente a variações abruptas do vento, caracterizando assim a grande inércia dos aerogeradores.

Os resultados experimentais avaliaram a emulação de uma HAWT e de uma turbina Magnus conectadas a um gerador de síncrono a ímãs permanentes. Foram evidenciados nestes a variação da corrente de armadura do motor CC a qual segue o mesmo comportamento do vento como reflexo da mudança do torque disponível, e logo na potência gerada.

Foram apresentados os gráficos das curvas características de potência *versus* rotação das WT emuladas, juntamente com os dados experimentais de rotação da turbina e da potência na carga obtidos com o WTE. Observa-se que os valores obtidos seguem a mesma linha de tendência dos pontos de máxima potência, porém não sobrepostos a curva, visto que as curvas representam a potência da turbina e não consideram as perdas da caixa de engrenagem, acoplamento e circuito do gerador.

6.1 Contribuições do Trabalho

As contribuições desta dissertação para o estudo dos emuladores referem-se à reunião num único equipamento da representação dos principais efeitos, quais sejam: o ângulo relativo entre a nacela e vento, que simplificadamente resultou na decomposição da potência disponível; a variação do ângulo de passo das pás, pelo cálculo do modelo estático; o efeito cortante do vento e sombreamento da torre e a compensação da inércia avaliando a relação de transformação da caixa de engrenagens e amortecimento dos eixos. Além disto, esta dissertação levou em consideração a relação de transformação da caixa de engrenagem e o amortecimento do eixo da turbina, quando equacionado o toque que o motor CC deve executar na compensação da inércia. Este emulador ainda pode analisar situações de

diferentes velocidades de vento com o gerador operando com MPPT e fora de seu ponto de máxima operação.

A representação de uma turbina Magnus operando com velocidade variável nos cilindros é inédita, até então na literatura, onde pode-se encontrar apenas condições de velocidade fixa da rotação dos cilindros. Paralelamente a isto em Corrêa et al. (2013a) e Corrêa et al. (2013b) ainda foi proposto um método de otimização desta velocidade, comprovado experimentalmente em Ribeiro (2014) ser eficaz no aumento da potência gerada.

6.2 Propostas de trabalhos futuros

Os trabalhos futuros compreendem a avaliação experimental da turbina Magnus quando operando acoplada a um gerador de indução com excitação através de STATCOM, já que a máquina de indução é robusta, tem baixo custo, possui alta densidade de potência e é facilmente encontrada no mercado. Por isto, ela tem se tornado atrativa para sistemas de geração de baixo custo. (TRAPP et al., 2012)

A representação do modelo dinâmico das turbinas de eixo horizontal talvez possa ser aperfeiçoado com a leitura da rotação pelo DSP e pela implementação de um protocolo de comunicação de dados entre o LabVIEW® e o processador digital de sinais.

Um ensaio criterioso para levantamento dos parâmetros no motor de corrente contínua possibilitaria uma representação mais fiel de valores de torque impostos ao gerador.

Realizar estudos para verificar o comportamento do WTE desenvolvido nesta dissertação quando forem acoplados geradores de maior potência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL. **Banco de Informações de Geração 2013**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>.

ARIFUJJAMAN, M.; IQBAL, M. T.; QUAICOE, J. E. **MAXIMUM POWER EXTRACTION FROM A SMALL WIND TURBINE EMULATOR USING A DC - DC CONVERTER**, 2006a. (Nota técnica).

ARIFUJJAMAN, M.; IQBAL, M. T.; QUAICOE, J. E. AN ISOLATED SMALL WIND TURBINE EMULATOR. **Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering**, n. May, p. 4–7, 2006b.

BARBERO, A. et al. **Numerical tool for the optimization of wind turbines based on Magnus effect** 9th World Wind energy Conference and Exhibition (WWEC 2010). **Anais...Estambul, Turkey: 2010**

BYCHKOV, N. M.; DOVGAL, A. V.; SOROKIN, A. M. PARAMETRIC OPTIMIZATION OF THE MAGNUS WIND TURBINE. **International Conference on Methods of Aerophysical Research, ICMAR 2008**, n. 1, p. 1–5, 2008.

CATANĂ, I.; SAFTA, C.-A.; PANDURU, V. POWER OPTIMISATION CONTROL SYSTEM OF WIND TURBINES BY CHANGING THE PITCH ANGLE. **Scientific Bulletin**, v. 72, p. 141–148, 2010.

CHINCHILLA, M.; ARNALTES, S.; RODRÍGUEZ-AMENEDO, J. L. Laboratory set-up for Wind Turbine Emulation. **IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)**, p. 553–557, 2004.

CORRÊA, L. C. et al. **MPPT FOR MAGNUS WIND TURBINES BASED ON CYLINDERS ROTATION SPEED** Proceedings of 12th Brazilian Power Electronics Conference COBEP 2013. **Anais...2013a**

CORRÊA, L. C. et al. **Maximum Power Point Tracking for Magnus Wind Turbines** IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. **Anais...2013b**

DJATMIKO, W.; SUTOPO, B. **Speed Control DC Motor under Varying Load Using Phase-Locked Loop System** Proc. of the International Conf. on Electrical, Electronics, Communication, and Information CECI'2001. **Anais...2001**

FADAEINEDJAD, R.; MOSCHOPOULOS, G.; MOALLEM, M. The Impact of Tower Shadow, Yaw Error, and Wind Shears on Power Quality in a Wind–Diesel System. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 24, n. 1, p. 102–111, mar. 2009.

FARRET, F. A.; PFISCHER, L. L.; BERNARDON, D. P. **Active yaw control with sensorless wind speed and direction measurements for horizontal axis wind turbines** Proceedings of the 2000 Third IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems (Cat. No.00TH8474). **Anais...IEEE**, 2000Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=869856>>. Acesso em: 18 dez. 2013

FARRET, F. A.; PFITSCHER, L. L.; BERNARDON, D. P. **Sensorless active yaw control for wind turbines** IECON'01. 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Cat. No.37243). **Anais...IEEE**, 2001Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=975981>>. Acesso em: 18 dez. 2013

FARRET, F. A.; SIMÕES, M. G. **INTEGRATION OF ALTERNATIVE SOURCES**. Primeira ed. Hoboken, New Jersey: A JOHN WILEY & SONS, INC., 2006.

GASCH, R.; MAURER, J.; HEILMANN, C. **Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation**. Segunda ed. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2011. p. 168–207

GONG, B.; XU, D. Real time wind turbine simulator for wind energy conversion system. **IEEE Power Electronics Specialists Conference**, p. 1110–1114, jun. 2008.

GOŇO, R.; RUSEK, S.; HRABČÍK, M. Wind Turbine Cylinders with Spiral Fins. n. April, 2007.

GUO, H. et al. **Real-time simulation of BLDC-based wind turbine emulator using RT-LAB** 2009 International Conference on Electrical Machines and Systems. **Anais...IEEE**, nov. 2009Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/articleDetails.jsp?arnumber=5382776>>. Acesso em: 16 set. 2013

GUO, L. **Implementation of digital PID controllers for DC-DC converters using digital signal processors** 2007 IEEE International Conference on Electro/Information Technology. **Anais...IEEE**, maio 2007Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4374445>>. Acesso em: 19 dez. 2013

HEIER, S.; WADDINGTON, R. **Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems**. 2. ed. [s.l.] John Wiley & Sons, Inc., 2006.

LI, W. et al. Research on Wind Turbine Emulation based on DC Motor. **2007 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications**, n. 3, p. 2589–2593, maio 2007.

LIMA, L. P. **Integração de Pilhas de Célula a Combustível com Outras Fontes Alternativas de Energia**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Maria, 2009.

LOPES, L. A. C. et al. A Wind Turbine Emulator that Represents the Dynamics of the Wind Turbine Rotor and Drive Train. **IEEE Power Electronics Specialists Conference**, p. 2092–2097, 2005.

LU, H.-C.; CHANG-CHIEN, L.-R. **Use of wind turbine emulator for the WECS development** The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA -

Anais...IEEE, jun. 2010Disponível em:
<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5543535>>. Acesso em: 16 set. 2013

LUO, D.; HUANG, D.; WU, G. Analytical solution on Magnus wind turbine power performance based on the blade element momentum theory. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 3, n. 3, p. 033104, 2011.

MARTÍNEZ, F.; DE PABLO, S.; HERRERO, L. C. Emulador de Lazo Abierto para Turbinas Eólicas de Paso Fijo. **Información tecnológica**, v. 22, n. 2, p. 85–94, 2011.

MARTINS, G. M. **SIMULAÇÃO DE TURBINAS COM FONTE PRIMÁRIA E CARGA REAIS ATRAVÉS DE MOTOR DE C.C. COMANDADO POR MICROCONTROLADOR**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Maria, 1994.

MASTERS, G. M. **Renewable and Efficient Electric Power Systems**. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2004.

MOLIN, M. G.; MERCADO, P. E. AN EFFICIENT CONTROL STRATEGY OF VARIABLE SPEED WIND TURBINE GENERATOR FOR THREE-PHASE GRID-CONNECTED APPLICATIONS. 2009.

MONFARED, M.; MADADI KOJABADI, H.; RASTEGAR, H. Static and dynamic wind turbine simulator using a converter controlled dc motor. **Renewable Energy**, v. 33, n. 5, p. 906–913, maio 2008.

NYE, J. M. et al. Design and Implementation of a Variable Speed Wind Turbine Emulator. **IEEE International Conference on Electrical Machines**, p. 2060–2065, set. 2012.

OHYAMA, K.; NAKASHIMA, T. Wind turbine emulator using wind turbine model based on blade element momentum theory. **IEEE International Symposium on Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion**, p. 762–765, jun. 2010.

PENG, G. Influence analysis of wind shear and tower shadow on load and power based on blade element theory. **2011 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)**, p. 2809–2812, maio 2011.

RIBEIRO, C. G. **RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA DE TURBINAS MAGNUS ACIONANDO GERADORES ELÉTRICOS**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Maria, 2014.

ROCHA, R. V. **Simulação de Aerogerador em uma Bancada Experimental**. [s.l.: s.n.].

THONGAM, J. S.; OUHROUCHE, M. MPPT Control Methods in Wind Energy Conversion Systems. In: CARRIVEU, R. (Ed.). **FUNDAMENTAL AND ADVANCED TOPICS**. Rijeka, Croatia: INTECH, 2011. p. 339 – 361.

TONG, W. **Wind Power Generation and Wind Turbine Design**. [s.l.] WIT Press, 2010. v. 48p. 725

TRAPP, J. G. **GERADOR DE INDUÇÃO ISOLADO COM TENSÃO E FREQUÊNCIA REGULADAS POR CONVERSOR MATRICIAL ESPARSO**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Maria, 2008.

TRAPP, J. G. et al. **Variable Speed Wind Turbine Using the Squirrel Cage Induction Generator with Reduced Converter Power Rating for Stand-Alone Energy Systems**IEEE International Conference on Industry Application (12th INDUSCON). **Anais...**2012

TRAPP, J. G. **GERADOR DE INDUÇÃO COM EXCITAÇÃO ESTÁTICA, FILTRO ATIVO E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA SISTEMAS EÓLICOS ISOLADOS**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Maria, 2013.

XIN, W. U.; YANPING, L. I. U.; WEI, T. **Modified Hill Climbing Method for Active Yaw Control In Wind turbine**Control Conference (CCC), 2012 31st Chinese. **Anais...**2012

ZHAO, J. et al. CFD analysis of ducted-fan UAV based on Magnus effect. **2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation**, p. 1722–1726, ago. 2012.

ANEXOS

ANEXO A – MODELAGEM DO MOTOR CC

Neste apêndice é apresentado o circuito equivalente do motor de corrente contínua com excitação independente e seu modelo matemático.

A.1 Motor de Corrente Contínua

As máquinas de corrente contínua podem ser utilizadas como motor ou gerador, dependendo da aplicação que se pretende. Atualmente, os motores CC vêm sendo substituídos por máquinas de indução com rotor em gaiola de esquilo. Porém, o motor CC ainda apresenta características vantajosas que o torna uma opção atraente em determinadas aplicações sob o ponto de vista da facilidade de implementação do controle de torque e velocidade.

O princípio de funcionamento do motor de corrente contínua baseia-se na interação de dois campos magnéticos gerados pelo circuito de armadura e pelo circuito de campo. Todavia, o circuito de campo pode ser substituído por pares de pólos de ímãs permanentes. A atração entre o campo magnético da armadura e o campo magnético do circuito de campo resulta em um torque. À medida que o rotor gira pela ação dos comutadores cria-se na saída um torque contínuo.

O circuito equivalente do motor CC com excitação independente é apresentado na Figura A.1, onde V_a , R_a e L_a são: tensão, resistência e indutância de armadura, respectivamente. Devido à ação da rotação relativa da armadura em relação ao campo, uma tensão proporcional a velocidade do motor, que se opõe a V_a , é induzida nos enrolamento de armadura, conhecida como força contra eletromotriz ($e_a = k_m \omega_m$).

Da análise do circuito da Figura A.1, são obtidas as Equações (A.1) e (A.2), que descrevem eletricamente o circuito de armadura e o circuito de campo, respectivamente. Não obstante, pode-se inferir a Equação (A.3) que interpreta o comportamento mecânico do motor de corrente contínua, onde k_m é a constante de torque do motor relacionando uma unidade de corrente com o torque produzido pelo motor.

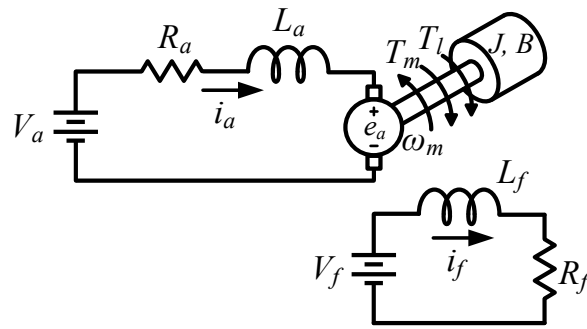


Figura A.1 – Circuito equivalente do motor de corrente contínua com excitação independente.

$$L_a \cdot \frac{di_a}{dt} = -R_a \cdot i_a - e_a + v_a(t) \quad (\text{A.1})$$

$$L_f \cdot \frac{di_f}{dt} = v_f(t) - R_f \cdot i_f \quad (\text{A.2})$$

$$J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} = k_m \cdot i_a + B \cdot \omega_m \quad (\text{A.3})$$

As equações e o circuito acima enunciados podem ser identificados na forma de diagrama de blocos, detalhado na Figura A.2 (a). Esta análise facilita a interpretação das funções de transferência que são utilizadas para o projeto do controlador de corrente. Contudo se uma tensão de campo (V_f) não variável é aplicada ao motor, a corrente de campo (i_f) torna-se constante, e o diagrama de blocos pode ser simplificado de acordo com a Figura A.2 (b) e descrito pela Equação (A.4).

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{\omega}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{k_m}{L_a} \\ \frac{k_m}{J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ \omega_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ T_l \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

Com a identificação dos principais componentes do diagrama de blocos a função transferência que relaciona a corrente de armadura em função da tensão de armadura é obtida pela Equação (A.5).

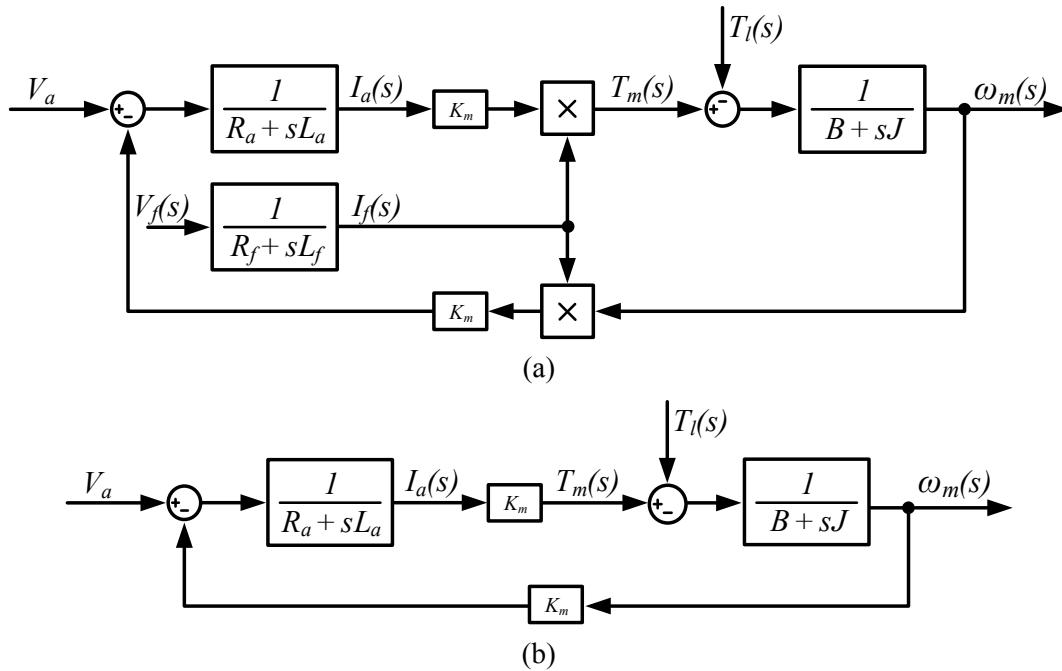


Figura A.2 – Diagrama de blocos de um de corrente contínua com excitação independente com (a) corrente de campo variável e (b) corrente de campo constante.

$$\frac{i_a(s)}{V_a(s)} = \frac{1}{R_a + sL_a} \tag{A.5}$$

Visto que o acionamento do motor é feito por um conversor *chopper*, que através de sua razão cíclica (*D*) insere-se um ganho em V_a . Logo a Equação (A.5) pode ser reescrita em função da variável de atuação do circuito, indicada pela Equação (A.6). Por consequência, é obtida a função transferência que relaciona a razão cíclica (variável de atuação no conversor) com a variável a ser controlada, assim sendo utilizada no projeto do compensador.

$$G_{i_a/d} = \frac{i_a(s)}{d(s)} = \frac{V_i(s)}{R_a + sL_a} \tag{A.6}$$

A.2 Dados do Motor CC

O motor CC utilizado nesta dissertação possui potência nominal de 19,4 kW, cujos parâmetros foram ensaiados em Martins (1994) e apresentados na Tabela A.1.

Tabela A.1. Parâmetros do Motor CC.

Símbolo	Valor
V_a	500 V
R_a	3,18 Ω
L_a	14,466 mH
V_f	500 V
R_f	210,5 Ω
L_f	162,136 H
K_m	0,72 N·m/A
rpm	1800
J_{motor}	0,04 kg·m ²
B_{motor}	0,0055 N·m·s

ANEXO B – GERADOR À ÍMÃS PERMANENTES E RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA

Os dados do gerador utilizado são apresentados na Tabela A.2 e foram obtidos através de um ensaio experimental.

Tabela A.2. Parâmetros do PMSG.

Símbolo	Símbolo	Valor
Resistência do Estator	R_s	0,208 Ω
Indutância do eixo-d	L_d	0,1465 mH
Indutância do eixo-q	L_q	0,728 mH
Tensão pico-a-pico da constante emf	$V_{pk}/krpm$	26,16 mV/rpm
Número de pólos	P	6
Momento de inércia	J_{PMSG}	0,02479 kg·m ²

A Figura A.3 apresenta a tensão CA aplicada entre dois terminais (*CHI*) do PMSG e a respectiva corrente (*CH4*) obtida através do osciloscópio Tektronix® TDS2014. Com posse dos dados experimentais foi simulado a mesma situação no Psim® a fim de validar o ensaio e utilizar dos mesmos parâmetros em simulação, apresentando na Figura A.4 os valores simulados de tensão e corrente ($V_{simulação}$ e $I_{simulação}$) comparado aos experimentais ($V_{experimental}$ e $I_{experimental}$).

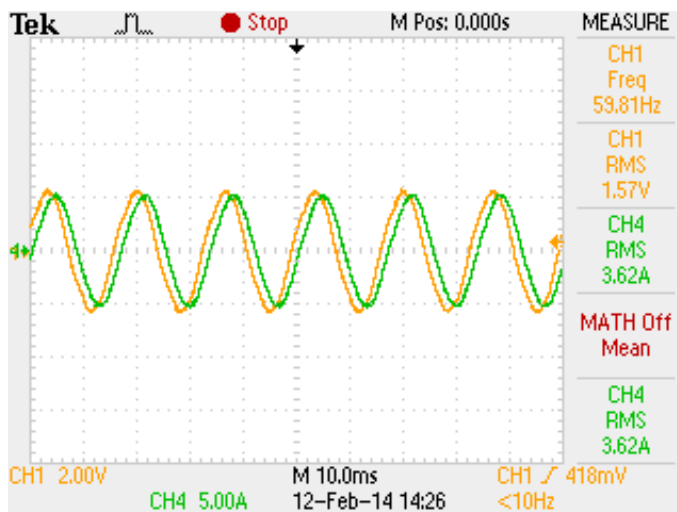


Figura A.3 – Tensão aplicada entre dois terminais para ensaio de obtenção dos parâmetros do PMSG (*CH1*) e corrente (*CH4*).

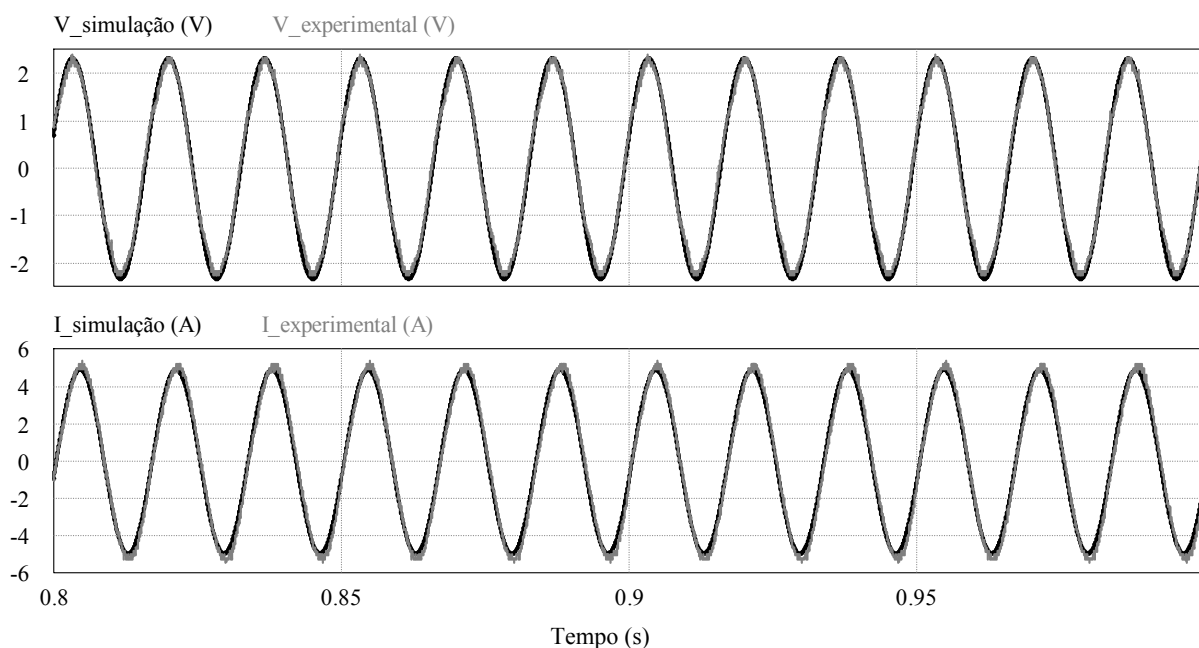


Figura A.4 – Curva de magnetização do gerador de indução ensaiado.

B.3 MPPT através do controle da corrente de carga do gerador

O rastreamento do ponto de máxima potência utilizado nesta dissertação baseia-se no chaveamento de um conversor *buck* conectado a um retificador trifásico não controlado alimentado pelo PMSG.

A razão cíclica da chave do *buck* (d) é ditada pelo algoritmo *hill climbing* com passo fixo, este, através da leitura da tensão e corrente na carga, é responsável por rastrear o ponto

de máxima potência, regulando, assim, a corrente do gerador. A Figura A.5 detalha o fluxograma do HCC implementado em um PIC16F877A.

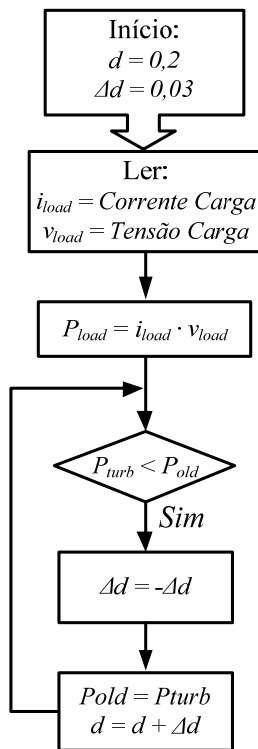


Figura A.5 – Fluxograma do HCC para rastreamento do ponto de máxima potência através do controle da corrente de carga.

A Figura A.6 detalha o conversor *buck* atuando como carga em MPPT para o gerador de indução

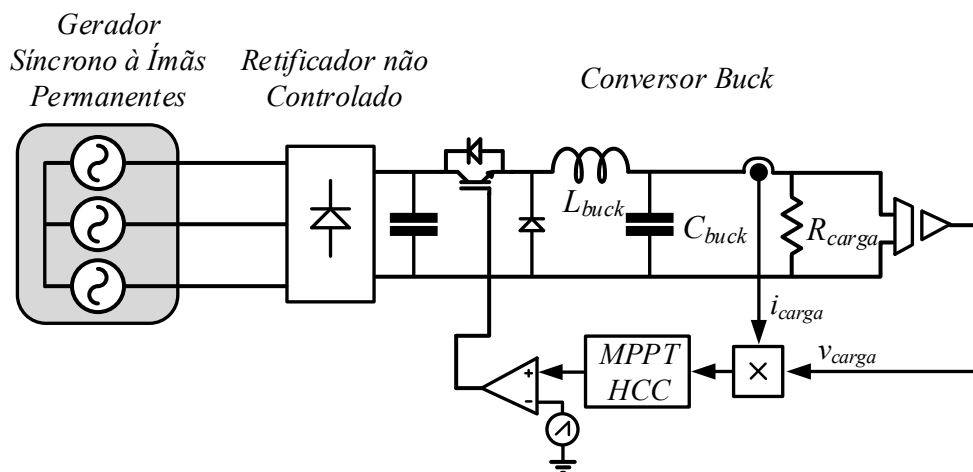


Figura A.6 – Conversor *buck* utilizado como carga para MPPT do gerador.

ANEXO C – PARÂMETROS DA TURBINA DE EIXO HORIZONTAL

O modelo estático da turbina utilizado nas simulações e no protótipo experimental é encontrado em Heier e Waddington (2006) e Molin e Mercado (2009), e presente também no software PSim[®] e Matlab/Simulink[®]. As equações que determinam as características do modelo são apresentadas na seção 3.3. A curva de potência para diversas velocidades de vento é apresentada na Figura A.7, cujos parâmetros são dados na Tabela 5.1.

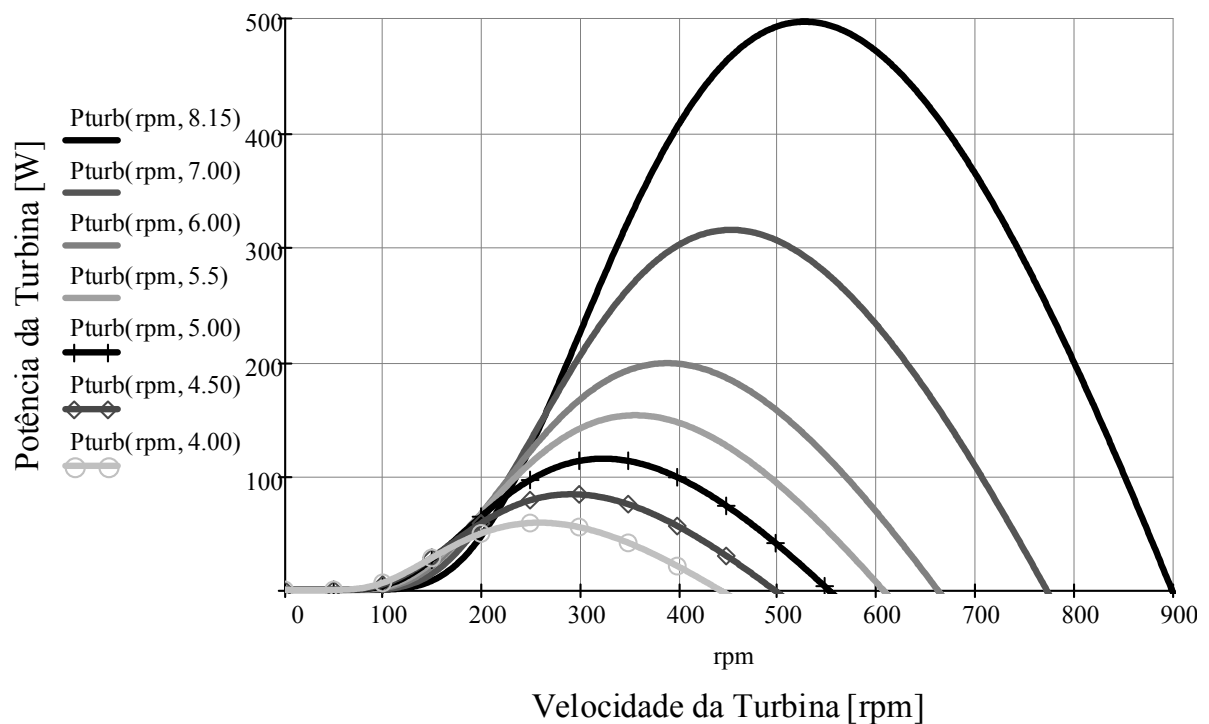


Figura A.7 – Curva característica de potência *versus* rotação de uma turbina de eixo horizontal emulada.

ANEXO D – INSTRUMENTAÇÃO *BUCK* MPPT

A instrumentação de tensão e corrente da carga do conversor *buck* foram aferidas e verificada sua linearidade. As Figura A.8 e Figura A.9 apresentam as curvas e as equações linearizadas obtidas para o sensor de corrente e tensão, respectivamente.

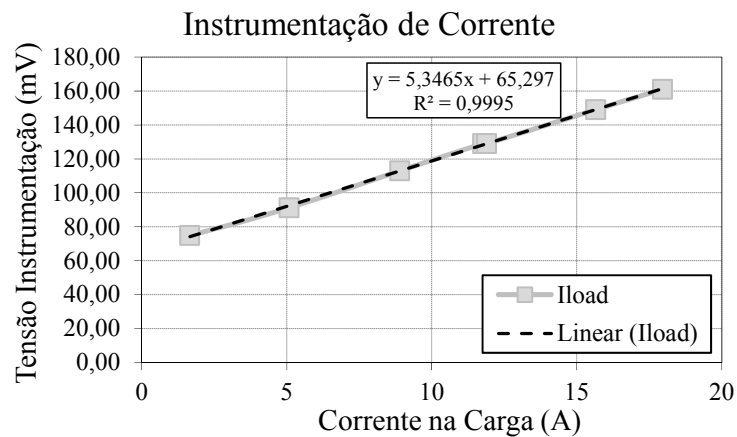


Figura A.8 – Curva da instrumentação de corrente da carga.

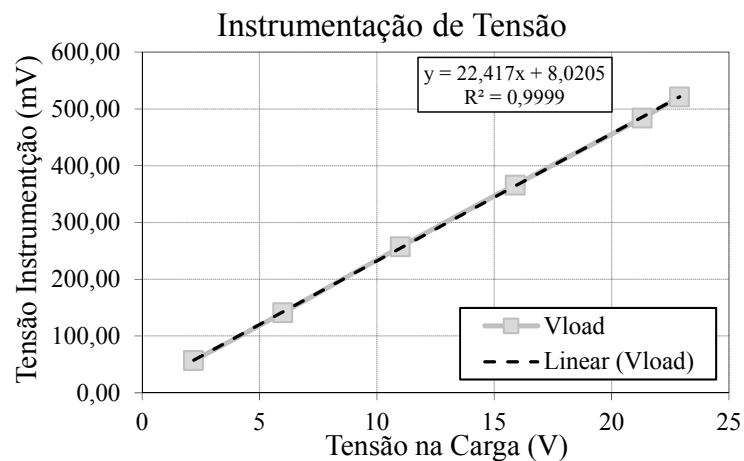


Figura A.9 – Curva da instrumentação da tensão da carga.

ANEXO E – CÓDIGO FONTE DO PROGRAMA DO CONTROLE DE CORRENTE DE ARMADURA DO EMULADOR

O código a seguir foi implementado em um DSP *Texas Instruments*[®] TMS320F28335 através do ambiente *Code Composer*[®] v.3.3.

```

/*****
Nome: Controle WTE.c
Autor: Leonardo Candido Corrêa
Data: 07/01/2014
Descrição: Neste arquivo são realizadas as aquisições através do ADC e o controle da corrente de
armadura do motor CC
*****/

#include "DSP2833x_Device.h" // Peripheral address definitions
#include "F28335_example.h" // Main include file
#include "math.h"
#include "DSP2833x_Var_User.h" // Configurações gerais

#define deltat 1/20000 //Período de cada interrupção, utilizado para a derivada da velocidade
#define kmotor 1 //Constante de torque do motorCC

//-----
// Declaração de variáveis
//-----
// Definição das variáveis medidas
float aquisicao[4] = {0., 0., 0., 0.}; // Vetor para armazenar as aquisições realizadas

// Variáveis para buffer
Uint16 i=0;
Uint16 ii = 0;

//Comparador para registrador do PWM (F=20kHz -> TBPRD=3750)
Uint16 comparador = 0;
```

```

//----- Calibração ADs-----

//Calibração da aquisição da corrente de armadura
float ia_volts = 0, ia_amp = 0, ia_pu = 0;
float ganho_ia = 9.51/1.7; //ganho da instrumentação (1.7V/9.951A)
float i_base = 16; //utilizando 16A para conversao em pu

//Calibração da aquisição da corrente de referência
float iref_volts = 0, iref_amp = 0, iref_pu = 0;
float ganho_iref = 3; //ganho do envio do LabVIEW - DSP -> 3V equivale a 1pu
// torque max ??Nm(?A): enviado via ganho de

//Calibração da aquisição da corrente de referência
float rot_volts = 0, rot_rad = 0, rot_rpm = 0;
float ganho_rot = 120/3; //120rad/s = 3V, logo ganho=0.025 V/rad/s

//Variáveis do filtro ativo
//float ia_fil = 0, ia_fil_1 = 0, ia_fil_2 = 0, e_ia_fil = 0;
//----- Fim Calibração ADs-----

//Variáveis para o calculo do torque de referencia
float rotacao = 0, rotacao_1 = 0, rotacaoRPM = 0;
float Tshear = 0, Tturb = .5;
float Jmotor = 0.02785588, Jturb = 1.25; //Jturb = 7
float Tref = 0;

// Controle das correntes fases a e b
float e_iai; // Erro
float e_iai_1 = 0; // Errocom atraso de uma amostra
float iai; // Corrente interna
float u_iai = 0; // Ação de controle da corrente interna
float iai_ref = 0; // Referência da corrente interna
float u_iai_1 = 0; // Ação de controle da corrente interna com atraso de uma amostra

//-----
// Interrupção do timer 4 - Controle
//-----
interrupt void EPWM1_INT_ISR(void) // PIE3.1 @ 0x000D60 EPWM1_INT (EPWM1)
{

// Limpa os flags
EPwm1Regs.ETCLR.bit.INT = 1; // 1 = clears the ETFLG[INT] flag
PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP3; // Must acknowledge the PIE group

```

```

// Desativa a interrupção do ePWM1
// EPwm1Regs.ETSEL.bit.INTEN = 0;

    AdcRegs.ADCTRL2.bit.EXT_SOC_SEQ1 = 1; // Enable external interrupt to ACD start of
conversion

ADCstartconv_on; //Seta a GPIO30 em 1 quando inicia a conversao do AD
    //verifica que pontos estão sendo convertidos

//-----
// Partida Suave
//-----

if(GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIO29==1)
{
// EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = 3750;
if (i>60000 & iref_pu<.8)
{
    iref_pu += .1;
    i = 0;
}
ii = 0;
}

else
{
    ii = 1;
}
//-----
// Conversão A/D - Calibração
//-----

// Início da conversão A/D via software (S/W)
AdcRegs.ADCTRL2.bit.SOC_SEQ1 = 1;

// Espera o conversor ADC finalizar as conversões
while(AdcRegs.ADCST.bit.INT_SEQ1 == 0);

// Reinicialização do sequenciador do conversor A/D
AdcRegs.ADCTRL2.bit.RST_SEQ1 = 1; // Reinicia SEQ1
AdcRegs.ADCST.bit.INT_SEQ1_CLR = 1; // Limpa o flag da interrupção INT_SEQ1

// Canais utilizados
// | A0 | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 | B0 | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | B7 |
// | - | - | - | - | rot | iref | ia | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |

```

```

// Canais ajustados de forma que as medições sejam realizadas
// na sequencia AD6, AD5 e AD$

aquisicao[0] = (float)(AdcRegs.ADCRESULT0 >> 4); // ADCINA0 -> pino 2, - Corrente Iap
aquisicao[1] = (float)(AdcRegs.ADCRESULT1 >> 4); // ADCINA1 -> pino 4, - Corrente Ian
aquisicao[2] = (float)(AdcRegs.ADCRESULT2 >> 4); // ADCINA2 -> pino 6, - Corrente Ibp

//-----Variáveis em volts do AD-----
ia_volts = 0.000732421*aquisicao[0];
// iref_volts = 0.000732421*aquisicao[1];
rot_volts = 0.000732421*aquisicao[2];
//-----

//----- Variáveis em Amperes e RAD/s -----
ia_amp = ia_volts*ganho_ia;
// iref_amp = iref_volts*ganho_iref;
rot_rad = rot_volts*ganho_rot;
//-----

//----- Variáveis em PU e RPM -----
ia_pu = ia_amp/i_base;
// iref_pu = iref_amp/i_base;
rot_rpm = rot_rad/0.104716666667;
//-----

if (ii==1)
{
    iref_volts = 0.000732421*aquisicao[1];
    // iref_amp = iref_volts*ganho_iref;
    // iref_pu = iref_amp/i_base;
    iref_pu = iref_volts/ganho_iref;
}

ADCstartconv_off; //Seta a GPIO30 em 0 quando termina a conversao do AD

//filtro digital em 200Hz para a corrente
// e_ia_fil = corrente1;
// ia_fil = -0.91582435*ia_fil_2 + 1.9122088*ia_fil_1 + 0.0036155296*e_ia_fil;
// Atualiza as variáveis do filtro
// ia_fil_2 = ia_fil_1;
// ia_fil_1 = ia_fil;
// shear = .5+.5*( sin(0.0196605*i)); //seno de 62.50Hz

```

```

// Referência da corrente com sombreamento e wind shear
Tturb = iref_pu;
// Tturb = .5; //utilizado para capturar fig
// rot_rad = 10; //utilizado para capturar fig
Tshear =Tturb*(1+.2*(sin(rot_rad*i*3.27675/1000))+.4*(sin(3*rot_rad*i*3.27675/1000)));

// Correção do torque para compensação da inércia
// Tref = Tshear + (Jmotor-Jturb)*(rotacao-rotacao_1)/deltat;
// Atualiza as variáveis de correção da inercia
// rotacao_1 = rotacao;

//-----
// Ações de controle da malha de corrente
//-----
// Erro
e_iai = iref_pu - ia_pu; // erro da corrente
// e_iai = Tshear - ia_pu; // erro da corrente
// e_iai = Tshear - ia_fil; // erro da corrente

// Ação de controle - Controle da corrente interna
// u_iai = u_iai_1 + 0.1306*e_iai - 0.1305999602*e_iai_1; //PI sisotool fcz=200
u_iai = u_iai_1 + 0.0074914*e_iai - 0.0051566*e_iai_1;
// u_iai = u_iai_1 + .03*e_iai - 0.029*e_iai_1;
// u_iai = u_iai_1 + .03*e_iai;

// Limitação das ações de controle das correntes internas
if(u_iai<0) {u_iai = 0;}
if(u_iai>1) {u_iai = 1;}

// Atualiza as variáveis dos controladores
u_iai_1 = u_iai;
e_iai_1 = e_iai;

// EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = 100;
EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = 3750-3750*u_iai;

///Vizualiza variavel no PWM02
// EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = 3750-3750*Tshear;//variavel a vizualiza no pwm 02
// EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = 3750-3750*u_iai;

i++;
}
//-----

```

ANEXO F – CÓDIGO FONTE DO PROGRAMA DO MPPT

O código a seguir foi implementado em um PIC16F877A através do ambiente *mikroC*® v.5.6.

```

/*****
Nome: Controle WTE.c
Autor: Leonardo Candido Corrêa
Data: 10/01/2014
Descrição: Neste arquivo são realizadas as aquisições através do ADC e o rastreamento de máxima
potência através do hill-climb control
*****/

#define cont 14
float pwr, pold, v, i;
int duty, flag;

void main() {
    unsigned int j,k;
    TRISC = 0; // PORTC are outputs (PWM)
    TRISA = 0xFF; // PORTA is input

    ADCON1 = 0;
    PWM1_Init(10000); // Initialize PWM1 module at 10KHz
    PWM2_Init(10000); // Initialize PWM2 module at 10KHz
    PWM1_Start(); // start PWM1
    PWM2_Start(); // start PWM2
    PWM1_Set_Duty(110); // Set current duty for PWM1
    PWM2_Set_Duty(110); // Set current duty for PWM2

    duty = 15;
    pold = 0;
    flag = 1;
    pwr = 0;

    for(;;){
        for(k=0;k<cont;k++){
            v = Adc_Read(0);

```



```
    Delay_ms(5);
    i = Adc_Read(1);
    Delay_ms(5);
    pwr += v*i;
}
pwr=pwr/cont;

    //v = ADC_Read(0);
    //Delay_ms(5);
    // i = ADC_Read(1);
    //Delay_ms(5);
    //pwr += v*i;

if((pwr<pold) || (duty<=0) || (duty>=255)){
    flag=-flag;
}
pold= pwr;
duty+=flag;
pwr=0;

//PWM1_Set_Duty(duty);    // Set current duty for PWM1
// PWM1_Set_Duty(120);    // Set current duty for PWM1
//Delay_ms(20);
PWM2_Set_Duty(duty);    // Set current duty for PWM2
//PWM2_Set_Duty(150);    // Set current duty for PWM2
//Delay_ms(20);

//Delay_ms(5);
/*for(j=0;j<10;j++){
    PWM1_Set_Duty(255-20*j);    // Set current duty for PWM1
    PWM2_Set_Duty(55+20*j);    // Set current duty for PWM2
    Delay_ms(1000);
} */
}
}
```