Luis Antonio Parra

SISTEMA DE CONTROLE COM COMPENSAÇÃO DE TEMPO MORTO APLICADO À GERAÇÃO DE VENTO EM TANQUE DE PROVA

São Paulo

2013

Luis Antonio Parra

SISTEMA DE CONTROLE COM COMPENSAÇÃO DE TEMPO MORTO APLICADO À GERAÇÃO DE VENTO EM TANQUE DE PROVA

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração:
Engenharia de Controle e Automação Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Eduardo Aoun Tannuri

São Paulo

2013

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 05 de dezembro de 2013.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Parra, Luis Antonio
Sistema de controle com compensação de tempo morto Aplicado à geração de vento em tanque de prova / L.A. Parra. -- versão corr. -- São Paulo, 2013.
179 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1.Sistemas de controle 2.Identificação de sistemas 3.Sistema de primeira ordem com tempo morto 4.Vento (Geração) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II.t.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Roberto e Emilia, pela dedicação à minha formação escolar.

Ao meu irmão Roberto, minha cunhada Nanci e aos meus sobrinhos Luis e Rafael, pelo incentivo e confiança ao longo de minha vida.

À Margarida pelo apoio nos momentos necessários.

À minha companheira Silvia, pela paciência e compreensão nessa trajetória.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Eduardo Aoun Tannuri, pela oportunidade, incentivo, orientação e respeito na realização deste trabalho.

Aos professores e funcionários da Escola Politécnica da USP e ao Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, pelo auxílio e utilização do tanque de provas com seus recursos disponíveis para a pesquisa.

Aos colegas de trabalho que me incentivaram, Percy, Paulo Rocha, Giancarlo, Regiane, Andre Tosin, Goes, Wanderley Marinho, Shiniti, Daniel, José Roberto e todos os demais.

Ao engenheiro Eduardo Matsuda, pelo apoio ao meu estudo, e ao engenheiro Flavio Horino, pela ajuda durante parte de meu trabalho de mestrado.

À Emgepron e ao Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo, pelo suporte necessário ao meu crescimento pessoal, profissional e acadêmico.

A todos aqueles que de alguma forma colaboraram para a elaboração deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema de controle com compensação de tempo morto aplicado a um ventilador para simular os efeitos do vento em modelos de embarcações. O sistema é instalado no tanque de provas do Departamento de Engenharia Naval da Escola Politécnica da USP. Um sistema de controle baseado em computador é elaborado para a realização dos testes e validação, procedendo-se inicialmente a identificação do sistema a ser controlado. Na malha de controle, o sinal de referência é a velocidade do vento desejada em uma distância pré-definida do ventilador e pode ser tanto um valor constante (representando um vento constante) ou um valor variante no tempo (representando uma rajada de vento). O sistema atuador consiste de um inversor de frequência que aciona o ventilador e a velocidade do vento é medida por um anemômetro, cujo sinal é usado como realimentação para o controlador. A sintonia da malha é realizada pelo método do modelo interno (IMC) e o efeito do tempo morto é observado nos testes, aplicando-se o compensador baseado no Preditor de Smith para minimizá-lo. Pelos resultados dos ensaios, conclui-se que o Preditor de Smith melhora o desempenho do sistema de geração de vento.

Palavras-Chave: Sistema de primeira ordem com tempo morto, geração de vento, espectros de vento, controle de ventilador, Preditor de Smith.

ABSTRACT

This paper describes the development of a control system with dead time compensation applied to a fan to simulate wind effects in models of vessels. The system is installed on the academic towing tank of the Naval Architecture and Oceanic Engineering Department of the University of São Paulo. A control system based on computer is designed for testing and validation, proceeding initially to identify the system to be controlled. In the control loop, the set-point is the desired speed of the wind on a pre-defined distance from the fan and it can be either a constant value (representing a constant wind) or a time-varying value (representing a wind gust). The actuator system consists of a frequency-inverter that drives the fan and the wind speed is measured by an anemometer, whose signal is used as feedback to the controller. The tuning of the controller is made by the internal model control (IMC) and the effect of dead time is observed in the tests, applying the compensator based on Smith Predictor to minimize it. Through the results from the tests, it was concluded that the Smith Predictor improves the performance of the wind generation system.

Keywords: First order plus dead time system, wind generation, wind spectra, fan control, Smith Predictor.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Simulação com ventiladores fixados no modelo (OCIMF, 1981)..... 19
Figura 2: Simulação com molas montadas no modelo (Brown e Liu, 1998)..... 19
Figura 3: Simulação com ventiladores em tanque de prova..... 20
Figura 4: Diagrama do controle de nível de um tanque (IJERA, 2011) 24
Figura 5: Trocador de calor do reator (Machado, 2004)..... 25
Figura 6: Ensaio com banco de ventiladores em tanque (MARINTEK, 2012).. 26
Figura 7: Tanque para ensaio de ondas e ventos (LabOceano, 2008) 26
Figura 8: Ensaio em túnel de vento (MARIN, 2003)..... 27
Figura 9: Túnel de vento do IPT-SP (IPT, 2013) 27
Figura 10: Diagrama esquemático de teste em túnel de vento (IITK, 2011)..... 29
Figura 11: Diagrama de blocos de teste em túnel (adaptado de IITK, 2011) ... 29
Figura 12: Túnel de vento de três seções (NPU, 2009) 30
Figura 13: Diagrama do controle de velocidade no túnel (NPU, 2009) 31
Figura 14: Representação do controle em um sistema 32
Figura 15: Representação de um sistema S 33
Figura 16: Resposta ao degrau de um sistema de 1ª ordem 34
Figura 17: Resposta ao degrau de um sistema de 1ª ordem com atraso..... 35
Figura 18: Resposta de um sistema de 1ª ordem com atraso (Ogata, 2010)... 36
Figura 19: Identificação dos parâmetros pela curva de resposta do sistema... 37
Figura 20: Estrutura de um controlador PID clássico 40
Figura 21: Estrutura de malha do controlador IMC..... 41
Figura 22: Estrutura equivalente do controlador IMC 41
Figura 23: Sistema de controle em malha fechada 45
Figura 24: Gráfico do ganho do controlador em função do tempo morto 48
Figura 25: Resposta ao degrau - sistema sem tempo morto e K_p=2 49
Figura 26: Diagrama de Bode - sistema sem tempo morto e K_p=2 49
Figura 27: Resposta ao degrau - sistema com tempo morto de 0,5 s e K_p=2 .. 50
Figura 28: Diagrama de Bode - sistema com tempo morto de 0,5 s e K_p=2..... 50
Figura 29: Resposta ao degrau - sistema com tempo morto de 1,0 s e K_p=2 .. 51
Figura 30: Diagrama de Bode - sistema com tempo morto de 1,0 s e K_p=2..... 51
Figura 31: Resposta ao degrau - sistema com tempo morto de 2,0 s e K_p=2 .. 52
Figura 32: Diagrama de Bode - sistema com tempo morto de 2,0 s e K_p=2..... 52
Figura 33: Resposta ao degrau - sistema com tempo morto de 2,0 s e K_p=0,1 53

Figura 34: Diagrama de Bode - sistema com tempo morto de 2,0 s e K_p=0,1.. 53
Figura 35: Malha de controle com Preditor de Smith 55
Figura 36: Bloco $G_c(s)$ referente ao controle PID mais Preditor de Smith 55
Figura 37: Controlador $G_c(s)$ atuando no sistema com tempo morto 56
Figura 38: Sistema resultante quando o modelo for igual ao sistema real 57
Figura 39: Resposta do sistema com tempo morto com o Preditor de Smith... 58
Figura 40: Ventilador no centro do tanque com sensor para medição 60
Figura 41: Anemômetro utilizado no ensaio 61
Figura 42: Ventilador acoplado à estrutura tipo colmeia..... 61
Figura 43: Inversores de frequência utilizados, #1 (esquerda) e #2 (direita).... 62
Figura 44: Resistor de frenagem usado no inversor #2..... 62
Figura 45: Placa DAQ e conversor 5/10 VDC 63
Figura 46: Conversor USB/RS422 63
Figura 47: Blocos de envio e aquisição de sinais pelo computador 64
Figura 48: Diagrama geral do sistema montado para ensaio..... 66
Figura 49: Montagem dos dispositivos para ensaio 67
Figura 50: Alinhamento do sensor com o ventilador 68
Figura 51: Posicionamento do sensor ao longo do tanque..... 69
Figura 52: Perfil frontal de vento obtido ao longo do tanque de prova 70
Figura 53: Velocidade do vento a partir do centro do ventilador 71
Figura 54: Ponto na hélice onde a velocidade do vento é máxima 71
Figura 55: Tensão x Velocidade do vento para cada distância do ventilador... 72
Figura 56: Sinal degrau de 5 V, D=5 cm 73
Figura 57: Sinal degrau de 5 V, D=2,0 m 75
Figura 58: Sinal degrau de 4 V, D=5 cm (Utilizando inversor #1)..... 76
Figura 59: Diagrama de Bode considerando D=5 cm..... 78
Figura 60: Diagrama de Bode considerando D=0,5 m 79
Figura 61: Diagrama de Bode considerando D=1,0 m 80
Figura 62: Diagrama de Bode considerando D=1,5 m 81
Figura 63: Diagrama de Bode considerando D=2,0 m 82
Figura 64: Ganho em função do degrau de tensão aplicado..... 84
Figura 65: Ganho em função da distância do ventilador 84
Figura 66: Constante de tempo de subida τ em função da tensão aplicada 85
Figura 67: Constante de tempo de subida τ em função da distância 85
Figura 68: Atraso de subida θ em função do degrau de tensão aplicado..... 87

Figura 69: Atraso de subida θ em função da distância do ventilador 87
Figura 70: Constante de tempo de descida τ_d em função da tensão..... 89
Figura 71: Constante de tempo de descida τ_d em função da distância 89
Figura 72: Atraso de descida θ_d em função do degrau de tensão aplicado..... 91
Figura 73: Atraso de descida θ_d em função da distância do ventilador 91
Figura 74: Modelo obtido pelos ensaios de identificação do sistema..... 93
Figura 75: Comparação do modelo para a distância de 5 cm 94
Figura 76: Comparação do modelo para a distância de 2,0 m 95
Figura 77: Comparação do modelo para degrau aplicado de 2 V 95
Figura 78: Comparação do modelo para degrau aplicado de 5 V 96
Figura 79: Comparação do modelo para senóide de período 2 s, D=5 cm. 96
Figura 80: Comparação do modelo para senóide de período 10 s, D=5 cm 97
Figura 81: Comparação do modelo para senóide de período 10 s, D=1,0 m .. 97
Figura 82: Comparação do diagrama de Bode considerando D=5,0 cm..... 98
Figura 83: Comparação do diagrama de Bode considerando D=0,5 m..... 98
Figura 84: Comparação do diagrama de Bode considerando D=1,0 m..... 99
Figura 85: Comparação do diagrama de Bode considerando D=1,5 m..... 99
Figura 86: Comparação do diagrama de Bode considerando D=2,0 m..... 100
Figura 87: Comparação do dente de serra de período 2 s, D=5 cm..... 100
Figura 88: Comparação do dente de serra de período 10 s, D=5 cm..... 101
Figura 89: Comparação do dente de serra de período 10 s, D=1,0 m 101
Figura 90: Controle aplicado no sistema real e no modelo para D=5 cm..... 103
Figura 91: Controle aplicado no sistema real e no modelo para D=1,0 m..... 103
Figura 92: Simulação para sinais tipo degrau até 10 V, D=5,0 cm..... 104
Figura 93: Simulação para sinais tipo degrau até 10 V, D=1,0 m..... 104
Figura 94: Controle sem e com o uso do Preditor para D=5 cm 106
Figura 95: Características de desempenho para D=5 cm 106
Figura 96: Controle sem e com Preditor para D=1,5 m 107
Figura 97: Características de desempenho para D=1,5 m 107
Figura 98: Resultado para sinais tipo degrau até 10 V, D=5,0 cm 108
Figura 99: Resultado para sinais tipo degrau até 10 V, D=1,5 m 108
Figura 100: Resposta ao sinal do tipo *chirp* a 5 cm do ventilador 109
Figura 101: Série temporal de vento de Ochi & Shin 110
Figura 102: Comparação da série de Ochi & Shin para D=5 cm..... 111
Figura 103: Comparação da série de Ochi & Shin para D=20,0 cm..... 112

Figura 104: Comparação da série de Ochi & Shin para D=1,5 m..... 113
Figura 105: Diagrama elétrico do conversor 5/10 VDC 120
Figura 106: Sinal degrau de 2 e 3 V, D=5,0 cm 121
Figura 107: Sinal degrau de 4 e 5 V, D=5,0 cm 122
Figura 108: Sinal degrau de 2 e 3 V, D=0,5 m 123
Figura 109: Sinal degrau de 4 e 5 V, D=0,5 m 124
Figura 110: Sinal degrau de 2 e 3 V, D=1,0 m 125
Figura 111: Sinal degrau de 4 e 5 V, D=1,0 m 126
Figura 112: Sinal degrau de 2 e 3 V, D=1,5 m 127
Figura 113: Sinal degrau de 4 e 5 V, D=1,5 m 128
Figura 114: Sinal degrau de 2 e 3 V, D=2,0 m 129
Figura 115: Sinal degrau de 4 e 5 V, D=2,0 m 130
Figura 116: Sinal degrau de 2 e 3 V, D=5,0 cm 136
Figura 117: Sinal degrau de 4 e 5 V, D=5,0 cm 137
Figura 118: Sinal degrau de 2 e 3 V, D=0,5 m 138
Figura 119: Sinal degrau de 4 e 5 V, D=0,5 m 139
Figura 120: Sinal degrau de 2 e 3 V, D=1,0 m 140
Figura 121: Sinal degrau de 4 e 5 V, D=1,0 m 141
Figura 122: Sinal degrau de 2 e 3 V, D=1,5 m 142
Figura 123: Sinal degrau de 4 e 5 V, D=1,5 m 143
Figura 124: Sinal degrau de 2 e 3 V, D=2,0 m 144
Figura 125: Sinal degrau de 4 e 5 V, D=2,0 m 145
Figura 126: Sinal senoidal de período 2 e 10 s, D=5 cm..... 146
Figura 127: Sinal senoidal de período 2 e 10 s, D=0,5 m..... 147
Figura 128: Sinal senoidal de período 2 e 10 s, D=1,0 m..... 148
Figura 129: Sinal senoidal de período 2 e 10 s, D=1,5 m..... 149
Figura 130: Sinal senoidal de período 2 e 10 s, D=2,0 m..... 150
Figura 131: Sinal dente de serra de período 2 e 10 s, D=5 cm..... 151
Figura 132: Sinal dente de serra de período 2 e 10 s, D=0,5 m..... 152
Figura 133: Sinal dente de serra de período 2 e 10 s, D=1,0 m..... 153
Figura 134: Sinal dente de serra de período 2 e 10 s, D=1,5 m..... 154
Figura 135: Sinal dente de serra de período 2 e 10 s, D=2,0 m..... 155
Figura 136: Sinais tipo degrau até 10 V, D=5,0 cm..... 156
Figura 137: Sinais tipo degrau até 8 V, D=20,0 cm..... 157
Figura 138: Sinais tipo degrau até 6 V, D=0,5 m..... 158

Figura 139: Sinais tipo degrau até 6 V, D=1,0 m..... 159
Figura 140: Sinais tipo degrau até 6 V, D=1,5 m..... 160
Figura 141: Sinais tipo degrau até 6 V, D=2,0 m..... 161
Figura 142: Sinais tipo degrau até 10 V, D=5,0 cm..... 162
Figura 143: Sinais tipo *chirp*, D=5,0 cm..... 163
Figura 144: Série de Ochi & Shin, D=5,0 cm..... 164
Figura 145: Sinais tipo degrau até 8 V, D=20,0 cm..... 165
Figura 146: Sinais tipo *chirp*, D=20,0 cm..... 166
Figura 147: Série de Ochi & Shin, D=20,0 cm..... 167
Figura 148: Sinais tipo degrau até 6 V, D=0,5 m..... 168
Figura 149: Sinais tipo *chirp*, D=0,5 m 169
Figura 150: Série de Ochi & Shin, D=0,5 m 170
Figura 151: Sinais tipo degrau até 6 V, D=1,0 m..... 171
Figura 152: Sinais tipo *chirp*, D=1,0 m. 172
Figura 153: Série de Ochi & Shin, D=1,0 m 173
Figura 154: Sinais tipo degrau até 6 V, D=1,5 m..... 174
Figura 155: Sinais tipo *chirp*, D=1,5 m 175
Figura 156: Série de Ochi & Shin, D=1,5 m 176
Figura 157: Sinais tipo degrau até 6 V, D=2,0 m..... 177
Figura 158: Sinais tipo *chirp*, D=2,0 m 178
Figura 159: Série de Ochi & Shin, D=2,0 m 179

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Sintonia do controle PID para sistema com tempo morto..... 44
Tabela 2: Parâmetros médios da curva de resposta para cada distância..... 92
Tabela 3: Parâmetros considerados no modelo para cada distância..... 92
Tabela 4: Parâmetros do controlador sem a utilização do Preditor de Smith. 102
Tabela 5: Parâmetros do controlador com a utilização do Preditor de Smith. 105
Tabela 6: Parâmetros da curva de resposta para a distância de 5,0 cm..... 131
Tabela 7: Parâmetros da curva de resposta para a distância de 0,5 m 132
Tabela 8: Parâmetros da curva de resposta para a distância de 1,0 m 133
Tabela 9: Parâmetros da curva de resposta para a distância de 1,5 m 134
Tabela 10: Parâmetros da curva de resposta para a distância de 2,0 m..... 135

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	*Alternating Current*
BIBO	*Bounded Input - Bounded Output*
DAQ	*Data Acquisition*
DC	*Direct Current*
DPT	*Differential Pressure Transmitter*
FOPDT	*First Order Plus Dead Time*
IAE	*Integral Absolute Error*
IMC	*Internal Model Control*
ITAE	*Integral Time Absolute Error*
IPC	*Industrial Personal Computer*
IPT	Instituto de Pesquisa Tecnológica
IITK	*Indian Institute of Technology Kanpur*
ITTC	*International Towing Tank Conference*
LABOCEANO	Laboratório de Tecnologia Oceânica
MARIN	*Maritime Research Institute of Netherlands*
MARINTEK	*Norwegian Marine Technology Research Institute*
MATLAB	*Software* de Simulação Numérica
NPU	*Northwestern Polytechnical University*
OCIMF	*Oil Companies International Maritime Forum*
PCI	*Peripheral Component Interconnect*
PID	Proporcional Integral Derivativo
PPT	*Precision Pressure Transmitter*
PSDNN	*Proportional Sum and Differential Neural Network*
PXI	*PCI Extension for Instrumentation*
PV	*Process Variable*
SIMULINK	Ferramenta de Simulação de Sistemas Dinâmicos
SP	*Set-Point*
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USB	*Universal Serial Bus*
USP	Universidade de São Paulo
V/F	Controle Escalar de Velocidade do Motor Elétrico
VVW	Controle Vetorial de Velocidade do Motor Elétrico

LISTA DE SÍMBOLOS

S	Sistema
x(t)	Sinal de entrada do sistema
y(t)	Sinal de saída do sistema
K	Ganho estático do sistema
τ	Constante de tempo do sistema
dy(t)	Derivada temporal de y
dt	Derivada temporal
t	Tempo
X(s)	Transformada de Laplace de x(t)
Y(s)	Transformada de Laplace de y(t)
$\mathcal{L}^{-1}\{\cdot\}$	Transformada inversa de Laplace
$Y_2(t)$	Sinal de saída 2 do sistema
θ	Atraso de transporte ou tempo morto do sistema
$Y_2(s)$	Transformada de Laplace de $y_2(t)$
∞	Infinito
∫	Integral
j	Corresponde a $\sqrt{-1}$
ω	Frequência em rad/s
U	Amplitude do sinal tipo degrau aplicado no sistema
V	Amplitude da resposta do sistema
t_1	Instante de tempo 1
t_2	Instante de tempo 2
K_p	Ganho proporcional do controle PID
T_i	Tempo integral do controle PID
T_d	Tempo derivativo do controle PID
u	Sinal de controle aplicado no sistema
G(s)	Função de transferência do sistema
$G_c(s)$	Função de transferência do controlador
$G_c^*(s)$	Função de transferência do controlador IMC
$\tilde{G}(s)$	Função de transferência do modelo do sistema
λ	Parâmetro de sintonia do IMC
H(s)	Função de transferência do sensor

P_i	Pontos de análise no gráfico (i = 1,2,...)
$\tilde{\theta}$	Atraso estimado do sistema
S(f)	Densidade espectral de energia
f	Frequência em Hz
S(f*)	Densidade espectral de energia adimensional
f*	Frequência adimensional
u*	Velocidade adimensional de cisalhamento do vento
$\bar{U}_z$	Velocidade média do vento a uma altura z
z	Altura acima do nível do mar
D	Distância entre o sensor e o ventilador
R	Raio da hélice do ventilador
$U_{entrada}$	Tensão de entrada
$V_{saída}$	Velocidade de saída do vento
θ_d	Atraso de descida do sistema
τ_d	Constante de tempo de descida do sistema
$\Delta\tau$	Variação da constante de tempo do sistema
$\Delta\theta$	Variação do atraso do sistema
$\bar{K}$	Valor médio do ganho do sistema
$\bar{\tau}$	Valor médio da constante de tempo do sistema
$\bar{\theta}$	Valor médio do atraso do sistema
tr	Tempo de subida
ts	Tempo de estabilização
M_p	Sobressinal
α	Fator de escala de conversão
V_{ref}	Velocidade de referência na entrada da malha
T_{ref}	Tempo de referência na entrada da malha
AI_i	Entradas analógicas do inversor de frequência (i = 1,2,...)
DI_i	Entradas digitais do inversor de frequência (i = 1, 2,...)
R_offset	Valor de resistência de ajuste de *offset* do conversor de tensão
R1, R2	Valores de resistência do conversor de tensão
bps	Bits por segundo - taxa de transmissão de dados

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES 7

LISTA DE TABELAS 12

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS 13

LISTA DE SÍMBOLOS 14

1. INTRODUÇÃO 18

1.1 Considerações Gerais **18**

1.2 Objetivo **20**

1.3 Justificativa **20**

1.4 Metodologia **21**

1.5 Organização do Trabalho **21**

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 23

2.1 Técnicas de controle em sistemas com tempo morto **23**

2.2 Tanques e túneis para ensaios de modelos **26**

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS 32

3.1 Modelagem Matemática **32**

3.2 Sistema de Primeira Ordem **33**

3.3 Identificação de Sistema de Primeira Ordem mais Atraso **37**

3.4 Controlador PID **40**

3.5 Sintonia Baseada no Método do Modelo Interno **40**

3.6 Efeito do Tempo Morto na Estabilidade da Malha de Controle **45**

3.7 Preditor de Smith **55**

3.8 Espectros de Velocidade de Vento **59**

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS 60

4.1 Arranjo Experimental **60**

4.1.1 Sensor 61

4.1.2 Ventilador 61

4.1.3 Inversor de Frequência 62

4.1.4 Resistor de Frenagem 62
4.1.5 Sistema de Envio e Aquisição de Dados 63
4.1.6 Programa de Envio e Aquisição de Dados 64
4.1.7 Aparato Geral 65
4.2 Procedimento de Ensaio..... 68
4.2.1 Alinhamento do Sensor com o Ventilador..... 68
4.2.2 Mapeamento do Campo de Velocidade do Vento 69
4.3 Descrição dos Ensaios de Identificação do sistema 73
4.3.1 Ensaios de Resposta ao Sinal Degrau 73
4.3.2 Ensaios de Obtenção da Resposta em Frequência..... 77
5. IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA..... 83
5.1 Sistema de Primeira Ordem mais Atraso 83
5.2 Modelo Final do Sistema 92
6. VALIDAÇÃO DO MODELO..... 94
7. ELABORAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE 102
8. CONCLUSÕES..... 114
8.1 Sugestão de Trabalhos Futuros..... 115
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 116
ANEXO 2 – RESULTADO DOS ENSAIOS DE IDENTIFICAÇÃO..... 121
ANEXO 3 – VALIDAÇÃO DO MODELO 136
ANEXO 4 – CONTROLE DO SISTEMA X CONTROLE DO MODELO SEM O USO DO PREDITOR DE SMITH..... 156
ANEXO 5 – CONTROLE SEM O USO DO PREDITOR DE SMITH X CONTROLE COM O USO DO PREDITOR DE SMITH..... 162

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

O vento é o deslocamento de massas de ar devido à diferença de pressão atmosférica entre duas regiões distintas e tem origem térmica. As regiões tropicais do planeta recebem os raios solares quase perpendicularmente e são mais aquecidas do que as polares, consequentemente, o ar quente que se encontra nas baixas altitudes das regiões tropicais tende a subir, sendo substituído por uma massa de ar frio que se desloca das regiões polares.

As estruturas oceânicas (navios e plataformas) são sujeitas à ação dos agentes ambientais, incluindo o vento. Estes induzem forças e deslocamentos que devem ser suportados pelos sistemas de ancoragem, posicionamento ou navegação. Logo, utilizam-se modelagem, simulação numérica e também experimentos em modelos reduzidos para analisar a ação destes agentes ambientais sobre as estruturas, que podem vir a provocar danos estruturais, distúrbios de operação ou falhas de navegação.

Este trabalho irá abordar a geração de vento em tanque de provas através de um sistema de ventiladores controlados e direcionados ao modelo em escala reduzida do navio ou plataforma em análise.

Para a simulação de esforços e momentos devido ao vento em modelos de embarcações dispõe-se de três formas. Em OCIMF (1981) é descrito um sistema que simula a ação do vento em uma embarcação empregando três pequenos ventiladores instalados no convés do modelo (Figura 1). Um deles é montado na proa e outro na popa, para proverem força perpendicular à embarcação (permitindo gerar uma força lateral e momento de guinada) e um terceiro montado no centro do modelo (gerando uma força longitudinal). O controle dos ventiladores é realizado por um microprocessador e um giroscópio é instalado a bordo para indicar os ângulos dos deslocamentos devidos aos esforços e momentos aplicados.

Figura 1: Simulação com ventiladores fixados no modelo (OCIMF, 1981)

Outro procedimento de ensaio, proposto por Brown e Liu (1998), consiste num conjunto de molas montadas no convés do modelo (Figura 2) para simular esforços horizontais devido ao vento. Este sistema pode ser aplicado no modelo de uma plataforma ancorada do tipo *turret.*

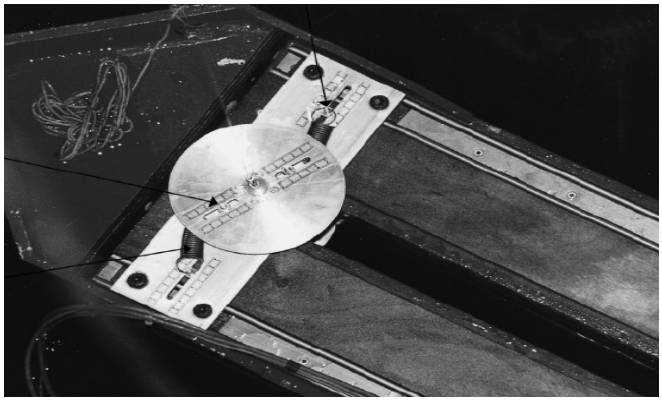


Figura 2: Simulação com molas montadas no modelo (Brown e Liu, 1998)

O procedimento de simulação de vento em embarcações mais comum é o uso de um conjunto de ventiladores em tanque e foi o escolhido neste trabalho. No laboratório do Departamento de Engenharia Naval da Escola Politécnica da USP há um conjunto de sete ventiladores (Figura 3) dispostos horizontalmente no tanque de provas. Esse conjunto de ventiladores desloca-se ao longo do tanque, permitindo aproximar-se ou distanciar-se do modelo e também há o movimento vertical para ajustar a altura. Um inversor de frequência aciona os ventiladores e o vento gerado é medido por um sensor.

Figura 3: Simulação com ventiladores em tanque de prova

1.2 Objetivo

O objetivo do trabalho é elaborar um sistema de controle com compensação de tempo morto aplicado a um ventilador destinado a reproduzir velocidades de vento pré-definidas em um tanque de provas. Utilizar como sinal de referência (*set-point*) nesse sistema, valores estáticos (simulando um vento constante) ou variantes no tempo (simulando rajadas de vento).

1.3 Justificativa

Devido à distância entre o modelo e o ventilador e ao atraso do deslocamento de ar, há um tempo morto entre a atuação e o sensoriamento. Este tempo morto causa problemas na sintonia da malha de controle, podendo levar à instabilidade ou perda de desempenho. Para isso, deve-se desenvolver um algoritmo de compensação do mesmo, que garantirá melhor desempenho da malha de controle de velocidade.

De forma mais ampla, a justificativa para o estudo de um controle mais preciso de velocidade de vento em um tanque de provas embasa-se na possibilidade de simularem-se os efeitos de ventos constantes ou em rajadas em modelos de escala reduzida de embarcações, com maior precisão.

1.4 Metodologia

O passo inicial do trabalho de desenvolvimento de um controle de velocidade de vento é a identificação do sistema. Esta identificação é realizada pelo ensaio em malha aberta, através do envio de sinais de comando ao acionamento do ventilador e leitura da resposta obtida pelo sensor de vento. A seguir realiza-se a modelagem do sistema, que consiste na obtenção dos parâmetros e da sua função de transferência, posteriormente validados por outros testes em malha aberta.

Em seguida, é elaborada a malha de controle do sistema, com o projeto do controlador, realização da sua sintonia e da implantação do compensador de tempo morto.

Por fim, é feita a comparação entre o sistema sem o compensador e com o compensador de tempo morto, para verificar se há vantagem na sua utilização.

Com o sistema final, será analisada a viabilidade da utilização deste tipo de sistema para o controle do vento a ser aplicado em um tanque de provas, considerando-se valores estáticos ou rajadas.

1.5 Organização do Trabalho

No capítulo 2 discute-se a revisão bibliográfica dos itens contemplados neste trabalho. São mostradas algumas aplicações de controle de sistemas com tempo morto, em alguns casos utilizando-se o Preditor de Smith. É mostrada a utilização de túnel de vento e tanque de prova de alguns institutos de pesquisa em engenharia oceânica. Alguns trabalhos descrevem as soluções em termos de automação e controle adotadas para a geração de vento.

No capítulo 3 são mostrados os fundamentos teóricos sobre modelagem matemática, metodologia para identificação de sistemas, sistema de primeira ordem mais atraso e sua identificação através da curva de resposta. É mostrado o controlador PID e sua sintonia pelo método do modelo interno (IMC). Por meio de um exemplo é observado o efeito do atraso de transporte na malha de controle e a utilização do compensador de Smith para minimizá-lo.

No capítulo 4 é feita a descrição dos experimentos de identificação do sistema, mostrando o arranjo experimental, o procedimento de ensaio e os ensaios de identificação com a aplicação do sinal tipo degrau.

No capítulo 5 é feita a identificação do sistema através dos parâmetros obtidos nos ensaios de verificação da curva de resposta. Avalia-se a variação dos parâmetros do sistema em função da tensão aplicada e da distância do ventilador. Em seguida, é elaborado o modelo do sistema através dos parâmetros obtidos nos ensaios e de algumas aproximações feitas para simplificar esse modelo.

No capítulo 6 é feita a validação do modelo proposto. É realizada a sua simulação comparando com os resultados experimentais referentes às entradas distintas das que foram utilizadas na fase de identificação.

No capítulo 7 é apresentado o controle PID com sintonia feita pelo método do controle interno (IMC). São realizados ensaios com esse controlador. Em seguida é implantado nesse controle o Preditor de Smith para compensar o tempo morto do sistema. São realizados ensaios e comparados com os obtidos pelo controlador sem o uso do Preditor.

Por fim, no capítulo 8, apresentam-se as conclusões e sugestões de continuidade do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Técnicas de controle em sistemas com tempo morto

O tempo morto está presente em grande parte dos processos na indústria e também em outros tipos de sistemas, como biológicos, econômicos e sociais. Ele pode ser causado por alguns dos seguintes fenômenos:

- O atraso de transporte de massa, energia ou informação de um ponto a outro;

- O acúmulo de latências de diversos sistemas conectados em série;

- O tempo requerido para o processamento de sinais em sensores, analisadores ou mesmo o tempo despendido por controladores para executarem um complexo algoritmo de controle.

O tempo morto diminui a margem de fase e de ganho da função de transferência de um sistema, tornando-se mais difícil a elaboração do seu controle e afetando o seu desempenho, podendo levá-lo a instabilidade. Como exemplos de sistemas que apresentam tempo morto há aqueles com transmissões hidráulicas, pneumáticas ou mecânicas.

Uma solução para o problema de sistemas com tempo morto foi proposta por Otto Smith em 1957 e foi denominada posteriormente como Preditor de Smith. Nesta estratégia, coloca-se o modelo do processo no sistema de controle em malha fechada. Mesmo havendo erro de modelagem, consegue-se diminuir o efeito do tempo morto e melhorar o desempenho do sistema.

São mostradas a seguir algumas referências que aplicaram técnicas de controle em sistemas com tempo morto. Foram usados alguns artifícios como a aproximação da curva de resposta para um sistema de primeira ordem com tempo morto, utilizando-se os parâmetros obtidos para sintonizar um controlador PID pelo método de Ziegler-Nichols. Em seguida aplicou-se o controle baseado na lógica *fuzzy*, fazendo-se a comparação entre eles.

Outra técnica utilizada foi o da sintonia do controlador PID pelo método de Cohen-Coon combinada com o Preditor de Smith para minimizar os efeitos do tempo morto.

Em Sakthivel, Anandhi e Natarajan (2011) é estudado um controle de nível em um tanque esférico (Figura 4), no laboratório da *Annamalai University*, na Índia.

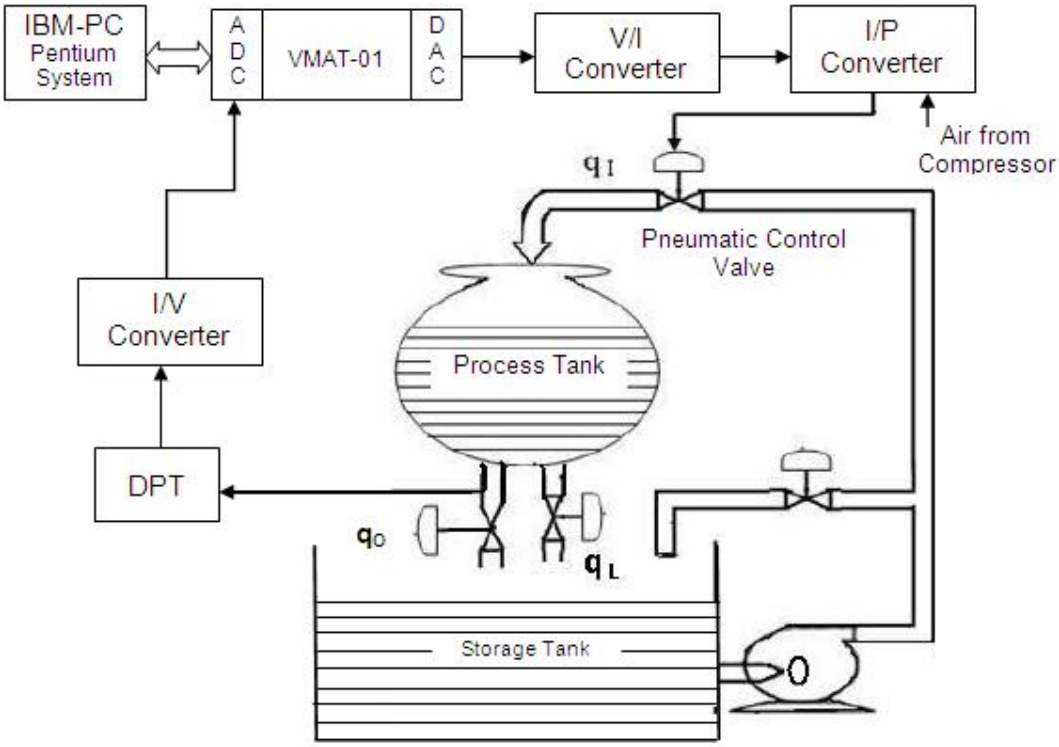


Figura 4: Diagrama do controle de nível de um tanque (IJERA, 2011)

Um computador com um *software* de simulação numérica envia dados para uma placa de aquisição de dados, cuja saída é convertida em sinal de pressão que movimenta uma válvula pneumática para controle da vazão de entrada de água no tanque de processo. A água chega ao tanque de processo através de uma bomba que a retira de um tanque de armazenagem. O nível de água no tanque de processo é medido por um transmissor de pressão diferencial (DPT), sendo recebido pelo computador e tratado pelo algoritmo de controle.

Projetou-se um controle PI sintonizado pelo método de Ziegler-Nichols, utilizando os parâmetros do modelo, aproximado para um sistema de primeira ordem com atraso. A seguir elaborou-se um controle baseado na lógica *fuzzy*. Aplicaram-se os dois modos de controle e obtiveram as curvas de resposta.

Observou-se que a aplicação da lógica *fuzzy* no controle de um sistema não linear fez com que a resposta do sistema fosse mais suave em relação à obtida somente pelo controlador PI clássico, havendo melhoria nos tempos de subida e estabilização, além de diminuição do sobressinal.

Em Machado (2004), o objetivo do trabalho é melhorar a resposta do sistema de controle perante perturbações, quando este possui tempo morto elevado, como é o caso de processos na indústria de petróleo e gás. Para isso foi utilizado o Preditor de Smith acoplado a um controlador PID aplicando-o num reator de polimerização no laboratório do departamento de engenharia química e engenharia de alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Neste reator, o tempo morto de deve ao trocador de calor existente (Figura 5).

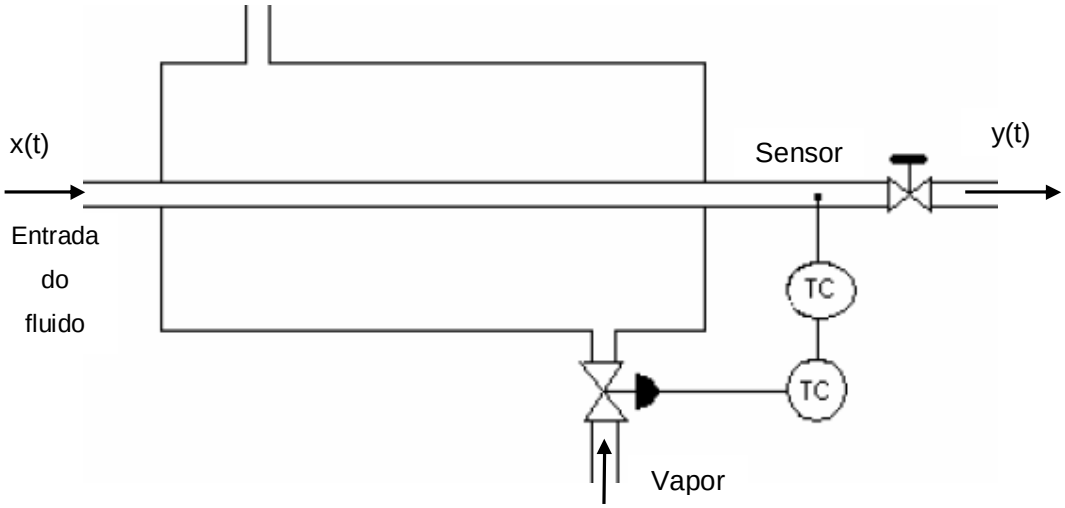


Figura 5: Trocador de calor do reator (Machado, 2004)

Admitindo-se que a válvula de vapor esteja fechada, pode-se dizer que a temperatura de entrada do fluido é igual à temperatura de saída. No momento que a válvula de vapor é aberta, acontece uma perturbação tipo degrau no sistema. Essa perturbação só vai ser percebida pelo sensor de temperatura posicionado a certa distância do trocador de calor, após um determinado tempo θ, que é o tempo morto ou atraso de transporte do processo. Assim, observa-se que esse atraso é função do posicionamento do sensor no sistema.

Realizou-se a identificação do sistema através da perturbação das válvulas de aquecimento e resfriamento, constatando que se trata de um sistema de primeira ordem com tempo morto. Foi projetado um controlador PI utilizando o método de Cohen-Coon para obter a melhor sintonia.

Introduziu-se uma série de perturbações no sistema, comparando as respostas obtidas pelo controlador PI sem e com o Preditor de Smith acoplado. Analisando as curvas obtidas pela aplicação de sinal degrau de temperatura, o autor concluiu que o Preditor de Smith promoveu uma melhor resposta à perturbação e também forneceu à válvula, uma ação mais robusta.

2.2 Tanques e túneis para ensaios de modelos

No campo da pesquisa e desenvolvimento em engenharia oceânica é fundamental a implantação de tanques de prova para a realização de ensaios de modelos de embarcações e estruturas, sob a ação de ondas, correntes e ventos.

Para a avaliação de esforços aerodinâmicos, são instalados bancos de ventiladores nos tanques ou construídos túneis de vento dependendo do tipo de aplicação.

Dentre alguns institutos que utilizam banco de ventiladores há o *Norwegian Marine Technology Research Institute – MARINTEK,* da Noruega (Figura 6) e o tanque oceânico do LabOceano da UFRJ (Figura 7).

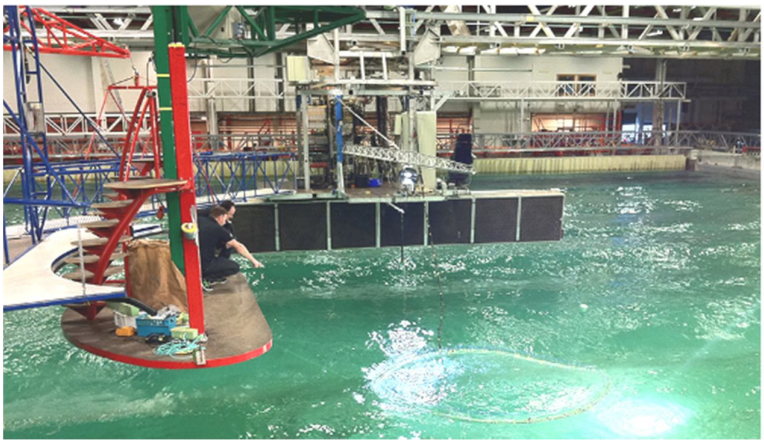


Figura 6: Ensaio com banco de ventiladores em tanque (MARINTEK, 2012)

Figura 7: Tanque para ensaio de ondas e ventos (LabOceano, 2008)

Dentre alguns institutos que utilizam túneis de vento há o *Maritime Research Institute of Netherlands – MARIN,* da Holanda (Figura 8) e o *Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT-SP)*, apresentado na Figura 9.

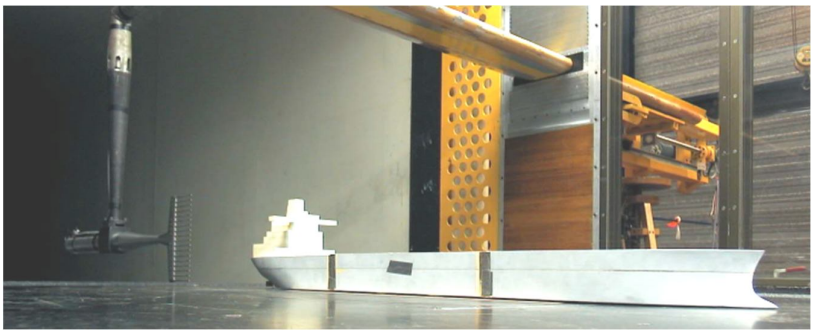


Figura 8: Ensaio em túnel de vento (MARIN, 2003)

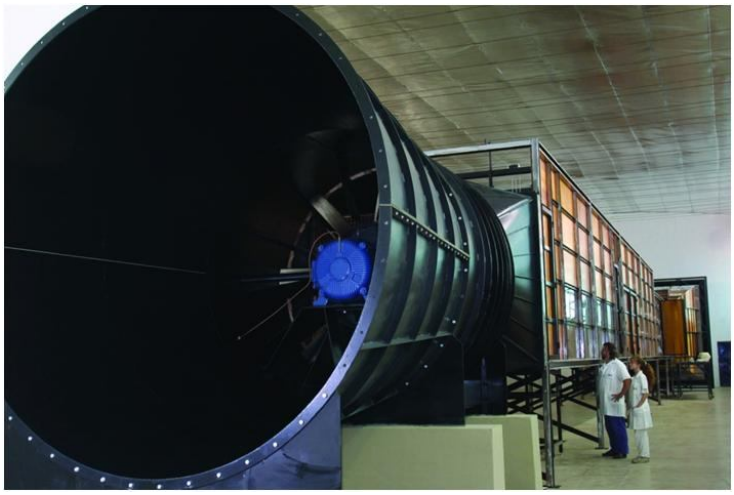


Figura 9: Túnel de vento do IPT-SP (IPT, 2013)

Para desenvolver uma malha de controle de ventiladores para geração de vento destinado a ensaios de modelos de embarcações em tanque de provas, alguns artigos foram usados como referência, inclusive aqueles com sistemas de controle aplicados em túneis de vento.

Observou-se o tipo de acionamento utilizado nos motores dos ventiladores, o modo de medição da velocidade do vento, o *hardware* utilizado para envio e aquisição de dados e o *software* utilizado para elaborar o algoritmo de controle do sistema de geração de vento.

Em Carvalho (2007), foi desenvolvido um sistema de geração de vento em tanque de prova para ensaios em modelos e estruturas no LabOceano da UFRJ (Figura 7). Este sistema consiste no controle de um conjunto de oito ventiladores para gerar um espectro de vento desejado nos ensaios de modelos. Cada um dos ventiladores tem como principal característica técnica a vazão de ar de 9.675 m^3/h a 1.700 RPM, com velocidade máxima do vento de 13,7 m/s, utilizando um motor trifásico de 1,5 cv. O autor descreve o aparato utilizado para a montagem do sistema no tanque, como os ventiladores, as colmeias, o inversor de frequência, o sensor de pressão diferencial e o *encoder* para a medição da velocidade do motor. Neste trabalho, o autor se preocupa em desenvolver um sistema de controle de velocidade de vento compensando a movimentação do modelo da embarcação, em função da redução da velocidade do vento conforme o modelo se afasta dos ventiladores. Foi elaborada em computador uma malha de controle do banco de ventiladores com uma interface com o usuário para a operação. São mostrados os experimentos realizados e os resultados obtidos na simulação de rajadas com espectro de Harris, sendo bastante satisfatórios. Destaca-se que o autor não utilizou um sistema de controle com compensação de tempo morto, tal com aqui proposto.

Singh e Poddar (INDICON, 2008), do Instituto de Tecnologia de Kanpur na Índia (IITK), descrevem a implantação de um túnel de vento com um sistema de instrumentação integrado a um sistema de controle para avaliar o desempenho aerodinâmico de modelos de aeronaves ou automóveis e também os efeitos do vento em estruturas. O sistema proposto utiliza a técnica de instrumentação virtual, feita por um programa de simulação numérica e a arquitetura PXI (*PCI eXtension for Instrumentation*), adequada para sistemas de medição e automação.

Um diagrama esquemático do teste em laboratório é apresentado na Figura 10.

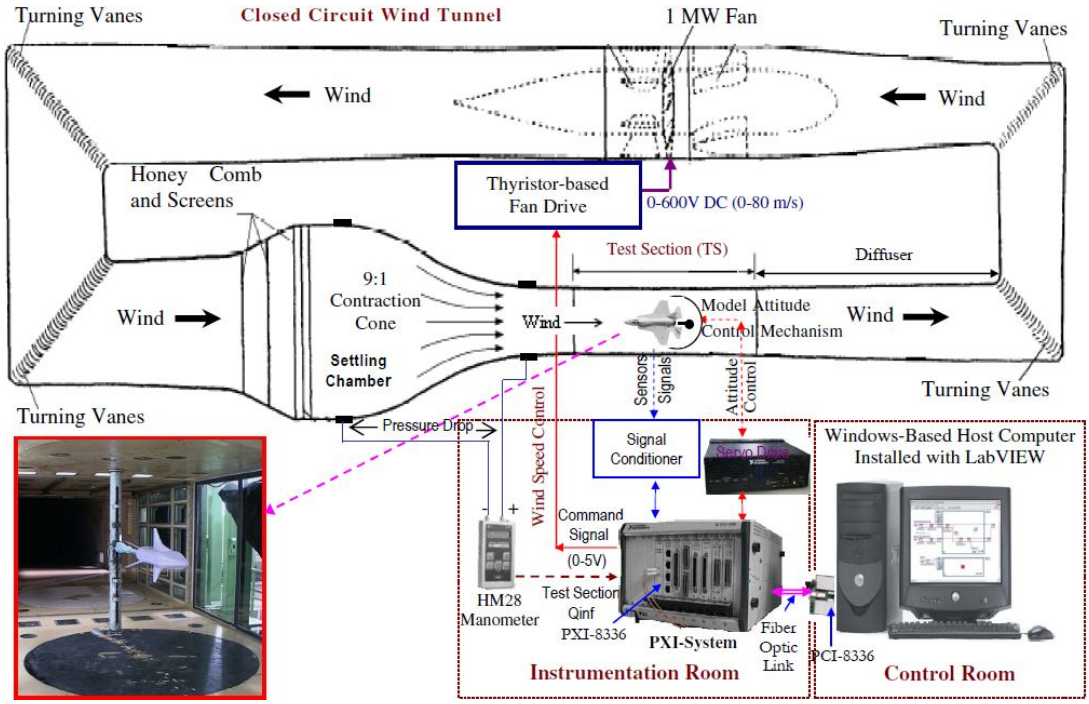


Figura 10: Diagrama esquemático de teste em túnel de vento (IITK, 2011)

O conjunto baseia-se em um computador integrado com a PXI que apresenta módulos de aquisição de dados e controle de movimento. Para a geração de vento com velocidade de até 80 m/s, um comando é enviado pelo *software* de simulação à placa de aquisição de dados do módulo PXI. Este envia o sinal ao *driver* do motor, acionando o ventilador. O sinal de pressão entre o cone e a secção transversal medido por manômetro é enviado ao módulo PXI que por sua vez envia ao *software* de simulação. No computador foi desenvolvido um algoritmo de controle, na qual o sinal do anemômetro (*Process Variable* ou PV) é comparado com o sinal desejado (*Set-point* ou SP) e enviado ao controlador PID que controla o *driver* do motor, conforme diagrama de blocos (Figura 11).

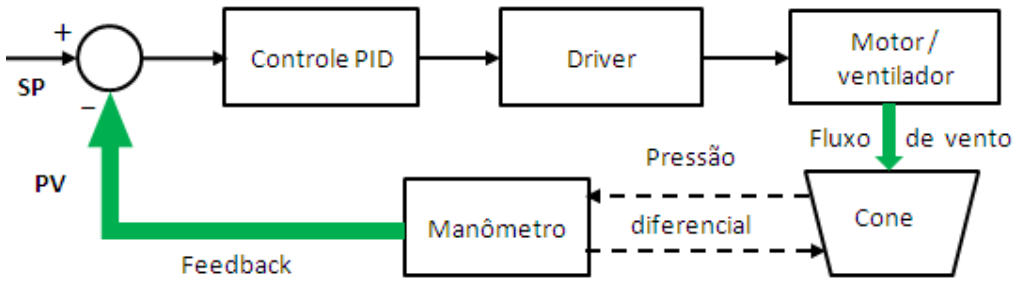


Figura 11: Diagrama de blocos de teste em túnel (adaptado de IITK, 2011)

Em Zenghong & Pengtao (2009), os autores descrevem a estrutura e características de um sistema de controle de baixa velocidade de vento em um túnel denominado NF-3, localizado na NPU (*Northwestern Polytechnical University*), na China (Figura 12).

Figura 12: Túnel de vento de três seções (NPU, 2009)

Os autores relatam a dificuldade do controle da baixa velocidade do vento em um túnel devido a este ser um sistema que apresenta tempo morto elevado, características não lineares e ser variante no tempo. Além disso, a temperatura, umidade e alguns parâmetros do próprio túnel também se alteram. Neste sistema complexo é difícil descrever a sua função de transferência por meio de um modelo matemático preciso, especialmente neste túnel de vento que possui três seções para ensaio:

- *Airfoil*, para velocidade máxima de vento de 130 m/s;

- *Three-dimensional*, para velocidade máxima de vento de 90 m/s;

- *Propeller*, para velocidade máxima de vento de 145 m/s.

Todas essas razões mencionadas constituem uma dificuldade para a elaboração do sistema de controle. Assim, ao invés de elaborar uma malha de controle tradicional como o PID para o túnel NF-3, os autores optaram por aplicar nesse túnel de vento o sistema de controle baseado na estrutura PSDNN *(Proportional, Sum and Differential Neural Network)*.

O diagrama do sistema de controle montado no túnel é mostrado na Figura 13.

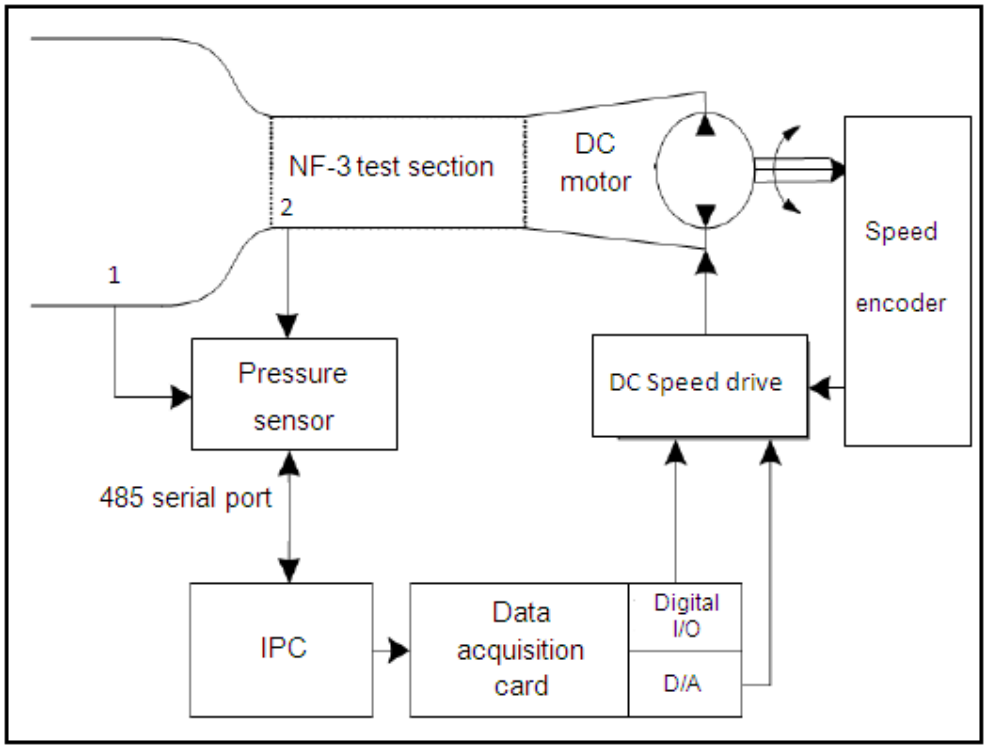


Figura 13: Diagrama do controle de velocidade no túnel (NPU, 2009)

Um algoritmo de controle instalado num computador industrial (IPC) envia, por meio de uma placa de aquisição de dados, uma tensão para o sistema de regulação de velocidade do motor DC de 1.120 KW. Um *encoder* mede a rotação desse motor e retorna o valor para o sistema de regulação. A velocidade do vento é medida através da pressão diferencial dos pontos 1 e 2 no túnel, utilizando um transdutor de pressão de precisão (PPT), cujo sinal é enviado ao IPC, fechando a malha de controle.

Foram integrados os sistemas de monitoramento, medição e controle de velocidade do vento em tempo real no túnel de vento e utilizado o IPC para gerenciar e mostrar os parâmetros de todo o sistema.

Realizaram-se simulações numéricas observando as respostas ao sinal do tipo degrau e ao pulso de distúrbio, constatando que o algoritmo de controle PSDNN apresenta características de resposta rápida, pequeno sobressinal, robustez e adaptabilidade.

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 Modelagem Matemática

É o desenvolvimento de modelos matemáticos de sistemas reais. Esses sistemas são também chamados de planta ou processo e podem ser físicos, químicos, biológicos, sociais, econômicos, etc.

A modelagem é necessária para conhecer a dinâmica do processo e assim projetar o seu controle (Figura 14).

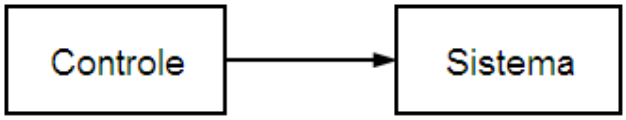


Figura 14: Representação do controle em um sistema

Existem duas maneiras de se obter o modelo do sistema: pela modelagem fenomenológica e pela identificação de sistemas.

A modelagem fenomenológica é aquela feita estabelecendo-se as equações constitutivas (dos componentes do sistema) e as equações de conservação (das quantidades de massa, energia, força, etc.).

Na identificação de sistemas o objetivo é construir modelos matemáticos de processos dinâmicos a partir de dados experimentais observados no sistema e para isso algumas etapas são seguidas (Aguirre, 2007).

Inicialmente devem ser feitos testes dinâmicos e coleta de dados, verificando aspectos importantes como a escolha dos sinais de excitação, a execução do teste e a escolha do tempo de amostragem.

A seguir escolhe-se a representação matemática a ser usada. Normalmente os sistemas são descritos por equações diferenciais e no caso de sistemas não lineares estes frequentemente podem ser linearizados. Usando a transformada de Laplace pode-se simplificar o método de solução, obtendo-se a função de transferência do sistema. Estimam-se os parâmetros do sistema, escolhendo-se o algoritmo a ser utilizado.

Por fim, realiza-se a validação do modelo, verificando se ele incorpora ou não as características do sistema original. A validação depende muito da aplicação pretendida para o modelo e da quantidade de informação disponível inicialmente sobre o sistema. Um *software* para simulação e análise de sistemas dinâmicos pode ser usado neste caso.

Neste trabalho a técnica de identificação de sistemas foi utilizada para a obtenção do modelo matemático do sistema

3.2 Sistema de Primeira Ordem

Sistemas de primeira ordem são sistemas representados por modelos cujas equações diferenciais apresentam apenas a primeira derivada da sua saída (equação diferencial de primeira ordem).

Seja um sistema S, com variável de entrada x e saída y (Figura 15):

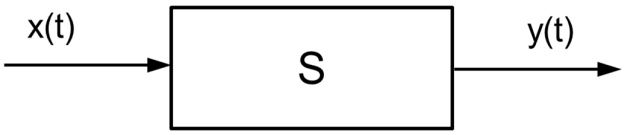


Figura 15: Representação de um sistema S

Se o sistema S for de primeira ordem ele pode ser representado pela seguinte equação diferencial:

$$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K.x(t) \qquad (1)$$

Na qual K é o ganho estático ou ganho estacionário do processo e τ é a constante de tempo do sistema ou atraso de transferência do processo.

Aplicando-se a transformada de Laplace na equação anterior obtém-se a dinâmica do sistema representada por uma função de transferência de primeira ordem:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \qquad (2)$$

Analisando a resposta a um degrau unitário aplicado na entrada X(s):

$$X(s) = \frac{1}{s} \tag{3}$$

Tem-se na saída Y(s):

$$Y(s) = \frac{K}{s} - \frac{K\tau}{\tau s + 1} \tag{4}$$

Aplicando-se a transformada inversa de Laplace:

$$y(t) = \mathcal{L}^{-1}[Y(s)] \tag{5}$$

Obtém-se a resposta ao degrau unitário:

$$y(t) = K(1 - e^{-t/\tau}), \qquad t \geq 0 \tag{6}$$

O gráfico da resposta y(t) a um degrau unitário é mostrado abaixo:

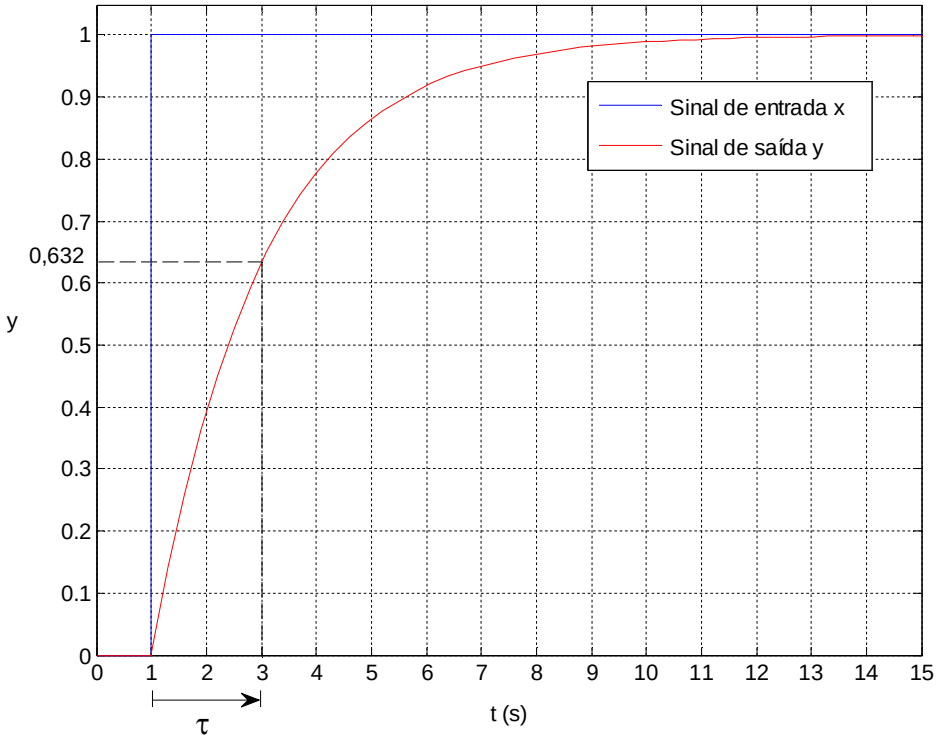


Figura 16: Resposta ao degrau de um sistema de 1ª ordem

Na equação (6), fazendo-se t=τ, verifica-se que τ é o tempo a partir do início da perturbação no sistema na qual a resposta atinge o valor de 63,2% da variação total até o regime permanente, conforme indicado no gráfico.

Considerando agora que o sistema apresente um atraso θ, a saída será:

$$y_2(t) = y(t - \theta) \tag{7}$$

Aplicando-se a transformada de Laplace, temos:

$$Y_2(s) = \mathcal{L}[y(t - \theta)] = \int_0^{\infty} y(t - \theta)\, e^{-st} dt \tag{8}$$

$$Y_2(s) = Y(s) e^{-\theta s} \tag{9}$$

Assim, obtém-se a função atraso:

$$\frac{Y_2(s)}{Y(s)} = e^{-\theta s} \tag{10}$$

Substituindo-se Y(s) obtido anteriormente, tem-se a função de transferência de primeira ordem com atraso (em inglês, FOPDT – *First Order Plus Dead Time*):

$$\frac{Y_2(s)}{X(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-\theta s} \tag{11}$$

O gráfico da resposta y2(t) a um degrau unitário é mostrado abaixo:

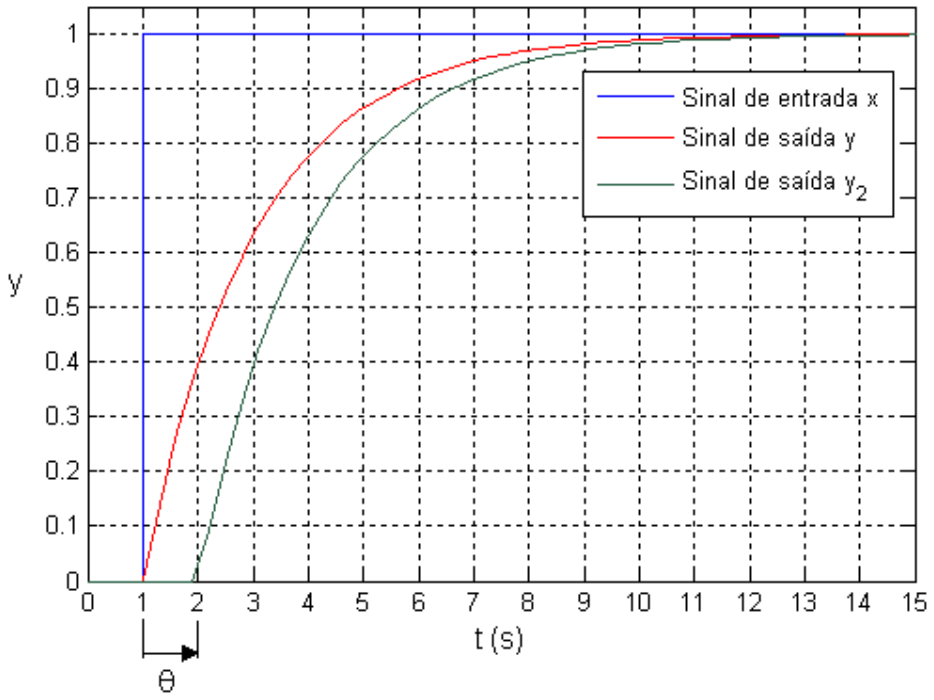


Figura 17: Resposta ao degrau de um sistema de 1ª ordem com atraso

Nota-se que a resposta $y_2(t)$ do sistema é a y(t) acrescida de um atraso θ.

Esse atraso de transporte ou tempo morto θ é o tempo a partir do início da aplicação de um sinal degrau na entrada do sistema até que seja notada uma mudança na saída do mesmo.

Analisando agora a resposta em frequência do sistema de primeira ordem com tempo morto (Ogata, 2010), considerando este uma função G(jω) dada por:

$$G(j\omega) = \frac{K}{1 + j\omega\tau} . e^{-j\omega\theta} \tag{12}$$

O módulo (em dB) e o ângulo de fase de G(jω) são respectivamente:

$$20\log|G(j\omega)| = 20\log\left|e^{-j\omega\theta}\right| + 20\log\left|\frac{K}{1 + j\omega\tau}\right| = 20\log\frac{K}{\sqrt{\tau^2\omega^2 + 1}} \tag{13}$$

$$\text{fase}[G(j\omega)] = \text{fase}\left[e^{-j\omega\theta}\right] + \text{fase}\left[\frac{K}{1 + j\omega\tau}\right] = -\omega\theta - tg^{-1}\omega\tau \tag{14}$$

As curvas de módulo e de ângulo de fase dessa função de transferência, com K=1, θ=0,5 e τ=1, por exemplo, são mostradas no diagrama de Bode abaixo:

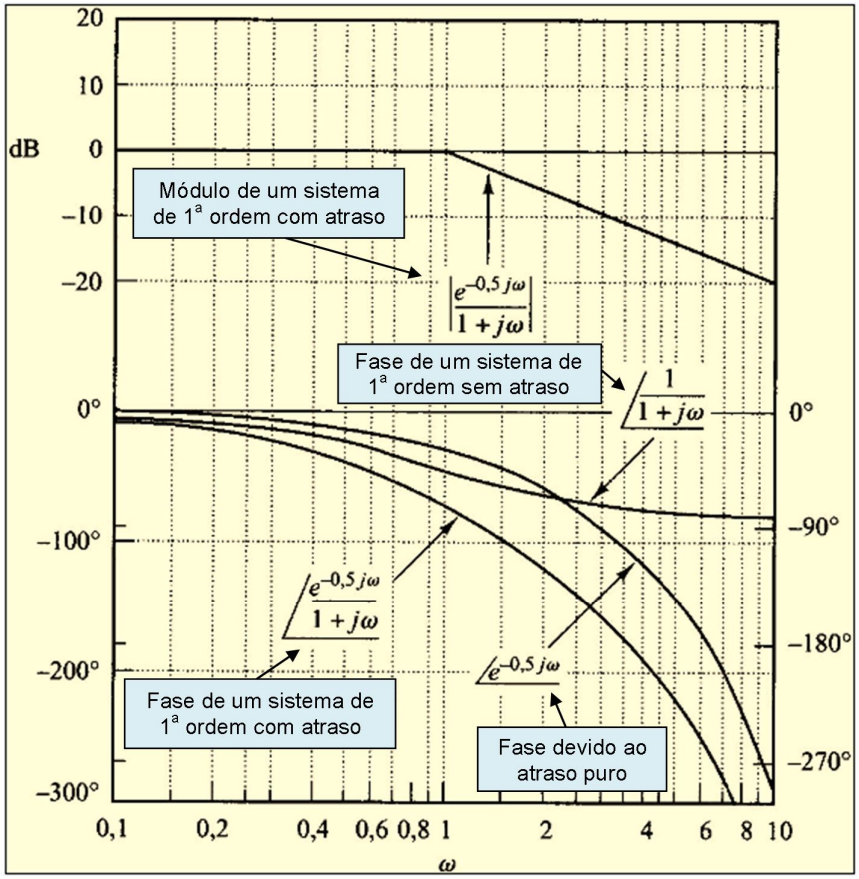


Figura 18: Resposta de um sistema de 1ª ordem com atraso (Ogata, 2010)

Verifica-se no diagrama de Bode que a curva de fase do sistema que apresenta tempo morto decai bruscamente se comparada com a curva de um sistema sem tempo morto. Isso significa que diminui a margem de fase, podendo levar à instabilidade da malha.

Raramente esse tempo morto pode ser eliminado por completo em um sistema industrial e no projeto da malha de controle o mesmo deve ser considerado.

3.3 Identificação de Sistema de Primeira Ordem mais Atraso

Esta seção apresenta a técnica de identificação de um sistema modelado por uma função de primeira ordem e um atraso.

A resposta y(t) a um sinal x(t) tipo degrau de amplitude U, aplicado na maioria dos processos, tem a forma de um “S”, como mostrado abaixo (Figura 19).

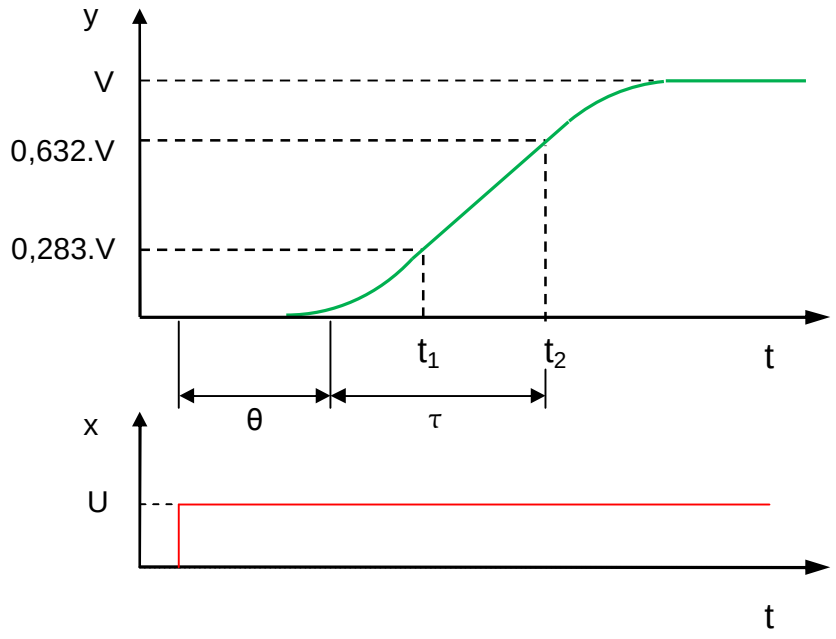


Figura 19: Identificação dos parâmetros pela curva de resposta do sistema

Essa curva de resposta do sistema pode ser aproximada pela função de transferência de um sistema de primeira ordem com atraso:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-\theta s} \qquad (15)$$

Para se estimar esses parâmetros que representam a dinâmica do processo (K, τ e θ) pode-se utilizar a seguinte metodologia de identificação:

- Excitar o sistema com sinal tipo degrau na sua entrada, isto é, efetuar um ciclo de degrau para cima e outro para baixo e obter a sua curva de resposta;

- Uma vez observado que a curva de resposta é similar à da Figura 19, pode-se fazer a sua aproximação para um sistema de primeira ordem com atraso;

- Buscar na curva de resposta o instante t_1 correspondente a 0,283.V e o instante t_2 correspondente a 0,632.V.

- Obtenção do valor de θ:

Da equação do sistema de primeira ordem com atraso, no instante t_2 já conhecido, temos:

$$y(t_2 - \theta) = V.(1 - e^{-(t_2-\theta)/\tau}) \tag{16}$$

Do gráfico temos que $y(t_2 - \theta)$ é igual a 0,632.V, fazendo-se a substituição:

$$0{,}632.V = V.(1 - e^{-(t_2-\theta)/\tau}) \tag{17}$$

$$0{,}368 = e^{-(t_2-\theta)/\tau} \tag{18}$$

Aplicando-se o logaritmo natural nos dois lados da equação, fica:

$$\ln(0{,}368) = \ln(e^{-(t_2-\theta)/\tau}) \tag{19}$$

Ou seja:

$$1 = \frac{t_2 - \theta}{\tau} \tag{20}$$

De onde se obtém o valor de θ:

$$\boxed{\theta = t_2 - \tau} \tag{21}$$

- Obtenção do valor de τ:

Da equação do sistema de primeira ordem com atraso, no instante t_1 já conhecido, temos:

$$y(t_1 - \theta) = V.(1 - e^{-(t_1-\theta)/\tau}) \quad (22)$$

Do gráfico temos que $y(t_1 - \theta)$ é igual a 0,283.V, fazendo-se a substituição:

$$0{,}283.V = V.(1 - e^{-(t_1-\theta)/\tau}) \quad (23)$$

$$0{,}717 = e^{-(t_1-\theta)/\tau} \quad (24)$$

Aplicando-se o logaritmo natural nos dois lados da equação, fica:

$$\ln(0{,}717) = \ln(e^{-(t_1-\theta)/\tau}) \quad (25)$$

Ou seja:

$$0{,}333 = \frac{t_1 - \theta}{\tau} \quad (26)$$

Substituindo-se θ da equação (21), temos:

$$0{,}333.\tau = t_1 - (t_2 - \tau) \quad (27)$$

De onde se obtém o valor de τ:

$$\boxed{\tau = \frac{3}{2}(t_2 - t_1)} \quad (28)$$

- Obtenção do ganho K:

$$\boxed{K = \frac{V}{U}} \quad (29)$$

- Repetir pelo menos três vezes este ciclo e considerar como modelo do sistema a média dos valores obtidos em cada uma destas identificações.

Uma vez feita a identificação do sistema e estimados os seus parâmetros, parte-se para a validação do modelo obtido, através da aplicação de outros tipos de sinais na sua entrada, tais como senoidal ou dente de serra, fazendo-se a comparação entre a resposta experimental e a prevista pelo modelo.

3.4 Controlador PID

O controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) é o algoritmo de controle tradicional mais utilizado em processos e sistemas industriais.

Um controlador PID calcula inicialmente o erro entre sua variável controlada (medida no processo) e o seu valor desejado (*set-point*) e em função desse erro gera um sinal de controle u. O algoritmo PID usa o erro em três modos distintos: o termo Proporcional (P), o Integral (I) e o Derivativo (D).

A estrutura de um controlador PID clássico é mostrada a seguir (Figura 20).

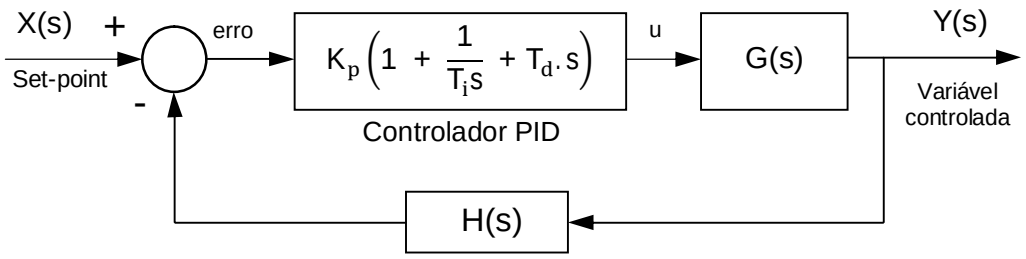


Figura 20: Estrutura de um controlador PID clássico

Sintonizar um controlador PID significa ajustar os parâmetros K_p, T_i e T_d do controlador de modo que o desempenho do sistema seja satisfatório. Existem vários métodos de sintonia tais como Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, minimização da integral do erro (IAE e ITAE), modelo interno (IMC) ou também por tentativa e erro.

3.5 Sintonia Baseada no Método do Modelo Interno

A estrutura IMC (*Internal Model Control*) tem por objetivo, a partir do modelo do sistema e de uma especificação de desempenho, obter a sintonia adequada para o controlador PID. Esta ideia foi proposta por Dahlin (1968).

Neste projeto optou-se pelo método IMC, pois o mesmo possui um parâmetro de ajuste relacionado ao tempo de resposta em malha fechada, que permitirá verificar de forma mais direta as vantagens da compensação do tempo morto.

A Figura 21 mostra a estrutura IMC de controle, onde G(s) é a função de transferência real e $\widetilde{G}(s)$ corresponde ao modelo interno. Em geral, $\widetilde{Y}(s) \neq Y(s)$, em razão dos erros no modelo ($\widetilde{G}(s) \neq G(s)$) e das perturbações desconhecidas ($D(s) \neq 0$), desconsideradas no modelo.

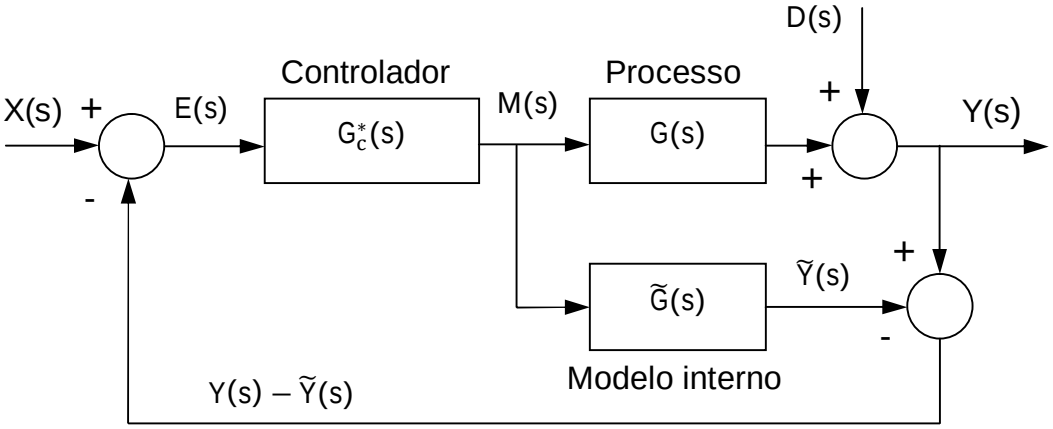


Figura 21: Estrutura de malha do controlador IMC

Manipulando-se o diagrama de blocos da Figura 21, chega-se ao diagrama de blocos apresentado a seguir (Figura 22).

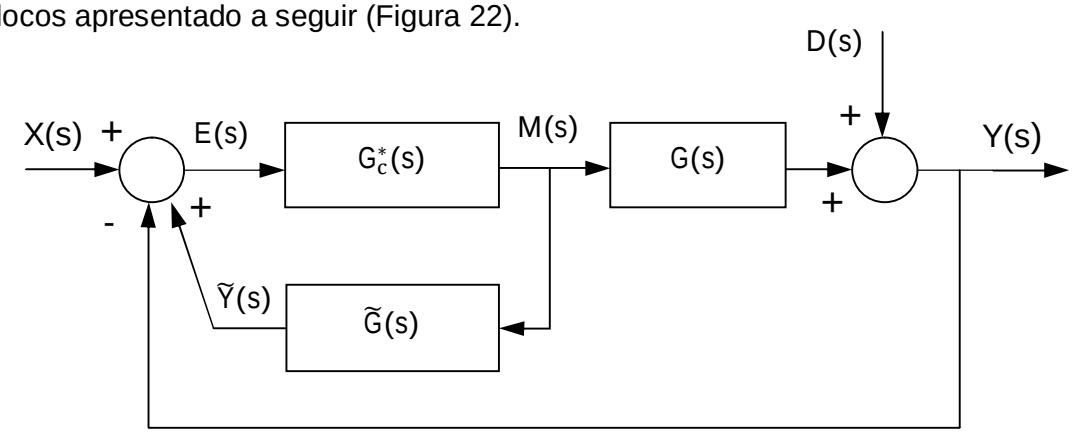


Figura 22: Estrutura equivalente do controlador IMC

A malha interna da Figura 22, correspondente ao controlador G_c, é dada por:

$$G_c(s) = \frac{G_c^*(s)}{1 - G_c^*(s).\widetilde{G}(s)} \tag{30}$$

A equação descritiva desse sistema em malha fechada é dada por:

$$Y(s) = \frac{G_c^*(s).G(s)}{1 + G_c^*(s).(G(s) - \widetilde{G}(s))}X(s) + \frac{1 - G_c^*(s).\widetilde{G}(s)}{1 + G_c^*(s).(G(s) - \widetilde{G}(s))}D(s) \tag{31}$$

No caso especial em que o modelo seja perfeito, tem-se $\widetilde{G}(s) = G(s)$:

$$Y(s) = G_c^*(s).G(s).X(s) + (1 - G_c^*(s).G(s)).D(s) \tag{32}$$

O Projeto do controlador IMC é feito em duas etapas:

1ª etapa - O modelo do processo é fatorado na seguinte forma:

$$\tilde{G}(s) = \tilde{G}_{+}(s).\tilde{G}_{-}(s) \tag{33}$$

Onde:
- $\tilde{G}_{+}(s)$ possui ganho de regime unitário e contém os atrasos puros e os zeros situados no semiplano direito.
- $\tilde{G}_{-}(s)$ é a parte inversível de $\tilde{G}(s)$, não possui polos no semiplano direito nem termos da forma $e^{+\theta s}$.

2ª etapa - O controlador $G_c^*(s)$ é especificado por:

$$G_c^*(s) = \frac{f}{\tilde{G}_{-}(s)} \tag{34}$$

Onde f é um filtro passa-baixa com ganho estacionário unitário, usado para melhorar a robustez do controlador e para assegurar a realizabilidade física de $G_c^*(s)$. Tipicamente f é na forma:

$$f = \frac{1}{(\lambda s + 1)^r} \tag{35}$$

Onde λ é a constante de tempo desejada da malha fechada e r é um número inteiro positivo tal que $G_c^*(s)$ seja realizável fisicamente. O controlador IMC perfeito ($\lambda = 0$) é simplesmente o inverso do modelo do processo, isto é, $G_c^*(s) = 1/\tilde{G}(s)$. No entanto, usualmente um controlador perfeito não é fisicamente realizável ou pode ser inviável devido a erros no modelo.

No caso ideal ($\tilde{G}(s) = G(s)$), tem-se:

$$Y(s) = \tilde{G}_{+}(s).f.X(s) + \left(1 - f.\tilde{G}_{+}(s)\right).D(s) \tag{36}$$

A função de transferência de malha fechada para mudanças no valor desejado ($D(s) = 0$) é:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \tilde{G}_{+}(s).f \tag{37}$$

Aplicando o controle IMC em um modelo representado por um sistema de primeira ordem com tempo morto, tem-se:

$$\tilde{G}(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-\theta s} \tag{38}$$

Sendo representada por:

$$\tilde{G}(s) = \tilde{G}_{+}(s).\tilde{G}_{-}(s) \tag{39}$$

Onde:
$$\begin{cases} \tilde{G}_{+}(s) = e^{-\theta s} & (40) \\ \tilde{G}_{-}(s) = \dfrac{K}{\tau s + 1} & (41) \end{cases}$$

Adotando-se o filtro f como:

$$f = \frac{1}{\lambda s + 1} \tag{42}$$

Tem-se que:

$$G_c^*(s) = \frac{f}{\tilde{G}_{-}(s)} = \frac{1}{\lambda . s + 1} . \frac{\tau s + 1}{K} \tag{43}$$

e

$$G_c(s) = \frac{G_c^*(s)}{1 - G_c^*(s).\tilde{G}(s)} = \frac{\tau s + 1}{K.(\lambda . s + 1) - K.(\tau s + 1).e^{-\theta s}} \tag{44}$$

Utilizando a aproximação de Padé para a exponencial $e^{-\theta s}$, fica:

$$e^{-\theta s} = \frac{1 - \frac{\theta s}{2}}{1 + \frac{\theta s}{2}} \tag{45}$$

Definindo um controlador PID usando o método IMC, tem-se que:

$$\tilde{G}(s) = \frac{K(1 - \frac{\theta s}{2})}{\left(1 + \frac{\theta s}{2}\right).(\tau s + 1)} \tag{46}$$

Então:
$$\begin{cases} \tilde{G}_{+}(s) = 1 - \dfrac{\theta s}{2} & (47) \\ \tilde{G}_{-}(s) = \dfrac{K}{\left(1 + \frac{\theta s}{2}\right).(\tau s + 1)} & (48) \end{cases}$$

Obtém-se:

$$G_c^*(s) = \frac{\left(1 + \frac{\theta s}{2}\right).(\tau s + 1)}{K(\lambda s + 1)} \tag{49}$$

Da equação (30), o controlador $G_c(s)$ é equivalente a:

$$G_c(s) = \frac{\left(1 + \frac{\theta s}{2}\right).(\tau s + 1)}{K\left(\lambda + \frac{\theta}{2}\right)s} \tag{50}$$

Que é igual a:

$$\boxed{G_c(s) = \frac{1}{K}.\frac{2\tau + \theta}{2\lambda + \theta}.\left[1 + \frac{1}{\left(\tau + \frac{\theta}{2}\right)s} + \frac{\tau\theta}{(2\tau + \theta)}s\right]} \tag{51}$$

Esse é um controlador PID descrito no trabalho de Rivera (1986) que sugere as equações de sintonia da Tabela 1 para o PID e o PI quando a dinâmica do sistema for adequadamente representada por um modelo de primeira ordem com atraso (com parâmetros K, τ e θ).

Tabela 1: Sintonia do controle PID para sistema com tempo morto

Controlador	**K_p**	**T_i**	**T_d**	**Sugestão para o Desempenho**
PID	$\frac{2\tau + \theta}{K.(2\lambda + \theta)}$	$\tau + \frac{\theta}{2}$	$\frac{\tau.\theta}{(2\tau + \theta)}$	$\frac{\lambda}{\theta} > 0{,}8$
PI	$\frac{2\tau + \theta}{K.2\lambda}$	$\tau + \frac{\theta}{2}$	----------	$\frac{\lambda}{\theta} > 1{,}7$

Nota-se nessa tabela, que uma vantagem do método de sintonia IMC é que o desempenho de um controlador está associado com a razão da constante de tempo de malha fechada (λ – parâmetro do método) com o de malha aberta (τ). Assim, este método permite definir claramente o desempenho desejado (Campos, 2006).

3.6 Efeito do Tempo Morto na Estabilidade da Malha de Controle

Um critério de desempenho importante em um sistema de controle é a sua estabilidade. A estabilidade BIBO (*Bounded Input - Bounded Output*), sigla em inglês para entrada limitada - saída limitada significa que é estável o sistema linear que para qualquer entrada de amplitude finita produz saída de amplitude também finita. Além disso, na teoria dos sistemas lineares existe o seguinte critério de estabilidade:

Uma condição necessária e suficiente para que um sistema linear seja BIBO estável é que todos os seus polos estejam no semiplano esquerdo do plano s.

Um dos fatores que pode causar instabilidade a um sistema de controle em malha fechada é a presença de atraso. Como exemplo para se mostrar isso, pode-se fazer a análise do seguinte sistema (Figura 23):

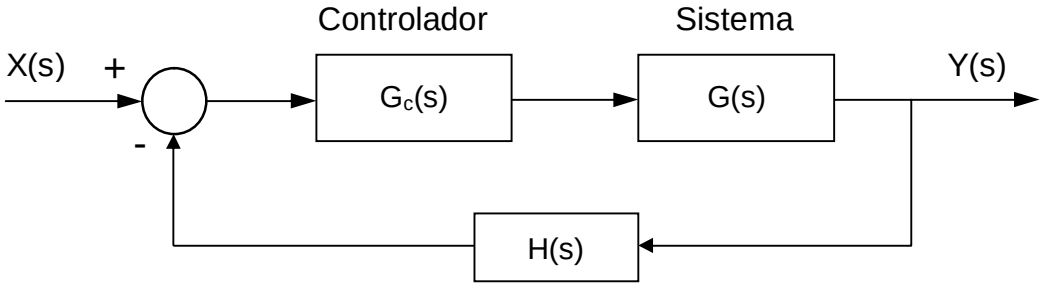


Figura 23: Sistema de controle em malha fechada

Seja o processo composto por um sistema de primeira ordem mais atraso:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-\theta s} \tag{52}$$

Como já visto, K é o ganho, τ é a constante de tempo e θ é o atraso de transporte ou tempo morto, cuja função pode ser representada pela aproximação de Padé para tempo morto (Ogata, 2010):

$$e^{-\theta s} = \frac{1 - \frac{\theta s}{2} + \frac{\theta s^2}{8} - \frac{\theta s^3}{48} + \cdots}{1 + \frac{\theta s}{2} + \frac{\theta s^2}{8} + \frac{\theta s^3}{48} + \cdots} \tag{53}$$

Se forem considerados somente os dois primeiros termos da equação, tem-se:

$$e^{-\theta s} = \frac{2 - \theta s}{2 + \theta s} \tag{54}$$

Substituindo na equação G(s), tem-se:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \cdot \frac{2 - \theta s}{2 + \theta s} \tag{55}$$

Resultando na seguinte função que descreve o sistema:

$$G(s) = \frac{2K - K\theta s}{\tau\theta s^2 + (2\tau + \theta)s + 2} \tag{56}$$

Utilizando-se um controlador PI para o sistema:

$$G_c(s) = K_p\left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \tag{57}$$

Rearranjando os termos da equação, o controlador fica:

$$G_c(s) = \frac{K_p T_i s + K_p}{T_i s} \tag{58}$$

A função de transferência em malha fechada é dada por:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{G_c(s).G(s).H(s)}{1 + G_c(s).G(s).H(s)} \tag{59}$$

Considerando-se realimentação unitária, o produto $G_c(s).G(s).H(s)$ será:

$$G_c(s).G(s) = \frac{-K_p T_i K\theta s^2 + (2K_p T_i K - K_p K\theta)s + 2K_p K}{\tau\theta T_i s^3 + (2\tau T_i + T_i\theta)s^2 + 2T_i s} \tag{60}$$

Substituindo $G_c(s).G(s)$ na função de transferência em malha fechada, tem-se:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\dfrac{-K_p T_i K\theta s^2 + (2K_p T_i K - K_p K\theta)s + 2K_p K}{\tau\theta T_i s^3 + (2\tau T_i + T_i\theta)s^2 + 2T_i s}}{\dfrac{\tau\theta T_i s^3 + (2\tau T_i + T_i\theta)s^2 + 2T_i s - K_p T_i K\theta s^2 + (2K_p T_i K - K_p K\theta)s + 2K_p K}{\tau\theta T_i s^3 + (2\tau T_i + T_i\theta)s^2 + 2T_i s}} \tag{61}$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{-K_p T_i K\theta s^2 + \left(2K_p T_i K - K_p K\theta\right)s + 2K_p K}{\tau\theta T_i s^3 + (2\tau T_i + T_i\theta)s^2 + 2T_i s - K_p T_i K\theta s^2 + \left(2K_p T_i K - K_p K\theta\right)s + 2K_p K} \tag{62}$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{-K_p T_i K\theta s^2 + (2K_p T_i K - K_p K\theta)s + 2K_p K}{\tau\theta T_i s^3 + (2\tau T_i + T_i\theta - K_p T_i K\theta)s^2 + (2T_i + 2K_p T_i K - K_p K\theta)s + 2K_p K} \tag{63}$$

A. Hurwitz (1895) e E.J. Routh (1877) publicaram um método para investigar a estabilidade de um sistema linear. O critério de estabilidade de Routh-Hurwitz verifica se todos os polos de uma função de transferência pertencem ao semiplano esquerdo do plano s. Para isso analisa-se o polinômio do denominador da função de transferência, chamado de equação característica.

Igualando a equação característica a zero para se encontrar as raízes:

$$\tau\theta T_i s^3 + (2\tau T_i + T_i\theta - K_p T_i K\theta)s^2 + (2T_i + 2K_p T_i K - K_p K\theta)s + 2K_p K = 0 \qquad (64)$$

Aplica-se o critério de Routh-Hurwitz, pela organização em linhas e colunas:

s^3	$\tau\theta T_i$	$2K_p T_i K - K_p K\theta + T_i$
s^2	$2\tau T_i + T_i\theta - K_p T_i K\theta$	$2K_p K$
s^1	$\dfrac{(2\tau T_i + T_i\theta - K_p T_i K\theta).(2T_i + 2K_p T_i K - K_p K\theta) - 2K_p K\tau\theta T_i}{2\tau T_i + T_i\theta - K_p T_i K\theta}$	0
s^0	$2K_p K$	0

Agrupando-se os termos em função de K_p, a tabela fica:

s^3	$\tau\theta T_i$	$(2\,T_i K - K\theta)K_p + 2T_i$
s^2	$-T_i K\theta K_p + 2\tau T_i + T_i\theta$	$2K_p K$
s^1	$\dfrac{(K^2 T_i\theta^2 - 2T_i^2 K^2\theta).K_p^2 + (4\tau T_i^2 K - 4\tau K T_i\theta - K T_i\theta^2)K_p + 4\tau T_i^2 + 2T_i^2\theta}{2\tau T_i + T_i\theta - K_p T_i K\theta}$	0
s^0	$2KK_p$	0

Da primeira coluna obtêm-se as condições necessárias para a estabilidade:

$$\theta \geq 0 \qquad (65)$$

$$\theta \leq \frac{2\tau + \theta}{K\theta} \qquad (66)$$

$$(K^2 T_i\theta^2 - 2T_i^2 K^2\theta).K_p^2 + (4\tau T_i^2 K - 4\tau K T_i\theta - K T_i\theta^2)K_p + 4\tau T_i^2 + 2T_i^2\theta \geq 0 \qquad (67)$$

$$K_p \geq 0 \qquad (68)$$

Supondo-se, para análise, que se tenha um sistema com K = 2 e τ = 6 s e montando-se o gráfico do ganho do controlador em função do tempo morto, para três valores de T_i: 0,5 s, 1,0 s e 2,0 s (Figura 24). Obtém como resultado as curvas representadas pela equação (67).

Nota-se no gráfico que, ao se aumentar o valor de T_i, aumenta-se a estabilidade do sistema, compreendida pela área abaixo da cada curva.

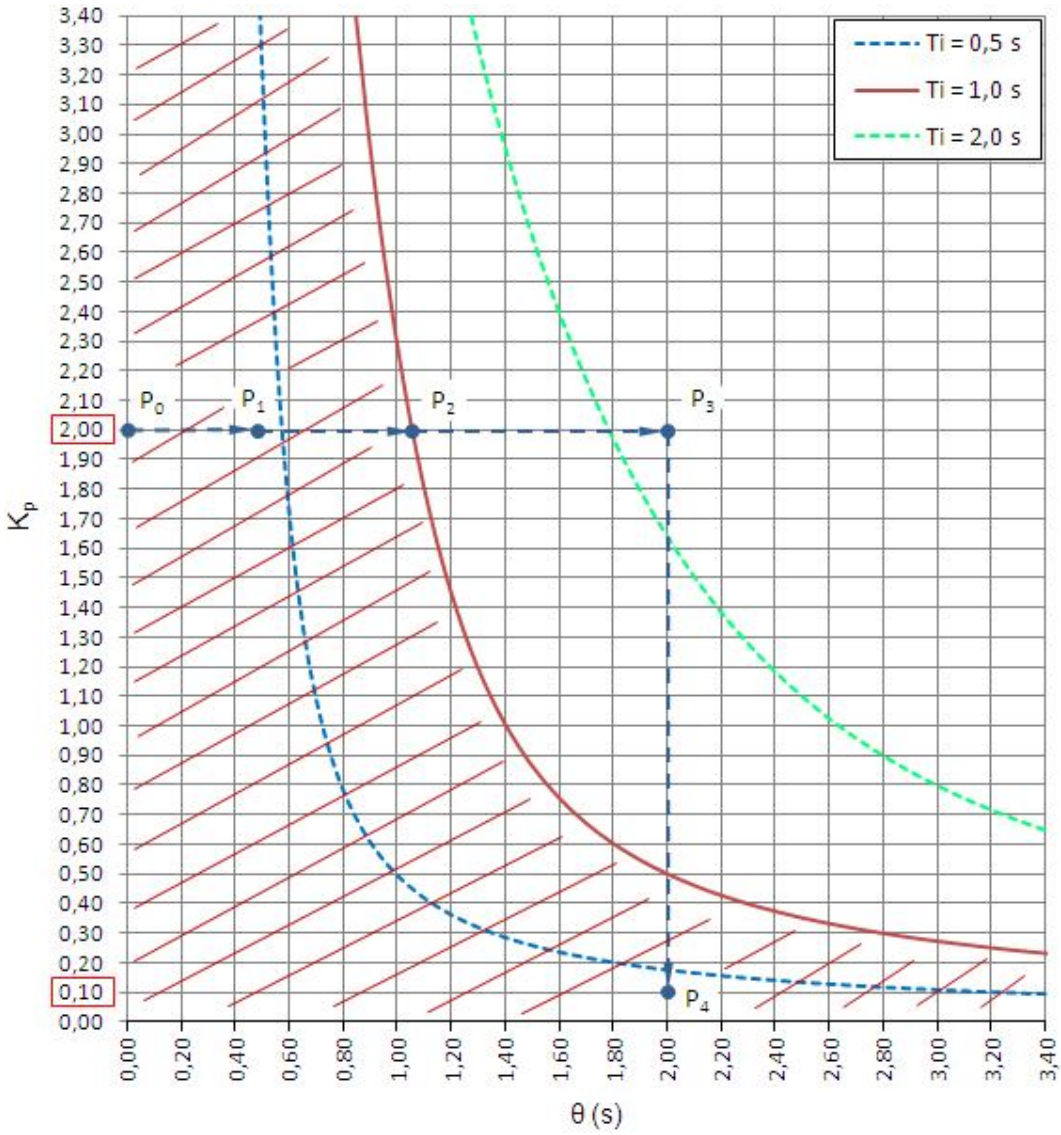


Figura 24: Gráfico do ganho do controlador em função do tempo morto

Observou-se agora, a região hachurada do gráfico delimitada pela curva para T_i=1,0 s, região esta na qual os valores de K_p e θ tornam o sistema estável. Tomaram-se, para análise, cinco pontos (P_0 a P_4) verificando a estabilidade do sistema à medida que se aumentava o tempo morto, observando a curva de resposta ao degrau unitário e o diagrama de Bode de cada ponto considerado.

Ponto P_0 (K_p=2 e θ=0): O sistema é estável, com margem de fase maior que 180°, devido a não existir tempo morto no sistema.

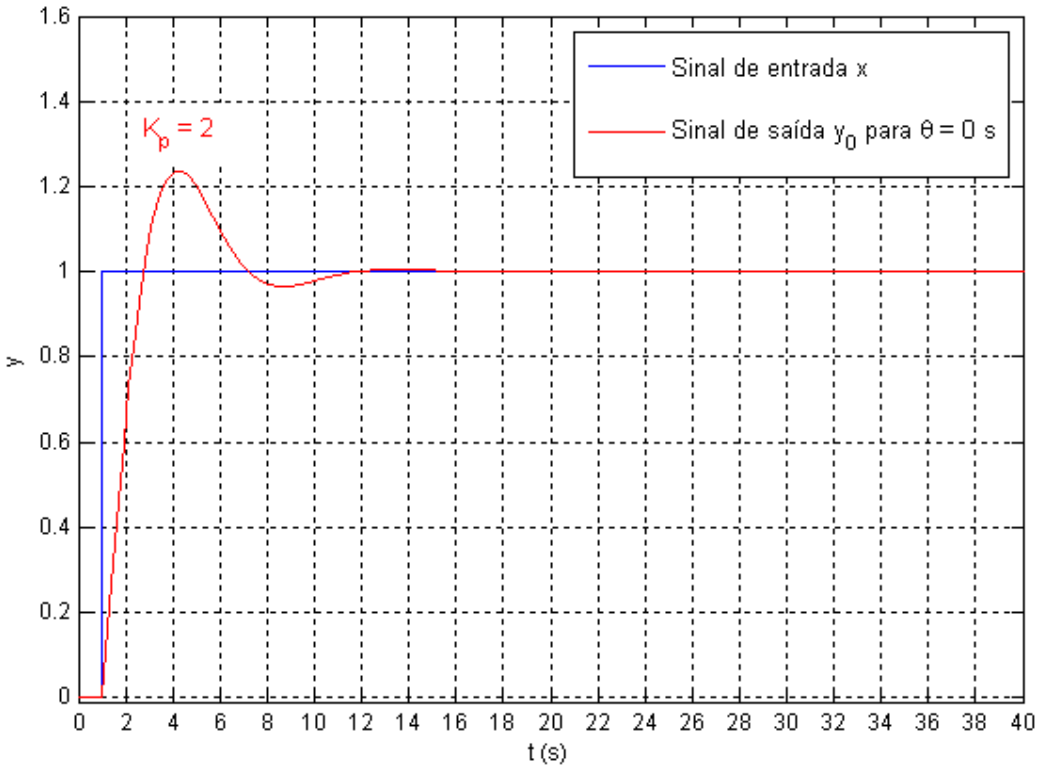


Figura 25: Resposta ao degrau - sistema sem tempo morto e K_p=2

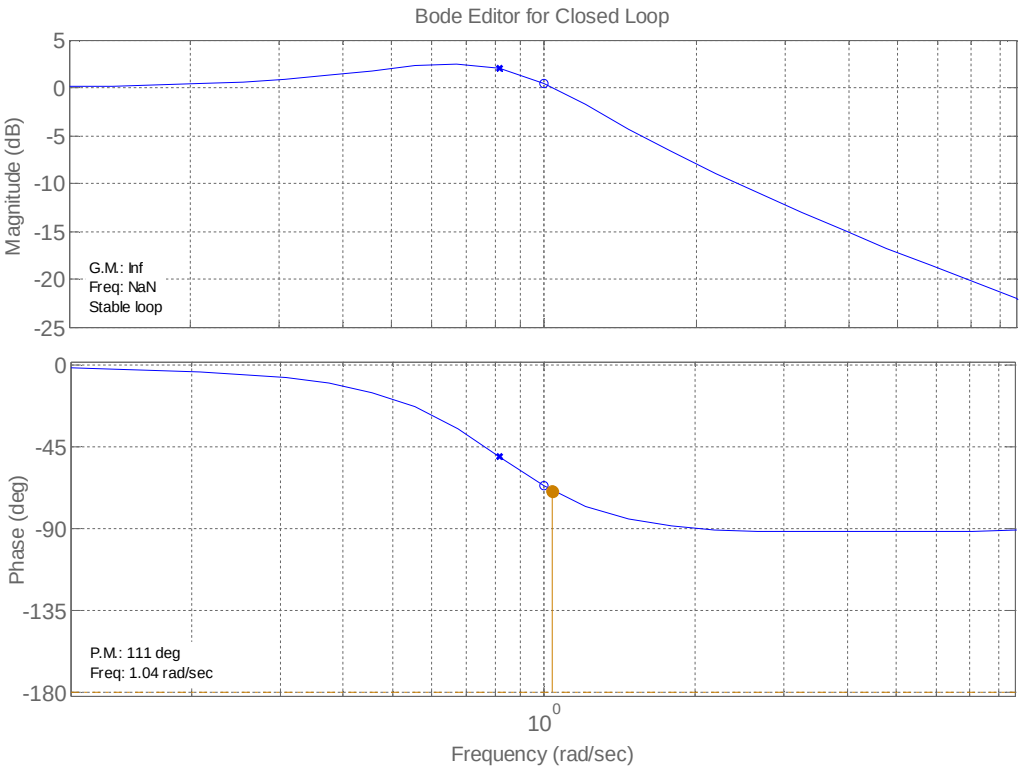


Figura 26: Diagrama de Bode - sistema sem tempo morto e K_p=2

Ponto P_1 (K_p=2 e θ=0,5 s): O sistema é estável com margem de fase maior que 180˚, porém o tempo morto aumenta o sobressinal da resposta ao degrau.

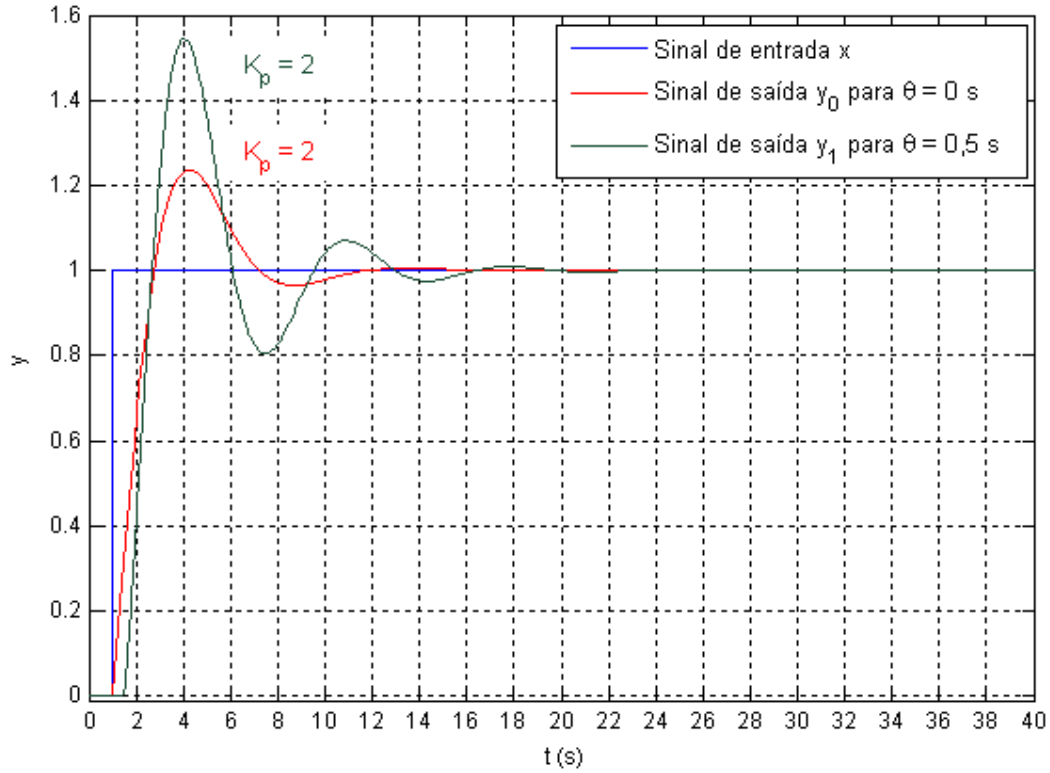


Figura 27: Resposta ao degrau - sistema com tempo morto de 0,5 s e K_p=2

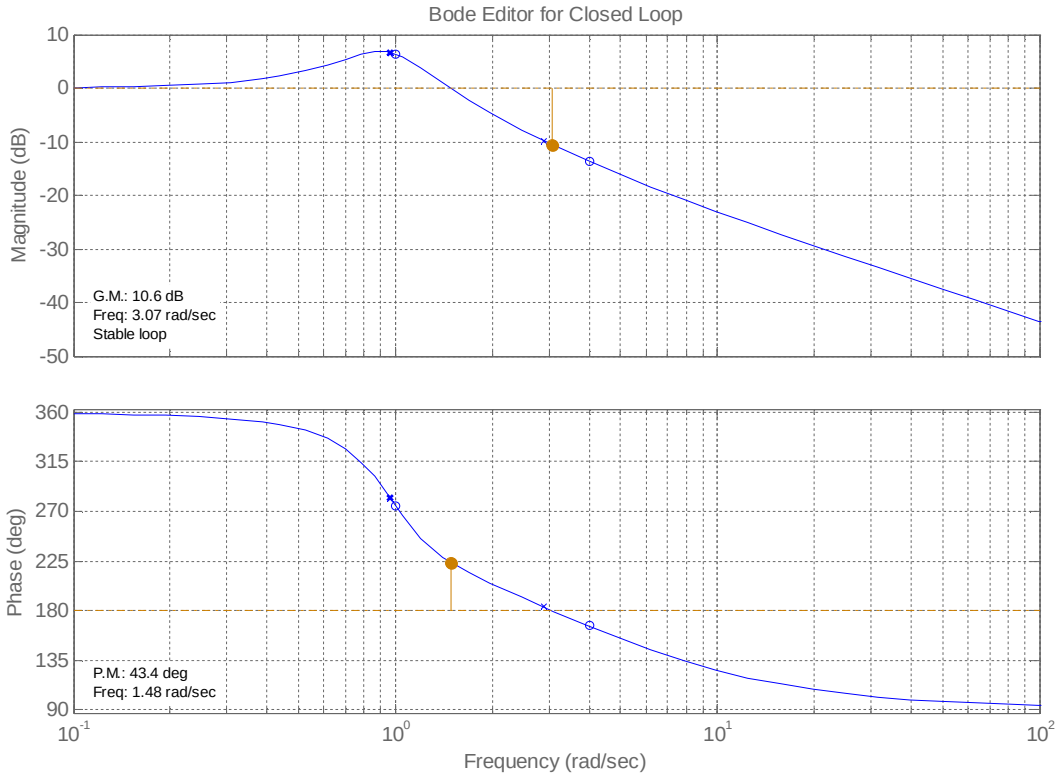


Figura 28: Diagrama de Bode - sistema com tempo morto de 0,5 s e K_p=2

Ponto P_2 (K_p=2 e θ=1,02 s): O sistema situa-se no limiar da estabilidade, com margem de fase igual a 180˚ e resposta com amplitude constante.

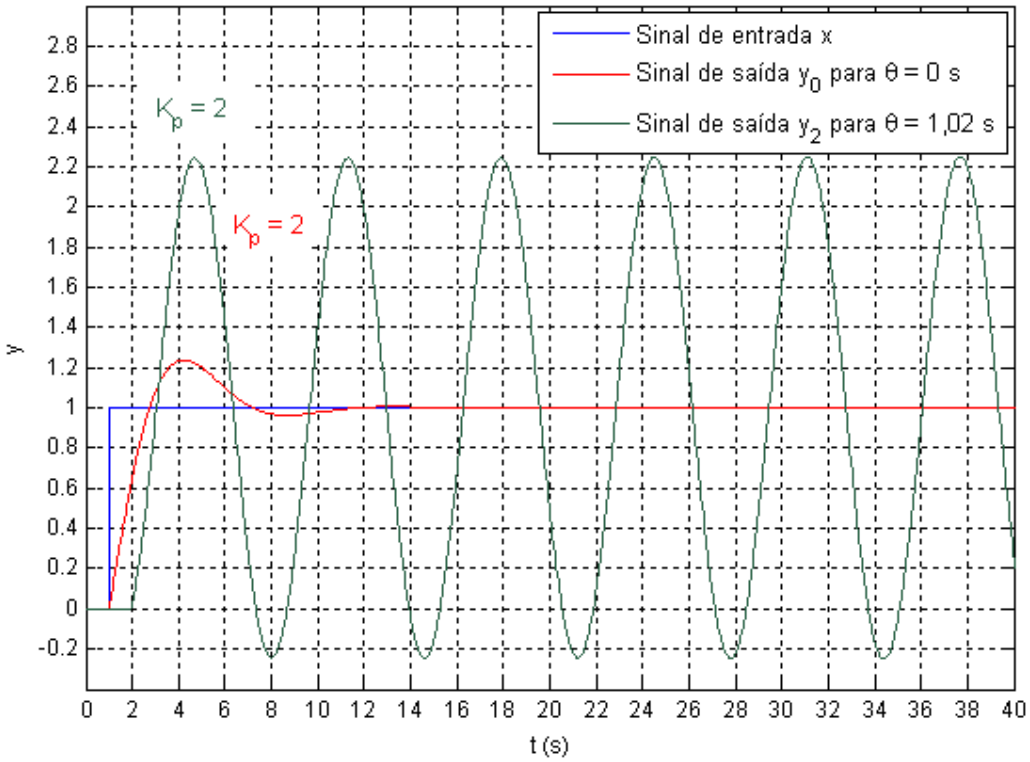


Figura 29: Resposta ao degrau - sistema com tempo morto de 1,0 s e K_p=2

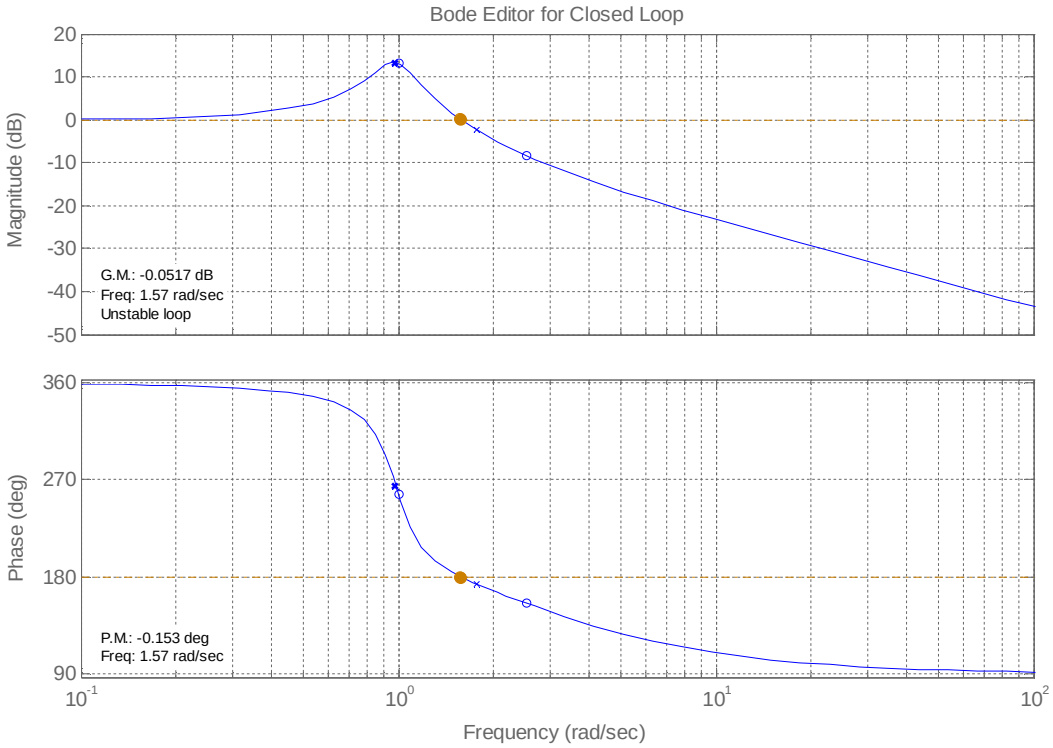


Figura 30: Diagrama de Bode - sistema com tempo morto de 1,0 s e K_p=2

Ponto P_3 (K_p=2 e θ=2,0 s): O sistema torna-se instável devido ao tempo morto, com margem de fase menor que 180˚ e resposta tendendo ao infinito.

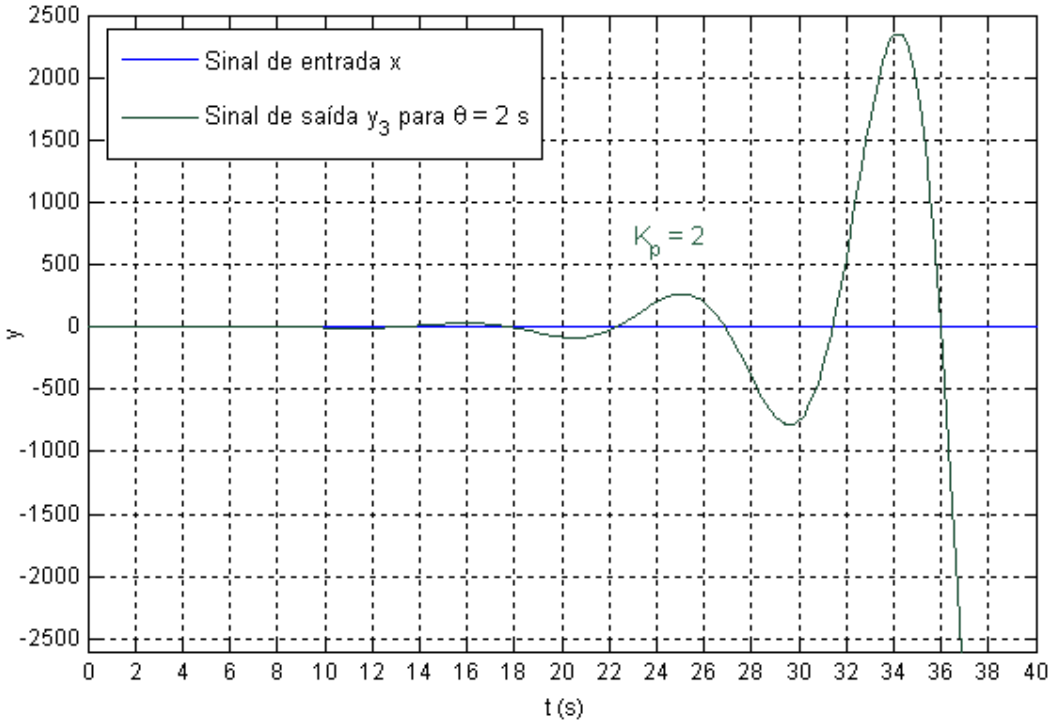


Figura 31: Resposta ao degrau - sistema com tempo morto de 2,0 s e K_p=2

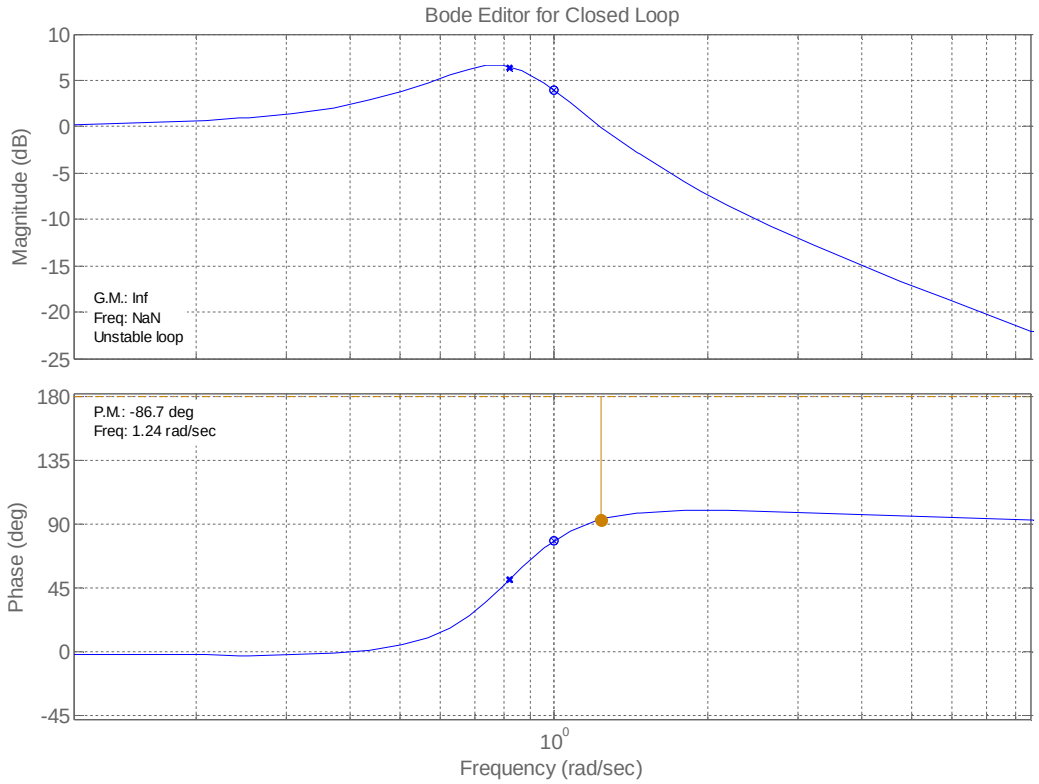


Figura 32: Diagrama de Bode - sistema com tempo morto de 2,0 s e K_p=2

Ponto P_4 (K_p=0,1 e θ=2,0 s): O sistema torna-se estável novamente, com margem de fase maior que 180˚, devido à diminuição do valor de K_p.

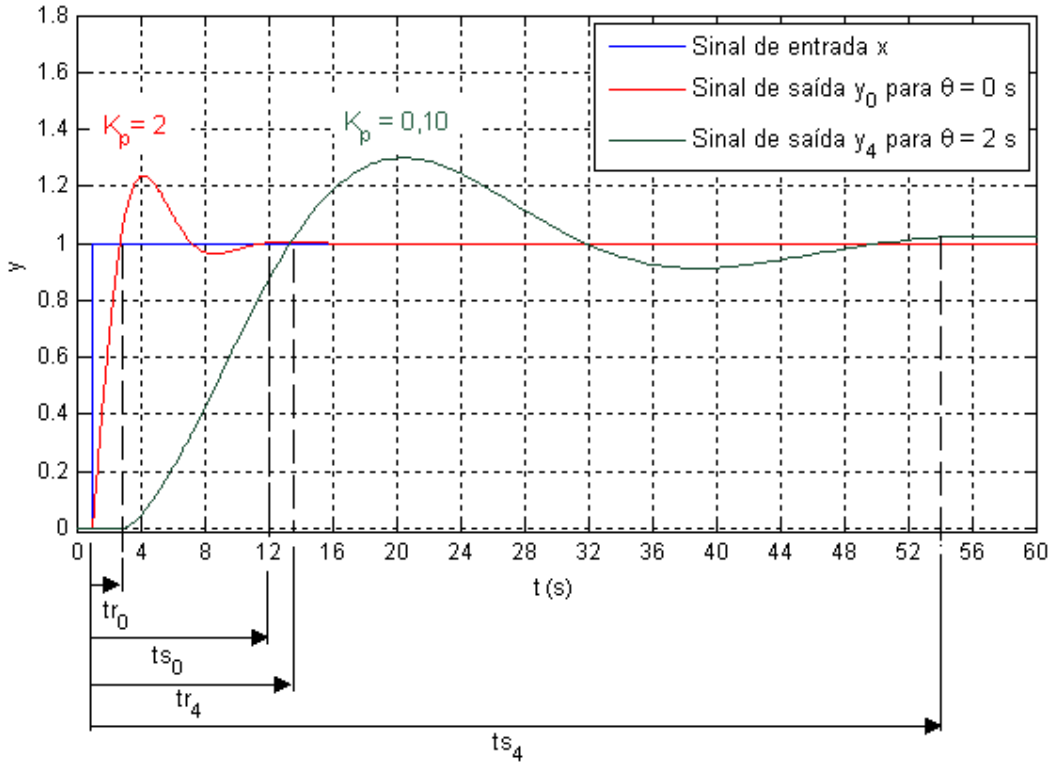


Figura 33: Resposta ao degrau - sistema com tempo morto de 2,0 s e K_p=0,1

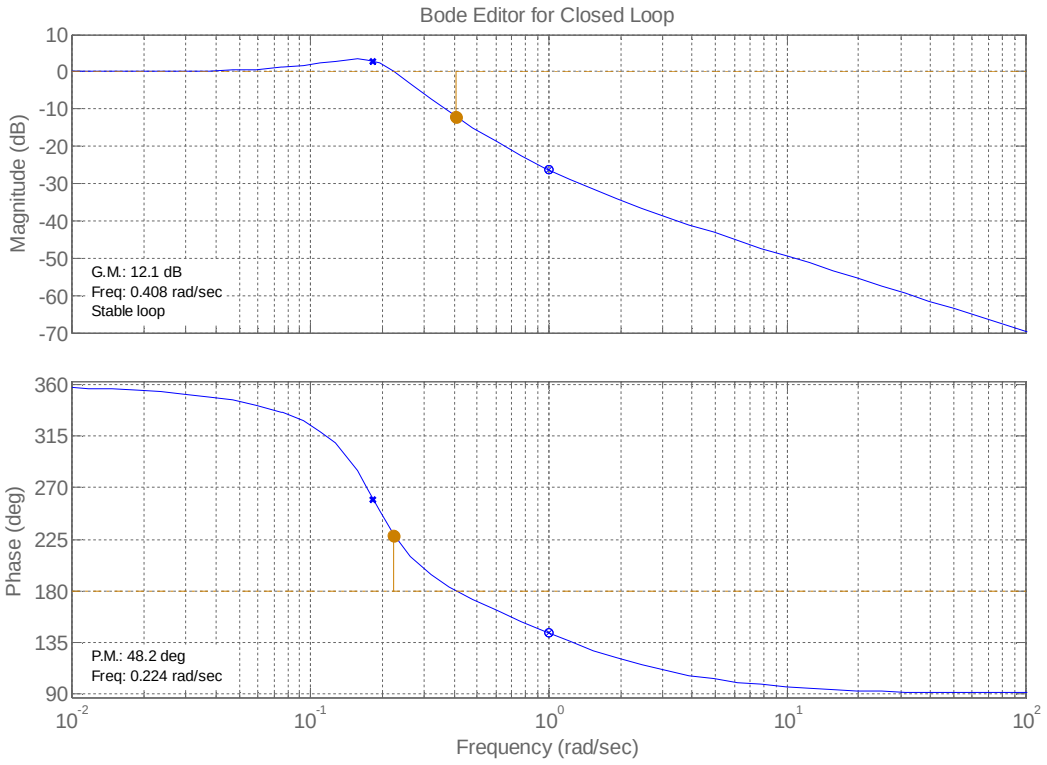


Figura 34: Diagrama de Bode - sistema com tempo morto de 2,0 s e K_p=0,1

No ponto P_4 observa-se que foi necessário alterar o ganho inicial K_p de 2 para 0,1 para resolver a instabilidade causada no sistema devido à presença do tempo morto de 2 s.

Ao se diminuir o valor de K_p houve o comprometimento do desempenho do controlador. Isso é percebido ao se comparar o tempo de subida (*rising time*) do sistema com os parâmetros P_0 e P_4. Da mesma forma o tempo de estabilização (*settling time*) do sistema no ponto P_0 é bem menor que o caso P_4. Isso significa que após uma mudança de *set-point* o sistema demorará muito até que a variável controlada atinja esse novo valor desejado. O controlador também demorará muito para eliminar os efeitos das perturbações

Percebe-se também no gráfico K_p x θ que se ocorrer um aumento do tempo morto, mesmo diminuindo-se o ganho proporcional K_p, este estará muito próximo à curva de estabilidade marginal, fazendo com que qualquer distúrbio que ocorra no sistema o fará passar para a região de instabilidade.

No ponto P_3 o tempo morto causa instabilidade. Portanto, embora o ganho de controle K_p para um sistema de primeira ordem possa ser ajustado em valores elevados na ausência de tempo morto a fim de garantir desempenho adequado, o mesmo não pode ser realizado se houver um tempo morto significativo no sistema.

No ponto P_2 o sistema encontra-se na curva que delimita a passagem do sistema de uma situação estável para instável (estabilidade marginal).

No ponto P_1 percebe-se que ocorre um sobressinal elevado na resposta ao degrau porque o sinal de saída Y(s) chega com atraso ao bloco somador da malha de controle. Dependendo do sistema que está sendo controlado, este pode não suportar esse aumento do sobressinal e ser danificado.

Como foi observado, o tempo morto pode desestabilizar a malha de controle e também comprometer o seu desempenho. Uma forma de minimizar esses efeitos do tempo morto na malha é o emprego do Preditor de Smith.

3.7 Preditor de Smith

Otto J. M. Smith (1957) elaborou uma estratégia para controlar o sistema com tempo morto, projetando um controlador denominado Preditor de Smith.

A ideia desse compensador de tempo morto é incluir na malha de controle, em paralelo ao sistema, o modelo interno do sistema (IMC) de maneira que a entrada ao controlador PID seja uma dinâmica sem tempo morto. Isso permite que o ganho do controlador seja ajustado para um valor bem maior que o possível para o sistema sem essa compensação, melhorando o desempenho.

Representando-se o sistema por G(s) mais tempo morto θ e o seu modelo por $\tilde{G}(s)$ mais tempo morto $\tilde{\theta}$ (Figura 35), demonstra-se o efeito do Preditor de Smith na malha de controle.

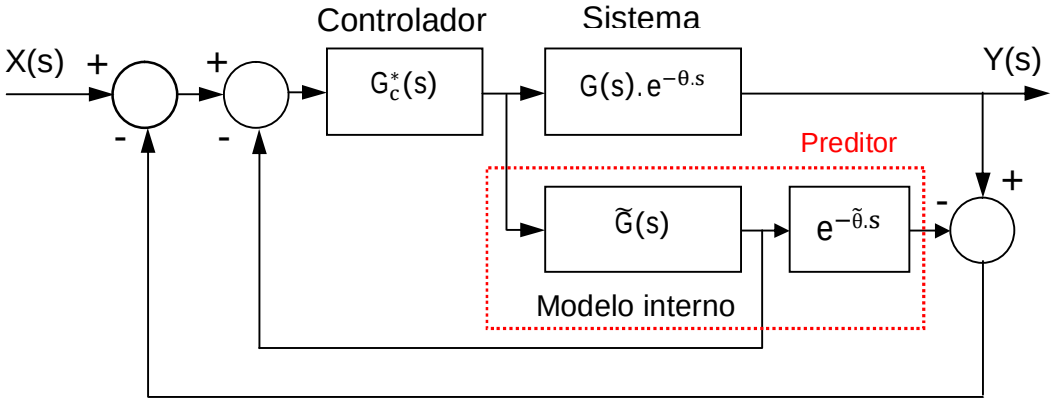


Figura 35: Malha de controle com Preditor de Smith

Pelo agrupamento dos blocos relacionados ao controle PID e Preditor de Smith (Figura 36), formam-se um bloco de controle $G_c(s)$.

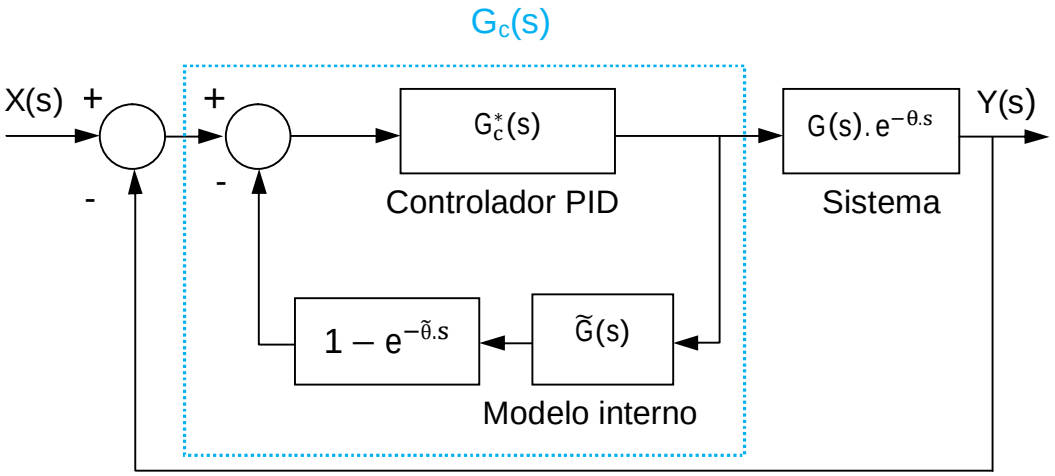


Figura 36: Bloco $G_c(s)$ referente ao controle PID mais Preditor de Smith

Analisando somente a malha interna, tem-se a função de transferência $G_c(s)$:

$$G_c(s) = \frac{G_c^*(s)}{1 + \left(1 - e^{-\tilde{\theta}.s}\right).G_c^*(s).\tilde{G}(s)} \tag{69}$$

Considerando agora somente a malha de controle com o controlador $G_c(s)$, atuando no sistema com tempo morto, temos o seguinte diagrama de blocos:

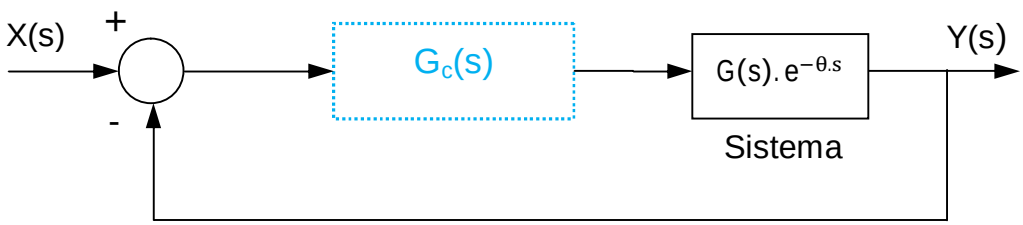


Figura 37: Controlador $G_c(s)$ atuando no sistema com tempo morto

A função de transferência do sistema neste caso é, portanto:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{G_c(s).G(s).e^{-\theta.S}}{1 + G_c(s).G(s).e^{-\theta.S}} \tag{70}$$

Substituindo $G_c(s)$ obtido pela equação (69) na função de transferência do sistema, dada pela equação (70), tem-se:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\dfrac{G_c^*(s).G(s).e^{-\theta.S}}{1+\left(1-e^{-\tilde{\theta}.s}\right).G_c^*(s).\tilde{G}(s)}}{\dfrac{1+\left(1+e^{-\tilde{\theta}.s}\right).G_c^*(s).\tilde{G}(s)+G_c^*(s).G(s).e^{-\theta.S}}{1+\left(1-e^{-\tilde{\theta}.s}\right).G_c^*(s).\tilde{G}(s)}} \tag{71}$$

Obtendo-se a função de transferência de um sistema de controle com compensação de tempo morto pelo Preditor de Smith.

$$\boxed{\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{G_c^*(s).G(s).e^{-\theta.S}}{1 + \left(1 - e^{-\tilde{\theta}.s}\right).G_c^*(s).\tilde{G}(s) + G_c^*(s).G(s).e^{-\theta.S}}} \tag{72}$$

Caso o modelo seja igual ao sistema real tem-se $\tilde{G}(s) = G(s)$ e $\tilde{\theta} = \theta$, substituindo na (72), a função de transferência fica:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{G_c^*(s).G(s).e^{-\theta.S}}{1 + (1 - e^{-\theta.S}).G_c^*(s).G(s) + G_c^*(s).G(s).e^{-\theta.S}} \tag{73}$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{G_c^*(s).G(s).e^{-\theta.S}}{1 + G_c^*(s).G(s)(1 - e^{-\theta.S} + e^{-\theta.S})} \tag{74}$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{G_c^*(s).G(s)}{1 + G_c^*(s).G(s)} e^{-\theta.S} \tag{75}$$

Cuja representação em diagrama de blocos é:

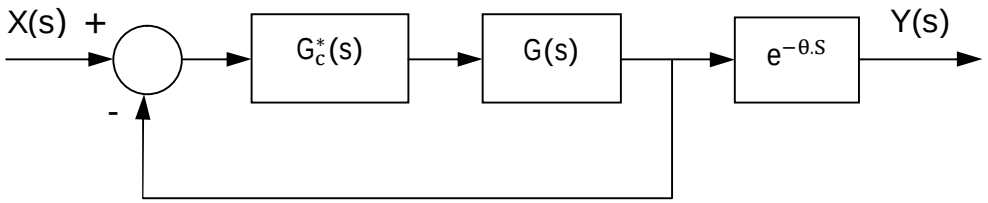


Figura 38: Sistema resultante quando o modelo for igual ao sistema real

Ou seja, se colocarmos um controle PID com Preditor de Smith em um sistema com tempo morto θ, cujo modelo é conhecido perfeitamente, a resposta será a mesma desse sistema sem tempo morto, acrescida de um atraso θ (Figura 38). Isso significa que, nesse caso, a variável controlada pelo PID depende apenas da dinâmica do processo sem tempo morto.

Para um sistema de primeira ordem com tempo morto a sintonia da malha de controle pode ser feita pelos parâmetros do controlador IMC, mostrados anteriormente na Tabela 1.

Se no controle do sistema de primeira ordem com tempo morto de 2 s mostrado no item anterior fossem conhecidos perfeitamente os parâmetros do sistema e utilizado o Preditor de Smith, este apresentaria uma resposta ao degrau conforme a seguir (Figura 39).

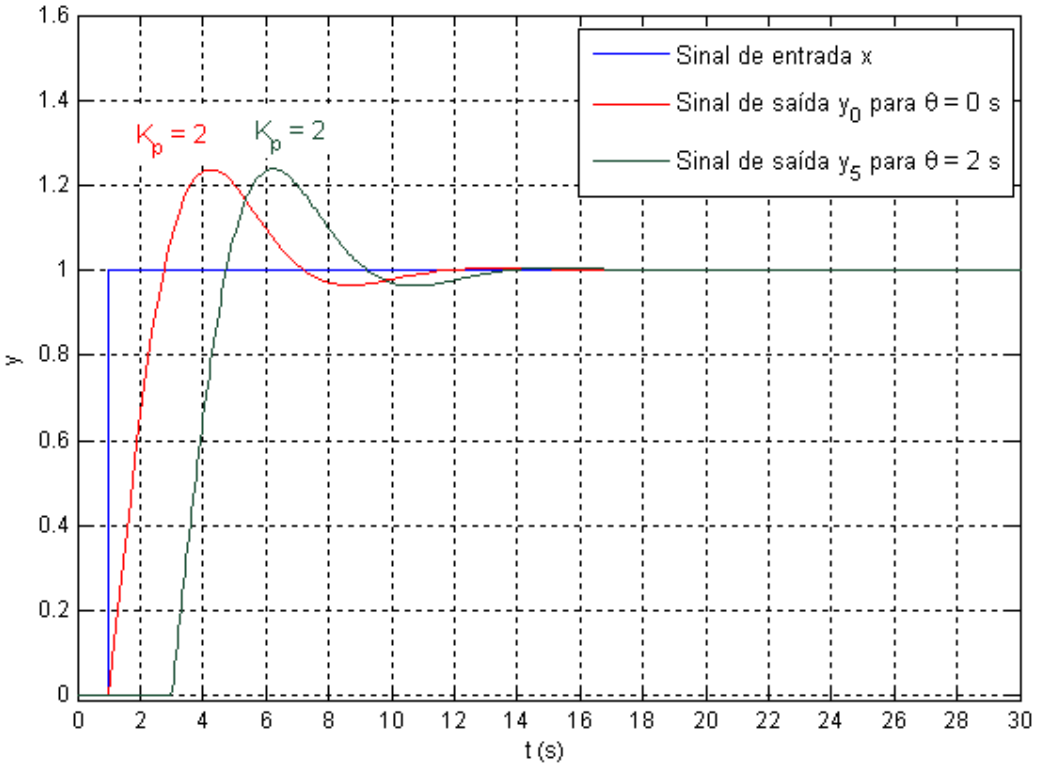


Figura 39: Resposta do sistema com tempo morto com o Preditor de Smith

Na prática não é possível construir um modelo para o Preditor que seja totalmente idêntico à dinâmica do sistema. Portanto, deve-se considerar que essa estratégia não é capaz de anular completamente o tempo morto. Mesmo assim, consegue-se com esse compensador melhorar consideravelmente o desempenho dos controladores PID aplicados a processos com tempo morto elevado.

3.8 Espectros de Velocidade de Vento

A velocidade do vento pode ser considerada como a soma de uma velocidade média constante com uma componente flutuante com variações lentas e rápidas (rajadas), esta última modelada por uma função de densidade espectral de potência. O ajuste do espectro é feito a partir de dados obtidos da medição da velocidade do vento para um padrão de elevação acima do nível do mar, tal como 10 m e em um específico período de tempo, por exemplo, 1 h.

Vários modelos foram desenvolvidos para representar padrões de densidade espectral de rajadas de vento tais como o de Harris, o de Davenport, o NPD, o API-RP2A, etc. No presente trabalho será utilizado o espectro de Ochi & Schin (OTC, 1988) para a avaliação do desempenho do sistema de geração de vento proposto. Este modelo representa as rajadas de acordo com a expressão:

$$S(f^*) = \begin{cases} 583.f^* & \text{para } 0 \leq f^* \leq 0{,}003 \\ \dfrac{420.f^{*0{,}7}}{(1 + f^{*0{,}35})^{11{,}5}} & \text{para } 0{,}003 \leq f^* \leq 0{,}1 \\ \dfrac{838.f_*}{(1 + f^{*0{,}35})^{11{,}5}} & \text{para } 0{,}1 \geq f^* \end{cases} \tag{76}$$

Com frequência e densidade espectrais adimensionais dadas por:

$$f^* = \frac{f.z}{\overline{U}_z} \tag{77}$$

$$S(f^*) = \frac{f.S(f)}{u^{*2}} \tag{78}$$

f é a frequência em Hz;

z é a altura acima do nível do mar em m;

$\overline{U}_z$ é a velocidade média do vento a uma altura z em m/s;

f* é a frequência adimensional;

S(f) é a densidade espectral de energia em m^2/s;

u* é a velocidade adimensional de cisalhamento do vento em m/s.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção, descreve-se inicialmente o aparato experimental utilizado no trabalho, compreendendo o sistema de geração e medição de vento instalado no Laboratório do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da USP. As especificações técnicas completas de todos os componentes utilizados nos experimentos são apresentadas no anexo 1.

Em seguida, são apresentados os ensaios realizados no laboratório com o objetivo de identificar o comportamento do sistema em malha aberta. Os resultados obtidos serão utilizados no capítulo 5 no qual será mostrada a elaboração de um modelo adequado para esse sistema.

4.1 Arranjo Experimental

O arranjo experimental consiste de um ventilador disposto no centro do tanque (Figura 40), cuja velocidade é controlada por um inversor de frequência. Um programa desenvolvido em linguagem *Matlab / Simulink* envia sinais a uma placa de aquisição de dados, cuja saída é conectada ao inversor de frequência acionando o ventilador. Posicionado a uma determinada distância D, um sensor mede a velocidade do vento na saída do ventilador e envia esse sinal através de um conversor RS422/USB ao computador.

Figura 40: Ventilador no centro do tanque com sensor para medição

4.1.1 Sensor

Para a medição de velocidade do vento foi utilizado o anemômetro de ressonância acústica (Figura 41). Para transmitir os dados ao computador, este foi conectado a um conversor USB/RS422 e ligado a uma fonte de 15 VDC. O sensor foi posicionado num suporte em frente ao ventilador.

Figura 41: Anemômetro utilizado no ensaio

O anemômetro recebe o comando de leitura enviado pelo computador e o armazena em um *buffer* (memória interna), levando no mínimo 50 ms para interpretar e processar essa informação. Considerando que o menor intervalo de leitura da velocidade do vento é de 200 ms, tem-se no mínimo 250 ms nesse ciclo de aquisição de dados do sensor. Esse atraso de leitura somado a outros do sistema compõem o atraso devido à automação e pode comprometer o desempenho do mesmo, podendo levar à instabilidade da malha de controle, conforme verificado em fundamentos teóricos.

4.1.2 Ventilador

Utilizou-se para ensaio o ventilador localizado no centro do tanque (Figura 42). A tensão de saída trifásica de 220 VAC do inversor de frequência foi ligada ao ventilador, observando-se o sentido de giro. Acoplado ao ventilador existe uma estrutura tipo colmeia para alinhar o fluxo de vento na sua saída.

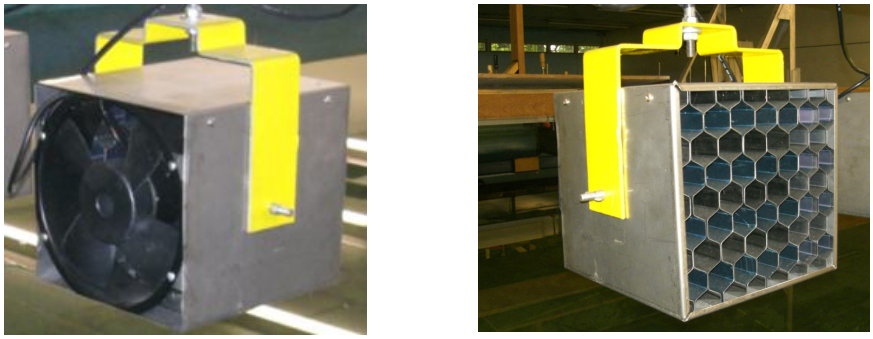


Figura 42: Ventilador acoplado à estrutura tipo colmeia

4.1.3 Inversor de Frequência

Para controle de velocidade do motor do ventilador foi utilizado inicialmente o inversor de frequência #1. Como se verificou após os ensaios, este inversor não atingiu os resultados esperados por não apresentar um controle adequado no instante de desaceleração do motor. Assim, optou-se pelo inversor #2, que por ser mais robusto apresentou um desempenho melhor.

Figura 43: Inversores de frequência utilizados, #1 (esquerda) e #2 (direita)

4.1.4 Resistor de Frenagem

Quando o motor é desacelerado, a energia cinética converte-se em energia elétrica e retorna ao inversor de frequência, sendo armazenada nos capacitores do barramento DC (corrente contínua). Como resultado, a tensão nesse barramento DC aumenta, podendo ultrapassar o limite de sobretensão. Com a instalação do resistor de frenagem (Figura 44), um circuito interno do inversor denominado *chopper* dissipa o excesso de energia nesse resistor, de modo a proteger o inversor (frenagem reostática).

Figura 44: Resistor de frenagem usado no inversor #2

4.1.5 Sistema de Envio e Aquisição de Dados

Para envio de sinal à entrada remota do inversor foi utilizada uma placa de envio e aquisição de dados - DAQ (Figura 45). Como o valor máximo do sinal de saída dessa placa é de 5 VDC e a entrada remota do inversor recebe sinal de valor até 10 VDC, foi projetado um conversor para amplificar esse sinal.

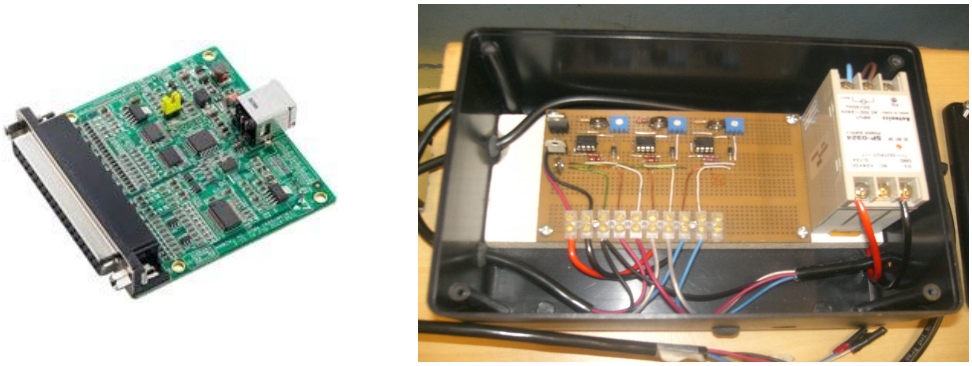


Figura 45: Placa DAQ e conversor 5/10 VDC

Para a recepção do sinal do anemômetro foi utilizado inicialmente um conversor USB/RS422 que era suscetível à interferência conduzida pela rede elétrica. Assim, optou-se por outro modelo de conversor (Figura 46), que apresenta blindagem contra ruídos em suas portas de comunicação.

Figura 46: Conversor USB/RS422

Destaca-se que o problema de interferência eletromagnética no sistema de controle de ventiladores também foi relatado por Singh e Poddar (INDICON, 2008). Naquele trabalho, a solução adotada foi a interligação dos módulos e dispositivos por meio de cabos de fibra óptica que possui imunidade ao ruído elétrico e eletromagnético.

4.1.6 Programa de Envio e Aquisição de Dados

Para o ensaio de identificação do sistema, elaborou-se no *software* de simulação numérica um algoritmo em malha aberta. Este consiste num bloco de envio de sinais do computador à placa de aquisição de dados, cuja saída é conectada por um conversor 5/10 VDC à entrada do inversor de frequência que aciona o ventilador. O sinal de velocidade do vento medido pelo anemômetro é enviado ao computador através do conversor USB/RS422 e é tratado pelo bloco de recepção do algoritmo desenvolvido (Figura 47).

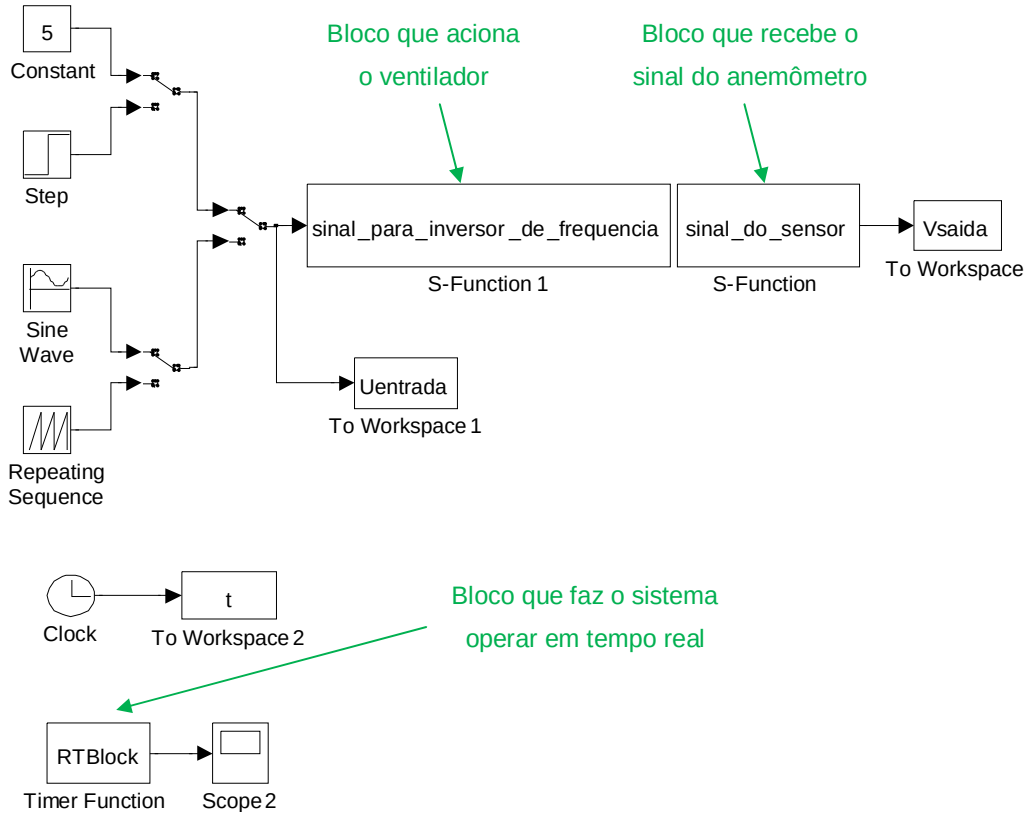


Figura 47: Blocos de envio e aquisição de sinais pelo computador

O algoritmo para envio e aquisição de sinais foi desenvolvido seguindo as orientações de Komáromi, Pilászy e Móczár (2010):

- Em um sistema que opera em tempo real, o tempo de execução do cálculo do sinal de controle na malha deve ser menor que o período de amostragem, senão podem ocorrer falhas, como o travamento do *software* de simulação;

- Além da restrição de tempo devido ao período de amostragem, deve ser assegurado que a frequência de amostragem seja constante;

- Para uma operação apropriada, a execução de algoritmos e funções no *software* de simulação numérica e no *software* embarcado tem que estar sincronizada. Se houver, por exemplo, operações de escrita e leitura, essas funções só retornarão ao programa principal apenas quando forem executadas por completo e nesse período as tratativas do programa principal são bloqueadas.

Assim, neste projeto, para a execução do sistema proposto em tempo real, foi utilizado no *software* de simulação um bloco desenvolvido por Daga (2007), que consiste de uma função escrita em linguagem C++. Nesse bloco foi inserida uma taxa de amostragem de 200 ms, valor esse que corresponde ao ciclo de leitura do sensor e que respeita todas as orientações mencionadas anteriormente.

4.1.7 Aparato Geral

O diagrama geral do ensaio é apresentado na Figura 48. Uma porta USB do computador foi conectada à placa DAQ que está ligada ao conversor de sinal de 5 para 10 VDC. A saída deste conversor foi conectada à entrada do inversor de frequência #1, configurado para comando remoto.

Pelo computador, foi enviado um sinal de 5 VDC para a placa DAQ que passou pelo conversor de sinal e foi aplicado à entrada remota do inversor de frequência. No conversor, o nível do sinal foi ajustado através de um *trimpot* de modo a se obter na saída do inversor uma tensão trifásica com frequência de 60 Hz, que é o valor nominal do motor do ventilador.

Isso significa que variar o valor de tensão de saída através de um bloco de simulação de 0 a 5 VDC corresponde a variar na saída do inversor o valor de frequência de 0 a 60 Hz e assim variar a velocidade do ventilador de acordo com a aplicação desejada.

Outra porta USB do computador foi conectada ao conversor USB/RS422 e este à saída do anemômetro.

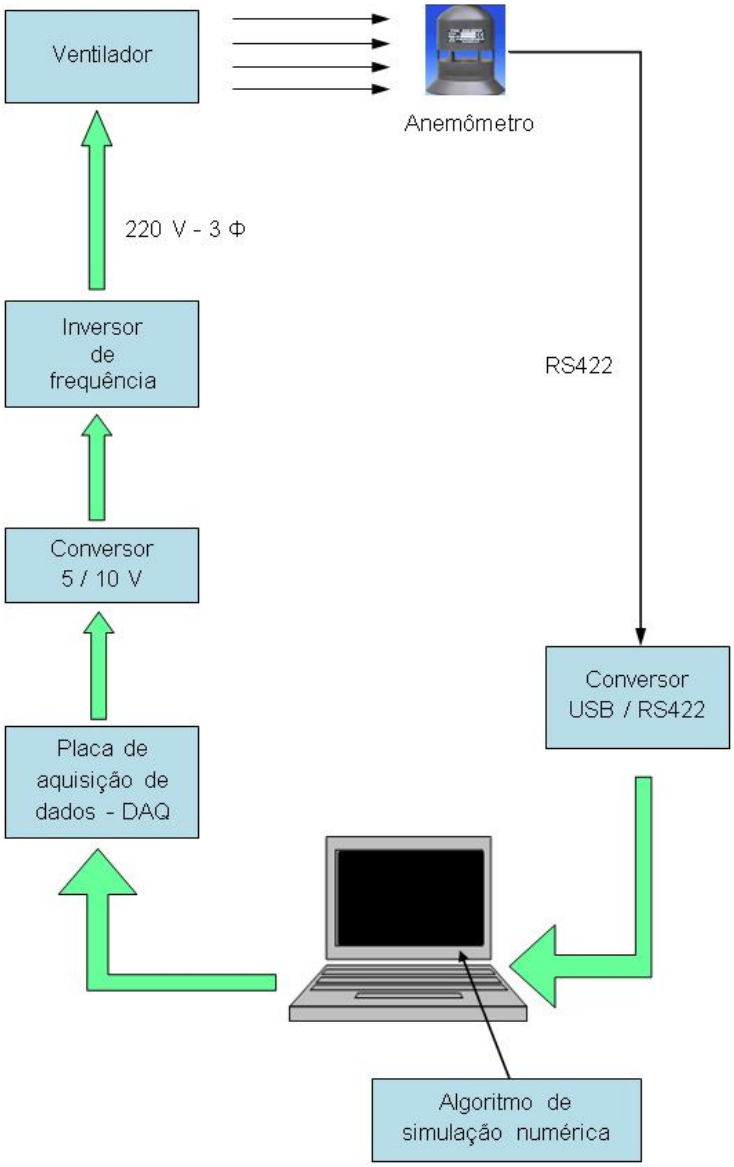


Figura 48: Diagrama geral do sistema montado para ensaio

A montagem dos dispositivos para ensaio é mostrada na Figura 49.

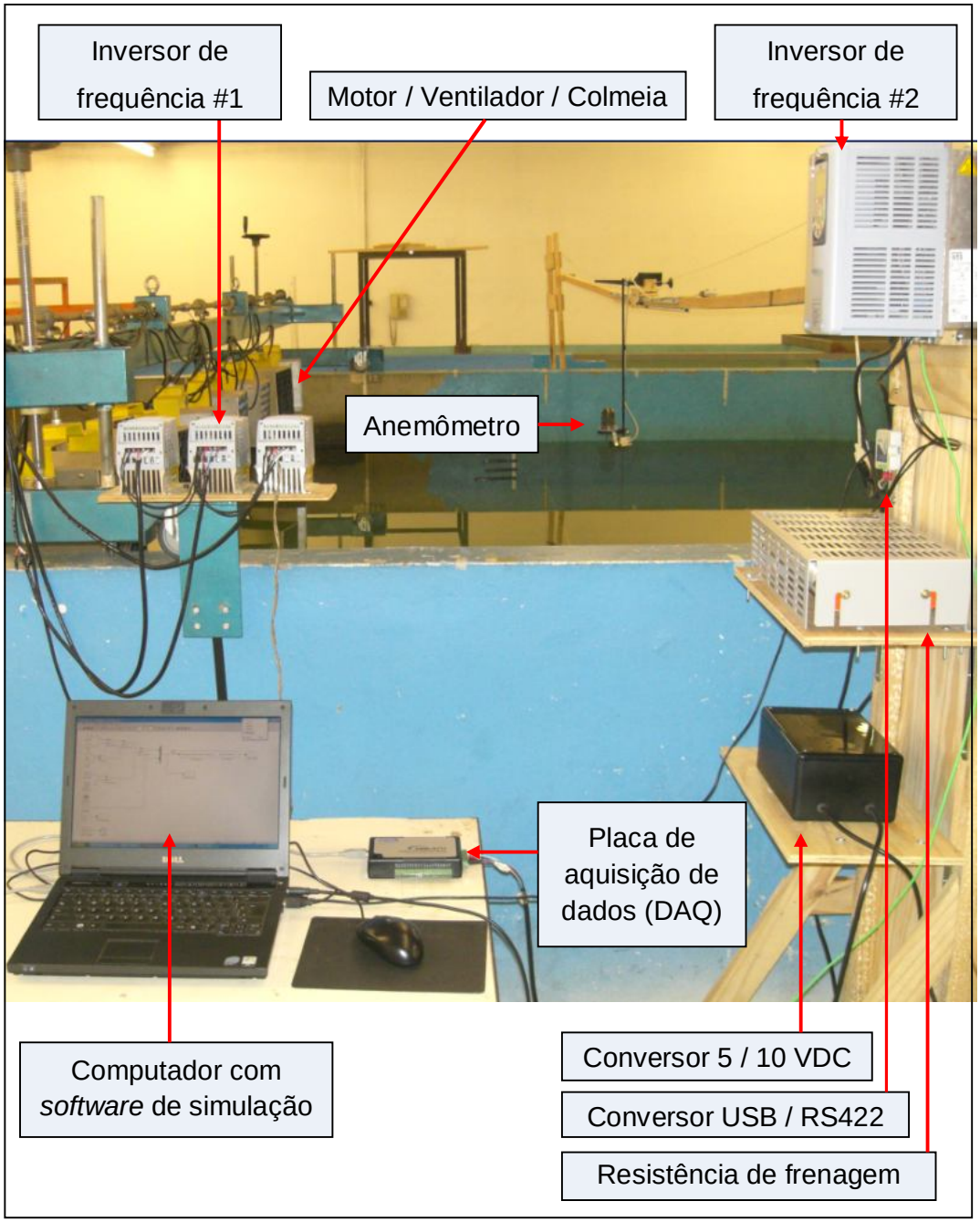


Figura 49: Montagem dos dispositivos para ensaio

4.2 Procedimento de Ensaio

4.2.1 Alinhamento do Sensor com o Ventilador

Para a execução dos ensaios foi realizado inicialmente o alinhamento do sensor com o eixo do ventilador (Figura 50) utilizando-se um cabo de aço horizontal posicionado transversalmente ao tanque.

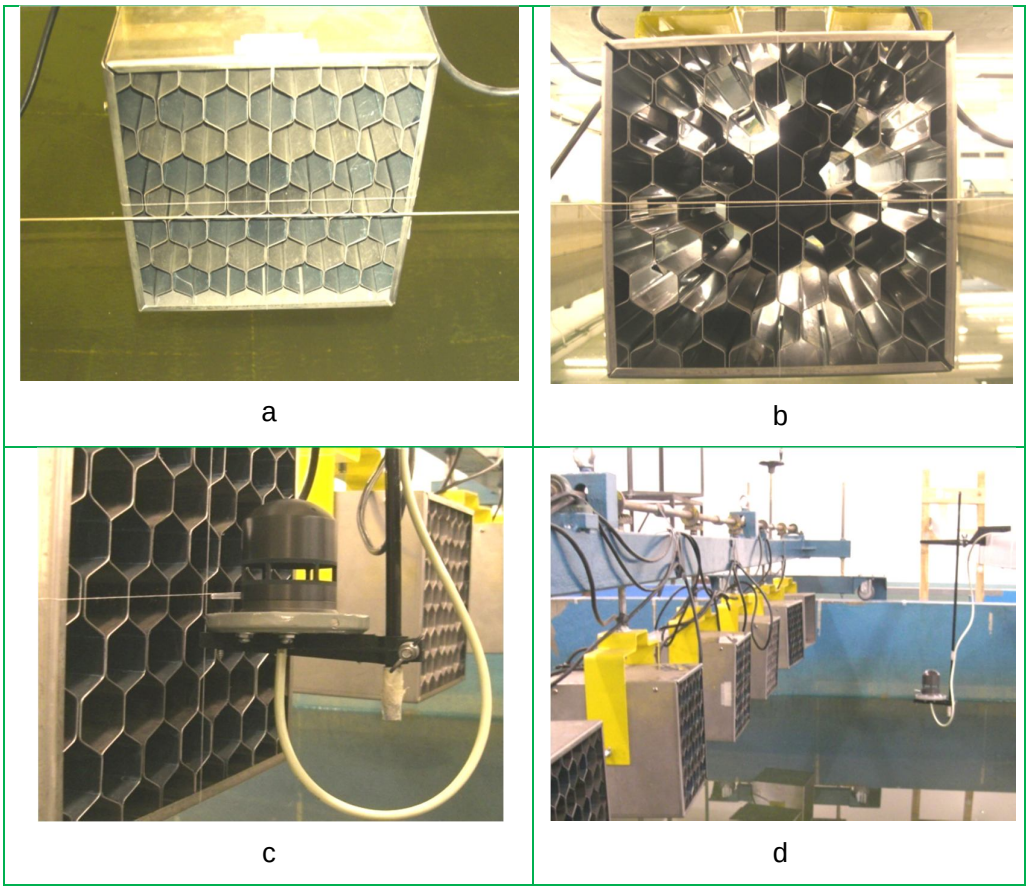


Figura 50: Alinhamento do sensor com o ventilador

Foram realizados os seguintes passos para posicionar o sensor com o centro do ventilador:

- Alinhamento angular da colmeia com o cabo de aço (Figura 50 a);

- Alinhamento horizontal do centro da colmeia com o cabo de aço (Figura 50 b);

- Alinhamento do sensor com o centro da colmeia (Figura 50 c);

- Posicionou-se o carro a 0,5 m do sensor e acionou-se o ventilador, verificando que o ângulo de incidência do vento ficou em 0º, indicando que o sensor encontra-se alinhado como o conjunto ventilador / colmeia (Figura 50 d).

Em seguida, foram obtidas amostras do perfil de vento gerado pelo ventilador em 5 distâncias D ao longo do tanque (eixo X) em 5,0 cm, 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m e 2,0 m. Para cada uma dessas distâncias identificou-se a posição em relação ao centro do ventilador (Eixo Y) na qual o sensor obteve o valor máximo da velocidade do vento (Figura 51).

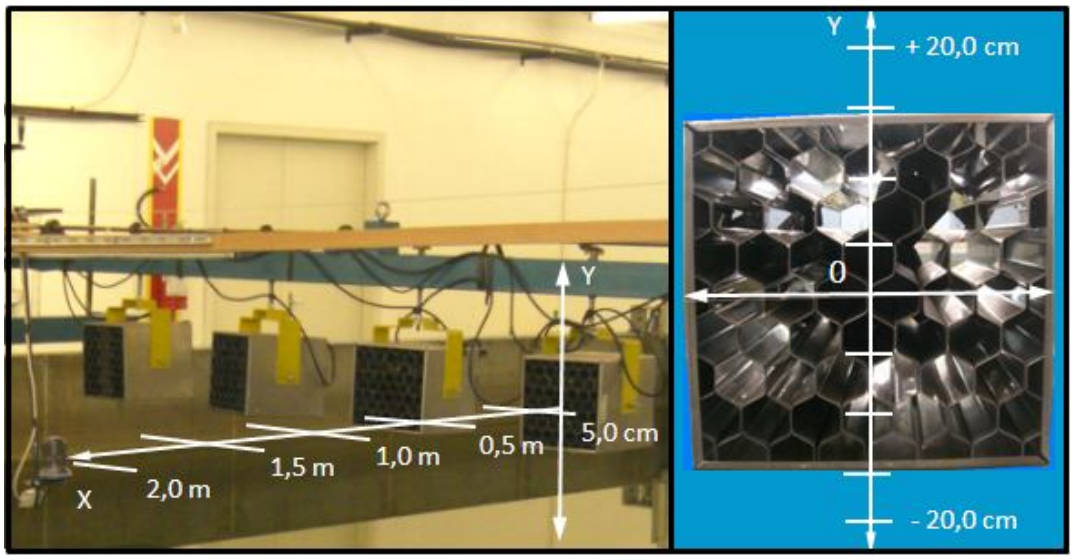


Figura 51: Posicionamento do sensor ao longo do tanque

Definida a posição vertical (Y) de máxima velocidade de vento, foram aplicados na entrada da malha vários sinais do tipo degrau para que se pudesse analisar a resposta dinâmica e assim identificar o sistema.

4.2.2 Mapeamento do Campo de Velocidade do Vento

Neste ensaio, obteve-se a posição vertical (no eixo Y) em que a velocidade do vento é máxima para cada distância do sensor em relação ao ventilador. O carro com o conjunto de ventiladores foi posicionado no tanque nas distâncias de 5,0 cm, 0,5 m; 1,0 m; 1,5 m e 2,0 m do anemômetro e foi aplicado um sinal constante de 5 VDC na entrada da malha, fazendo o inversor acionar o ventilador do centro do tanque na sua frequência nominal de 60 Hz.

A cada distância considerada, o ventilador foi erguido em passos de 0,5 cm e para cada posição foi registrada a intensidade do vento em um período de 10 s, calculando-se os seus valores médios no final do ensaio.

Com esses valores elaborou-se o gráfico com as curvas que definem o perfil de velocidade do vento ao longo do tanque, representando nele a posição onde se situa a estrutura da colmeia do ventilador (Figura 52). Neste gráfico há o eixo que indica a distância de um determinado ponto em relação ao centro do ventilador, há o eixo que indica a posição desse ponto no tanque em relação ao ventilador e há o eixo que indica a intensidade do vento nesse ponto.

Verifica-se na área frontal à colmeia, que a velocidade do vento nessa região é mais intensa e decai conforme o ponto de medida se afasta da mesma.

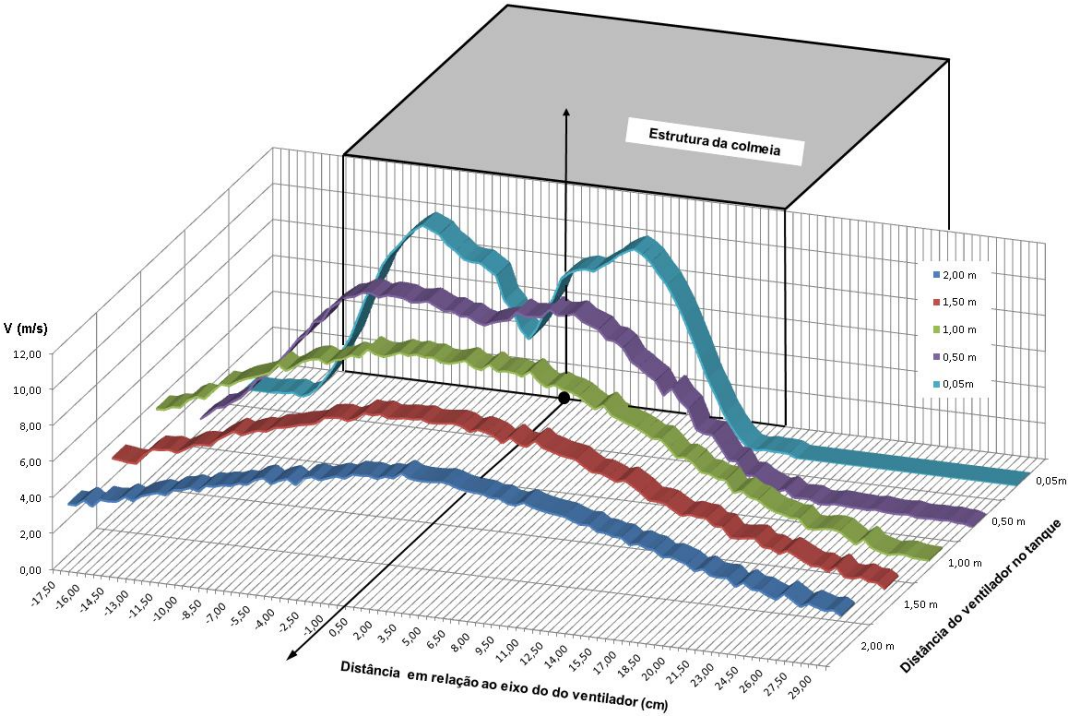


Figura 52: Perfil frontal de vento obtido ao longo do tanque de prova

Observando agora as curvas dos perfis de velocidade de vento a partir da frente da colmeia, tem-se o gráfico apresentado na Figura 53. Neste gráfico, a região que delimita a colmeia está representada pela linha pontilhada.

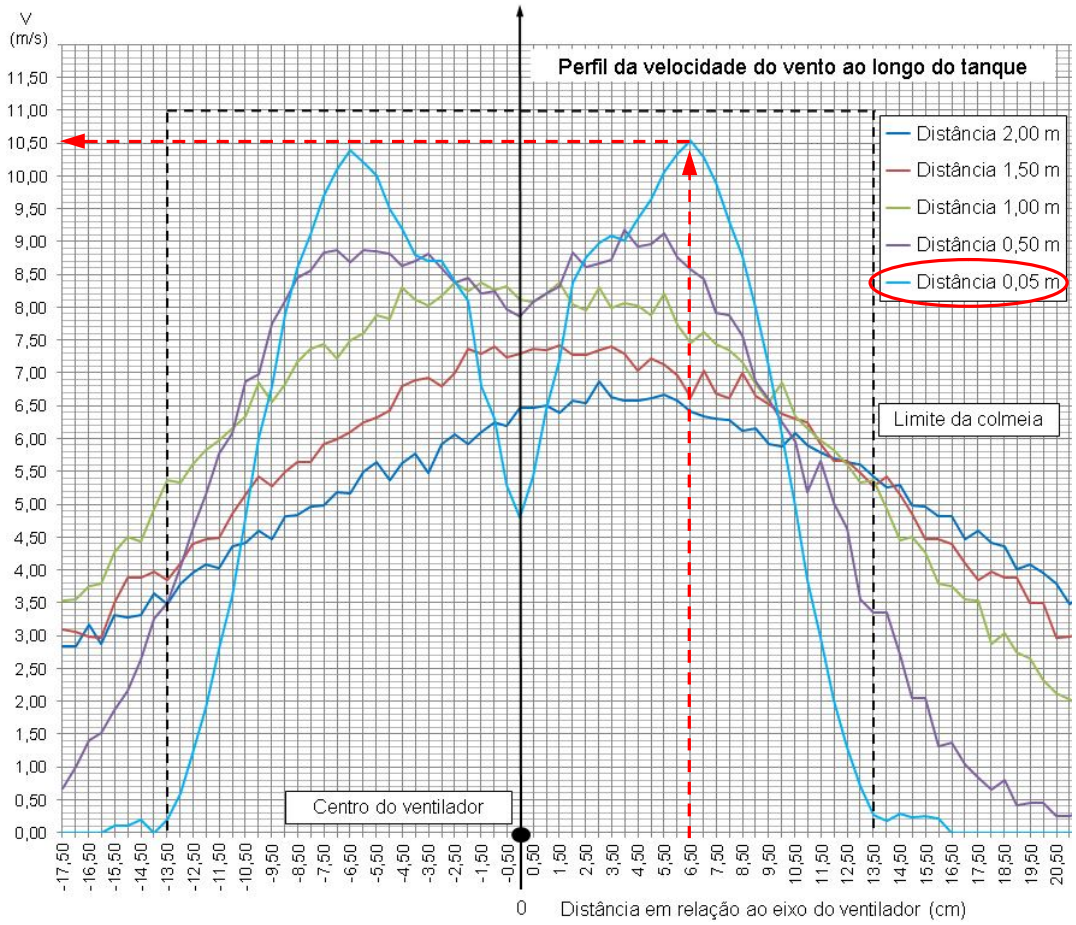


Figura 53: Velocidade do vento a partir do centro do ventilador

.

Verifica-se no gráfico, por exemplo, que para o sensor posicionado no tanque a 5,0 cm do ventilador, a velocidade máxima do vento é de 10,5 m/s, num raio de 65 mm do centro do ventilador e que corresponde ao ponto na pá da hélice do ventilador (Figura 54).

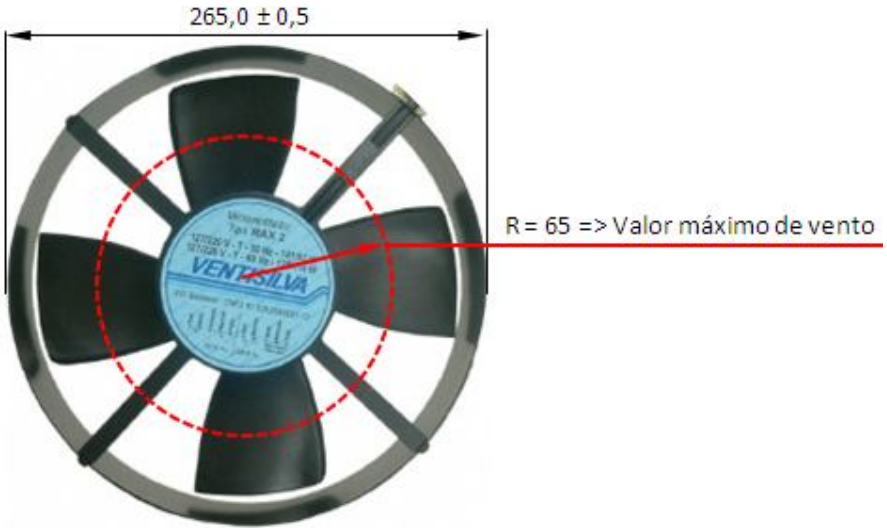


Figura 54: Ponto na hélice onde a velocidade do vento é máxima

Na entrada do sistema em malha aberta foram aplicados valores de tensão de 1 a 5 V e mediram-se as respectivas velocidades do vento gerado pelo ventilador. Isso foi feito para cada distância D entre o sensor e o ventilador, elaborando-se um gráfico (Figura 55).

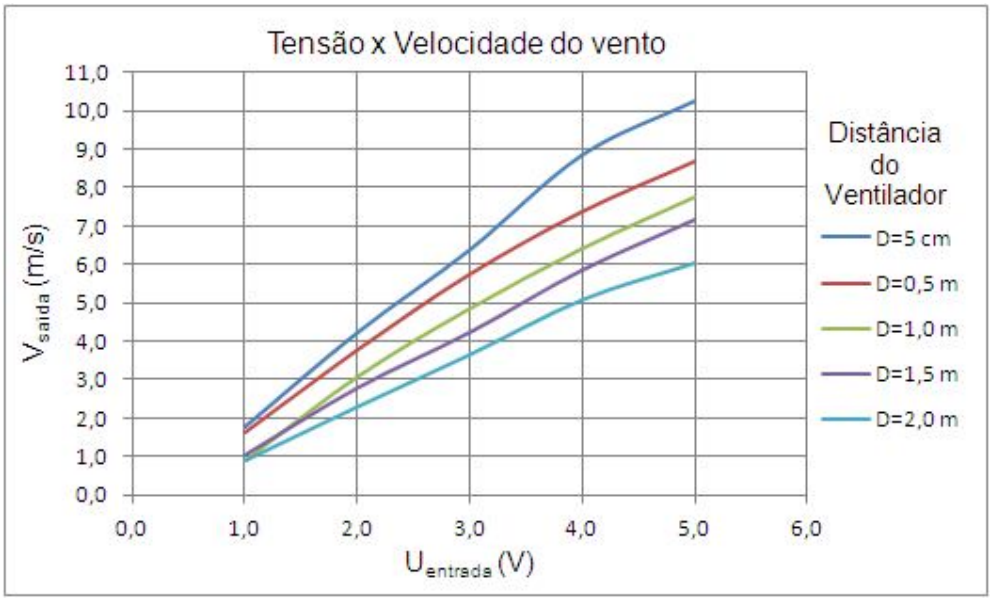


Figura 55: Tensão x Velocidade do vento para cada distância do ventilador

No início dos ensaios observou-se, ao aplicar valores abaixo de 2 V, que a resposta do sistema não se comportava de forma linear. Nota-se no gráfico, por exemplo, que a aplicação de 1 V na entrada do sistema implica numa velocidade do vento de 1 m/s a 1,0 m do ventilador, mesmo valor para as distâncias de 1,5 m e 2,0 m, que deveria ser diferente, em razão da variação da distância influenciar na intensidade do vento. Por esse motivo os ensaios foram realizados com aplicação de degrau de tensão a partir de 2 V.

4.3 Descrição dos Ensaios de Identificação do sistema

4.3.1 Ensaios de Resposta ao Sinal Degrau

Para obter a função de transferência do sistema que será usada posteriormente na elaboração de sua malha de controle, aplicaram-se na sua entrada sucessivos sinais do tipo degrau, de subida e de descida conforme metodologia mostrada no item 3.3.

Assim, ao longo do tanque de prova, para cada distância D entre o sensor e o ventilador (5 cm, 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m e 2,0 m) foram aplicados na entrada do sistema sinais do tipo degrau de valores 2, 3, 4 e 5 V ($U_{entrada}$), acionando o ventilador. Foi obtida a curva de resposta do sistema pela medição do sinal do sensor ($V_{saída}$).

Foram feitos três ensaios para cada sinal de entrada aplicado, conforme recomenda a metodologia apresentada no item 3.3, de modo a considerar como resultado a média dos parâmetros obtidos nesses ensaios.

Apresentam-se como exemplo para análise as curvas de resposta do sistema obtidas ao se aplicar um degrau de 5 V com o sensor colocado a uma distância D de 5 cm do ventilador (Figura 56).

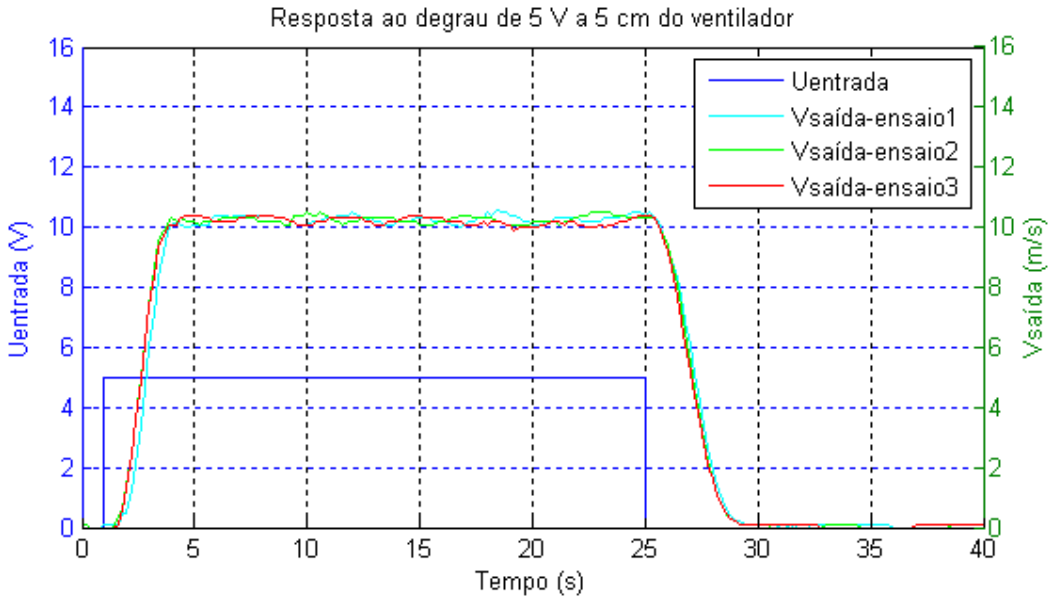


Figura 56: Sinal degrau de 5 V, D=5 cm

A curva de resposta do sistema obtida assemelha-se à mostrada na Figura 19. Por esse motivo, foi realizada a sua aproximação para um modelo de sistema de primeira ordem mais tempo morto descrita na seção 3.3, obtendo-se pelas equações (21), (28) e (29), os parâmetros θ, τ e K (valores médios para as curvas obtidas nos três ensaios). Esses parâmetros representam a dinâmica do sistema nessa posição no tanque.

Os valores médios dos parâmetros calculados foram os seguintes:

- K = 2,05 m/s/V, ganho do sistema, obtido pela relação $V_{saída}$ / $U_{entrada}$;

- θ = 0,97 s, atraso em relação ao instante da aplicação do degrau de subida;

- τ = 0,90 s, tempo de subida após aplicação do degrau;

- θ_d = 1,07 s, atraso em relação ao instante da aplicação do degrau de descida;

- τ_d = 1,20 s, tempo de descida após aplicação do degrau.

Verifica-se que o tempo de descida τ_d é um pouco maior que o de subida τ, isso porque na desaceleração o inversor de frequência tem que aplicar um conjugado de frenagem para poder realizar uma desaceleração mais rápida. Para isso, a energia regenerada pelo motor é armazenada internamente no inversor de frequência, em capacitores, aumentando a tensão de barramento desse inversor e, caso exceda seu valor limite de tensão, será dissipada no conjunto de resistências montados externamente (frenagem reostática).

Outro fato a considerar é que, devido o sensor estar bem próximo do ventilador, o atraso de transporte praticamente não existe neste caso. Parte dos atrasos θ e θ_d verificados, em torno de 1,0 s, deve-se à automação do sistema, entre eles o modo como foi configurada a recepção dos dados do sensor: O *software* solicita os dados de velocidade do vento lidos pelo sensor e aguarda este retornar os valores antes de fazer uma nova solicitação de envio. Conforme visto, leva-se no mínimo 250 ms para solicitar e receber os dados de velocidade lidos pelo sensor.

Toma-se, a seguir, outro exemplo para análise, as curvas de resposta obtidas ao aplicar-se um degrau de 5 V com o sensor colocado a uma distância maior do ventilador, de 2,0 m (Figura 57).

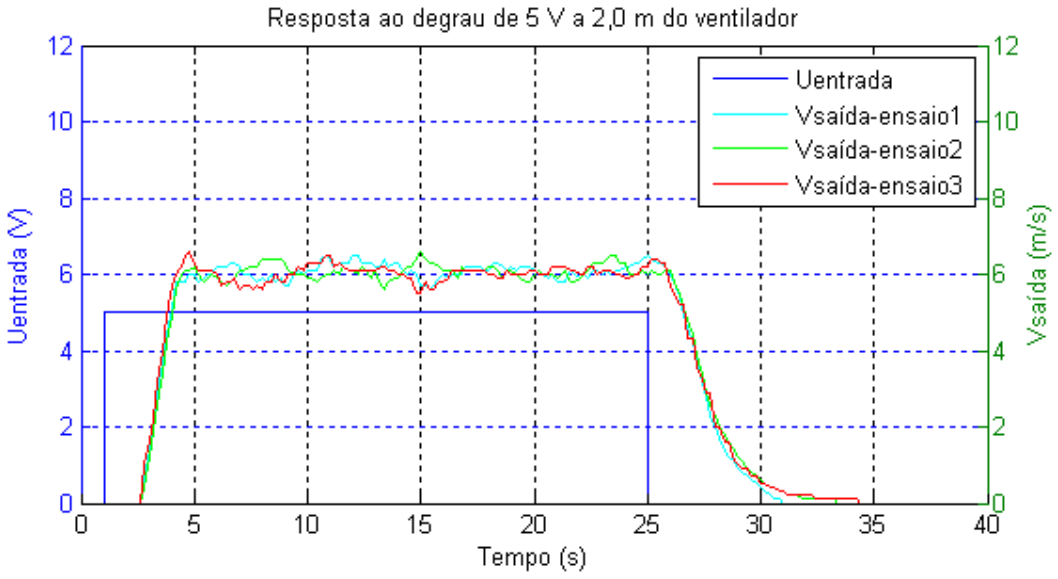


Figura 57: Sinal degrau de 5 V, D=2,0 m

Neste caso, os valores médios dos parâmetros calculados são os seguintes:

- K = 1,21 m/s/V;

- θ = 1,73 s;

- τ = 0,80 s;

- θ_d = 1,30 s;

- τ_d = 1,50 s.

Comparando os tempos de subida τ e de descida τ_d obtidos para a distância de 2,0 cm com os obtidos para a distância de 5 cm, verifica-se que não há grande diferença de valores. Já para os atrasos θ e θ_d nota-se que eles dependem da distância, pois seus valores aumentaram em relação aos obtidos para a distância de 5 cm. Agora, o atraso de transporte se tornou significativo.

O ganho K do sistema agora é 1,21 m/s/V, ou seja, a queda do ganho significa que a velocidade do vento diminui à medida que se afasta do ventilador.

Também se constata no gráfico que à medida que se afasta o sensor do ventilador para a distância de 2,0 m, o valor de velocidade registrado pelo sensor já não é tão constante. Há uma maior oscilação temporal, em relação aquele mostrado para a distância de 5 cm, em razão do escoamento de ar torna-se mais turbulento.

Uma observação a ser feita é que foi utilizado inicialmente nos ensaios o inversor de frequência #1 que não tinha capacidade suficiente de absorver a energia regenerada pelo motor, limitando-se a aplicar um conjugado de frenagem que variava de 10 a 35% do conjugado nominal desse motor. Não havia também a possibilidade de utilização da frenagem reostática.

Assim, por exemplo, na aplicação de um degrau de 4 V, foi obtido um tempo de descida τ_d de 2,3 s, maior que o tempo de subida τ de 0,9 s, conforme Figura 58. Percebe-se na curva que o conjunto motor/ventilador está desacelerando devido mais à sua inércia do que devido à atuação do controle do inversor.

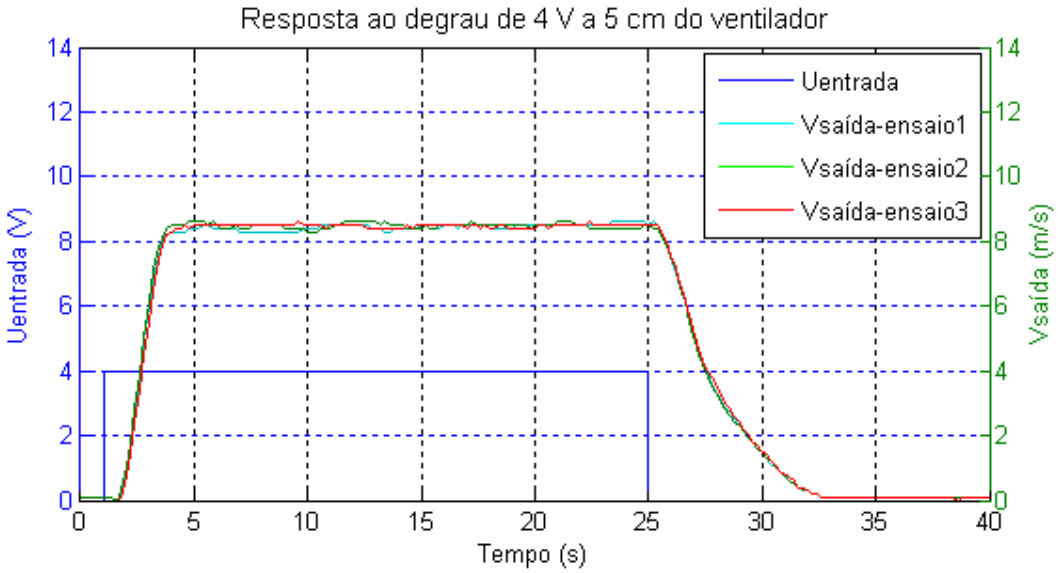


Figura 58: Sinal degrau de 4 V, D=5 cm (Utilizando inversor #1)

Por esse motivo, todos os ensaios foram realizados com o inversor #2 que possibilitou um controle melhor da frenagem do motor.

Todas as curvas de resposta obtidas na aplicação de sinal degrau, com o sensor posicionado nas distâncias de 5 cm, 0,5 m, 1,5 m e 2,0 m, são mostradas no anexo 2.

4.3.2 Ensaios de Obtenção da Resposta em Frequência

Com o sensor posicionado em cada distância D do ventilador, aplicou-se na entrada da malha um sinal senoidal de período variável, obtendo-se a resposta em frequência do sistema (Figura 59 a Figura 63).

Observa-se nos diagramas de Bode que eles têm o comportamento do sistema de 1ª ordem com atraso apresentado na Figura 18. Como ilustrações, estão indicadas pelas setas vermelhas nos diagramas as respostas do sistema para os períodos de 2 s e 10 s.

Ao aplicar-se um sinal senoidal $U_{entrada}$ de período 2 s, por exemplo, observa-se no diagrama de Bode da Figura 59 que, em razão desse período ser muito pequeno, a resposta do sistema demora a acompanhar o sinal de entrada, havendo uma defasagem de 235° entre eles, assim como ocorre uma atenuação de 8,45 dB no sinal de saída.

Nos demais diagramas, o que se percebe conforme se aumenta a distância D entre o sensor e o ventilador, ou seja, conforme se aumenta o atraso de transporte, é que a resposta do sistema apresenta uma atenuação maior e um atraso de fase excessivo para sinais de frequência relativamente alta. Isso é devido ao efeito desse atraso de transporte, também observado na Figura 18.

Para períodos maiores, como por exemplo, 10 s, observam-se nos diagramas de Bode que a atenuação e o atraso de fase são reduzidos.

Percebe-se que o sistema comporta-se como um filtro passa-baixa, diminuindo a frequência de corte à medida que se aumenta a distância do ventilador.

Além da resposta a sinal senoidal, também foi obtida resposta a sinal do tipo dente de serra, para que se observasse o comportamento linear do sistema. Todas essas curvas são mostradas em conjunto com as curvas de validação do modelo no anexo 3.

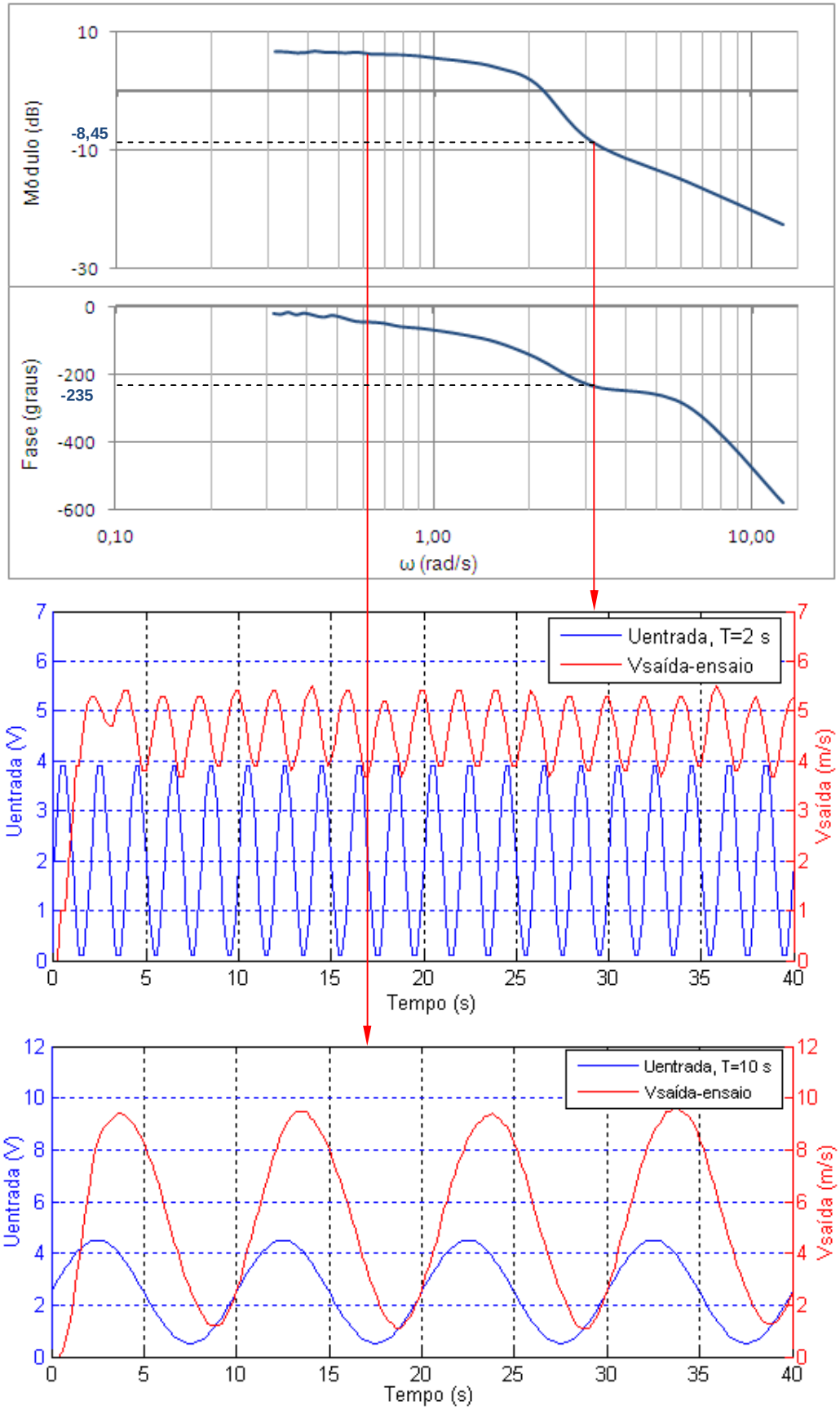


Figura 59: Diagrama de Bode considerando D=5 cm

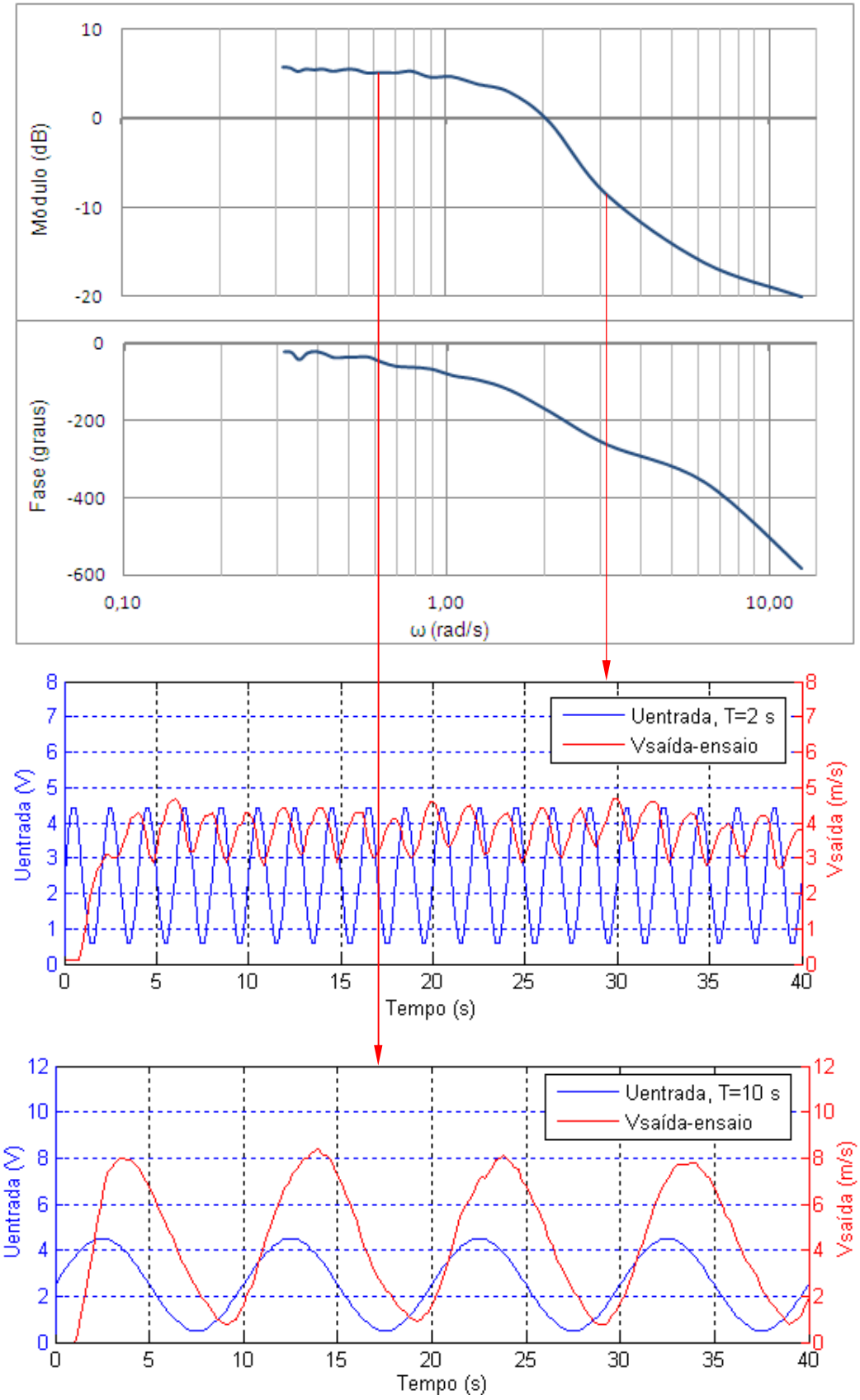


Figura 60: Diagrama de Bode considerando D=0,5 m

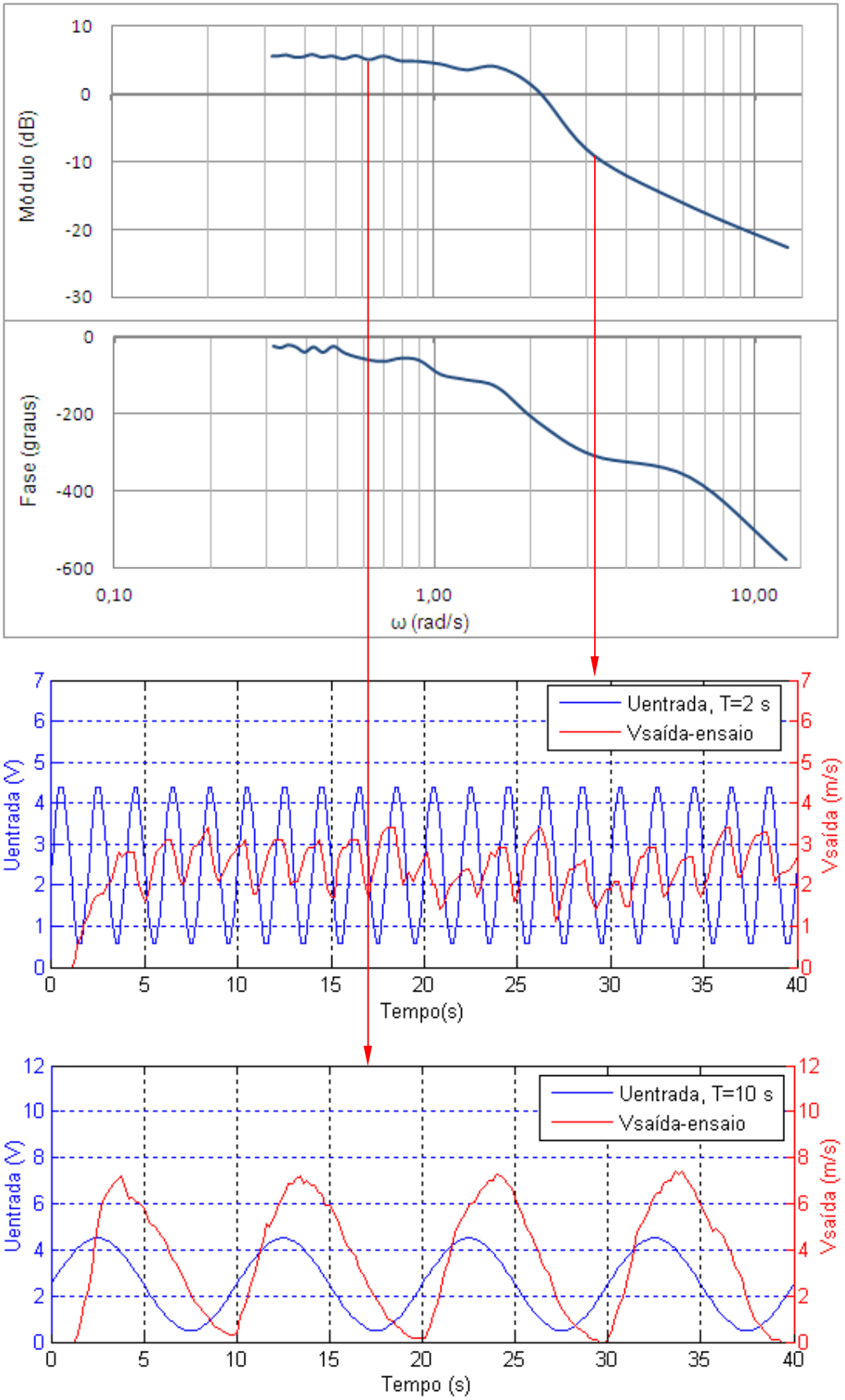


Figura 61: Diagrama de Bode considerando D=1,0 m

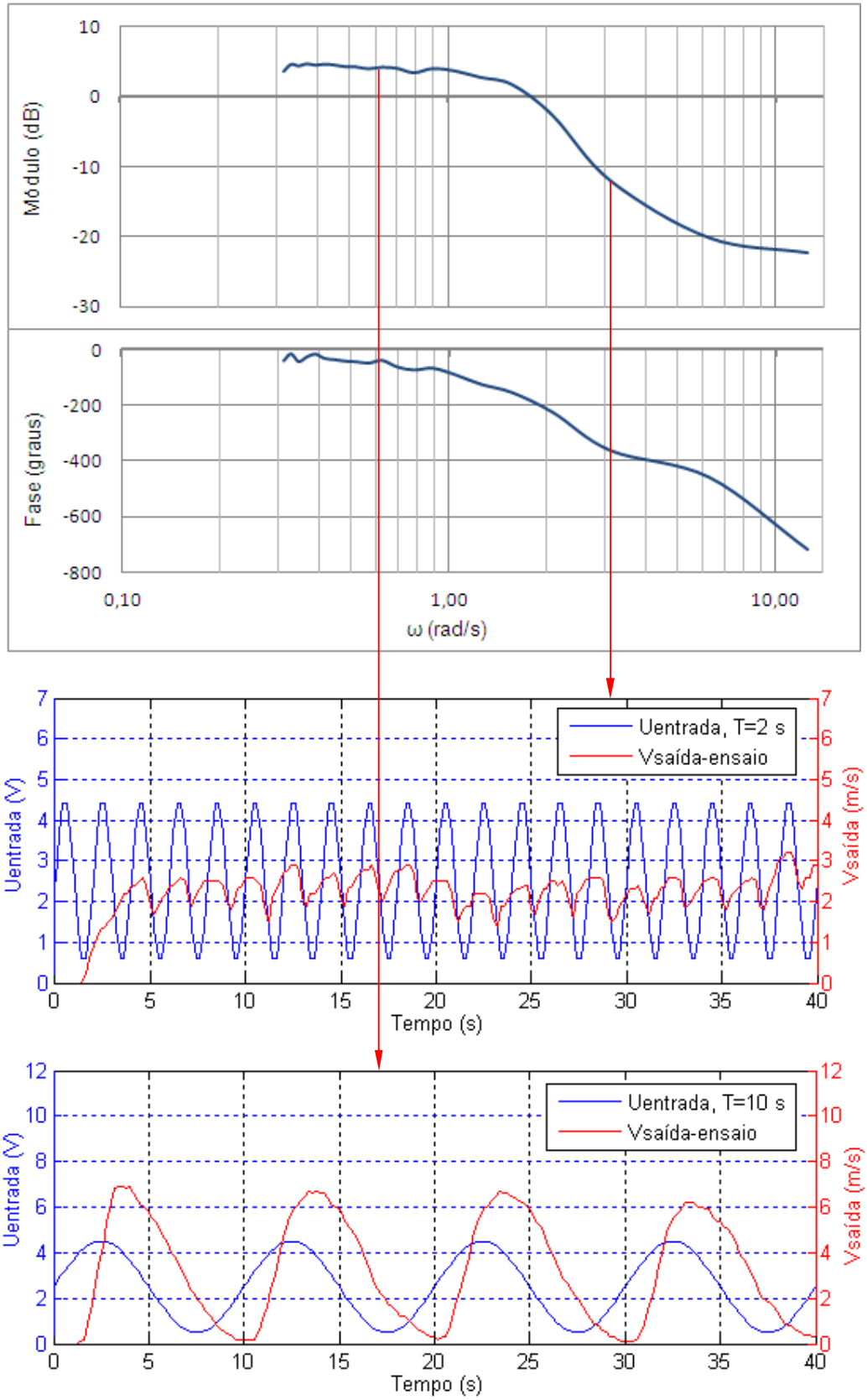


Figura 62: Diagrama de Bode considerando D=1,5 m

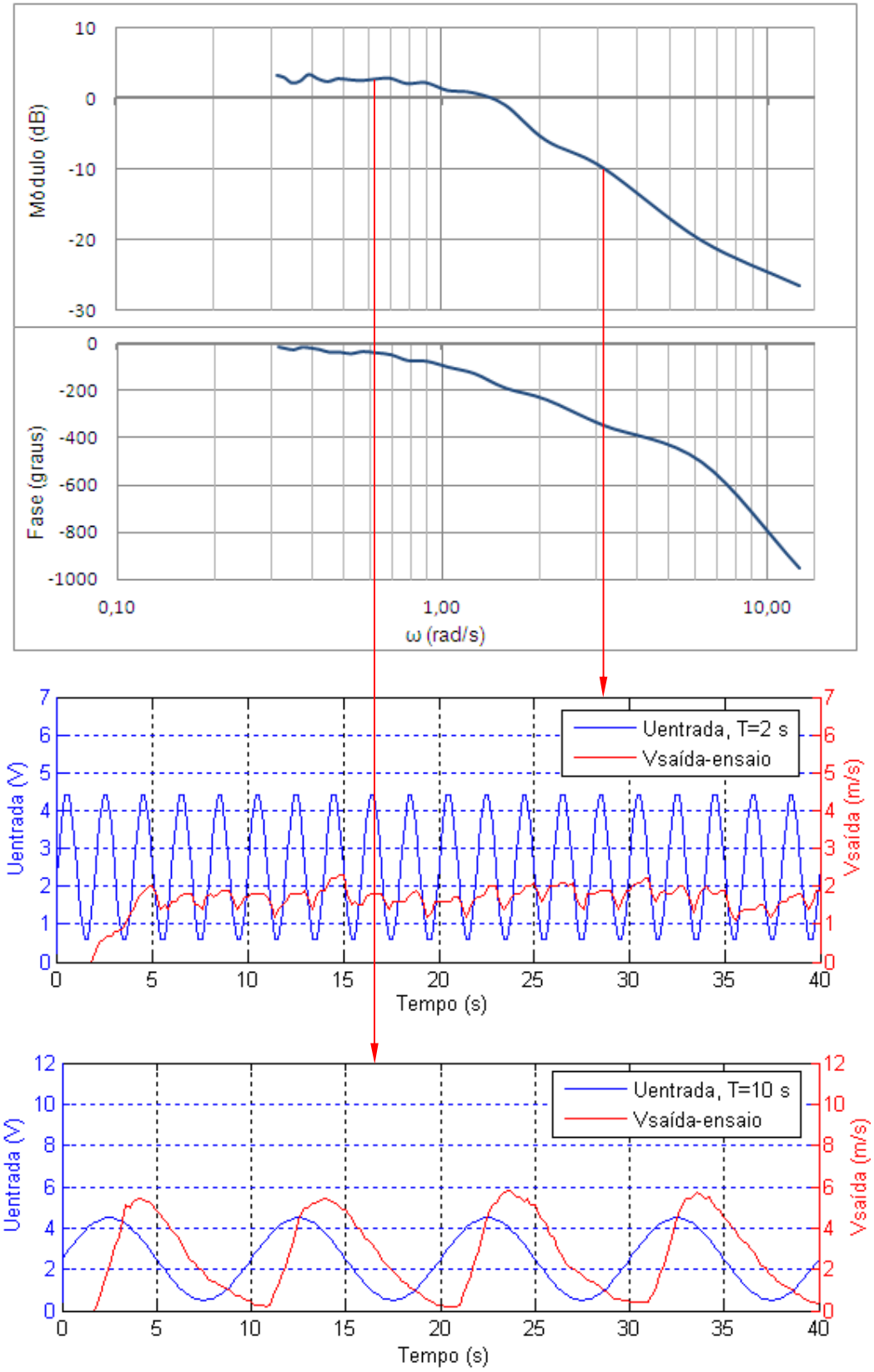


Figura 63: Diagrama de Bode considerando D=2,0 m

5. IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA

5.1 Sistema de Primeira Ordem mais Atraso

Para cada curva de resposta do sistema obtida nos ensaios foram calculados os parâmetros pelas equações apresentadas no item 3.2 e registrados nas tabelas mostradas no anexo 2, obtendo-se a média para a elaboração do devido modelo do sistema.

A partir das tabelas *Valores médios dos parâmetros x Tensão aplicada* e *Valores médios dos parâmetros x Distância do ventilador,* elaboram-se os gráficos dos parâmetros K, τ, θ, τ_d e θ_d em função da tensão aplicada e da distância considerada. O objetivo é analisar o comportamento desses parâmetros e encontrar valores que possam ser mais adequados para compor o modelo global do sistema.

Analisado inicialmente o ganho K em função do degrau de tensão aplicado ao sistema (Figura 64), observa-se que este ganho mantém-se praticamente constante para as distâncias consideradas, reforçando o caráter linear da resposta do sistema à entrada em tensão no inversor. Já o ganho K em função da distância do ventilador (Figura 65) decai de forma linear, pois a velocidade do vento diminui ao longo do tanque.

Para o modelo do sistema adotou-se um ganho médio de K para cada distância considerada no ensaio. Para outras distâncias não medidas, o ganho médio pode ser obtido pela curva de regressão linear no gráfico (Figura 65), com um valor K (máximo) em torno de 2 m/s/V, próximo ao ventilador, e decaindo à medida que se afasta dele.

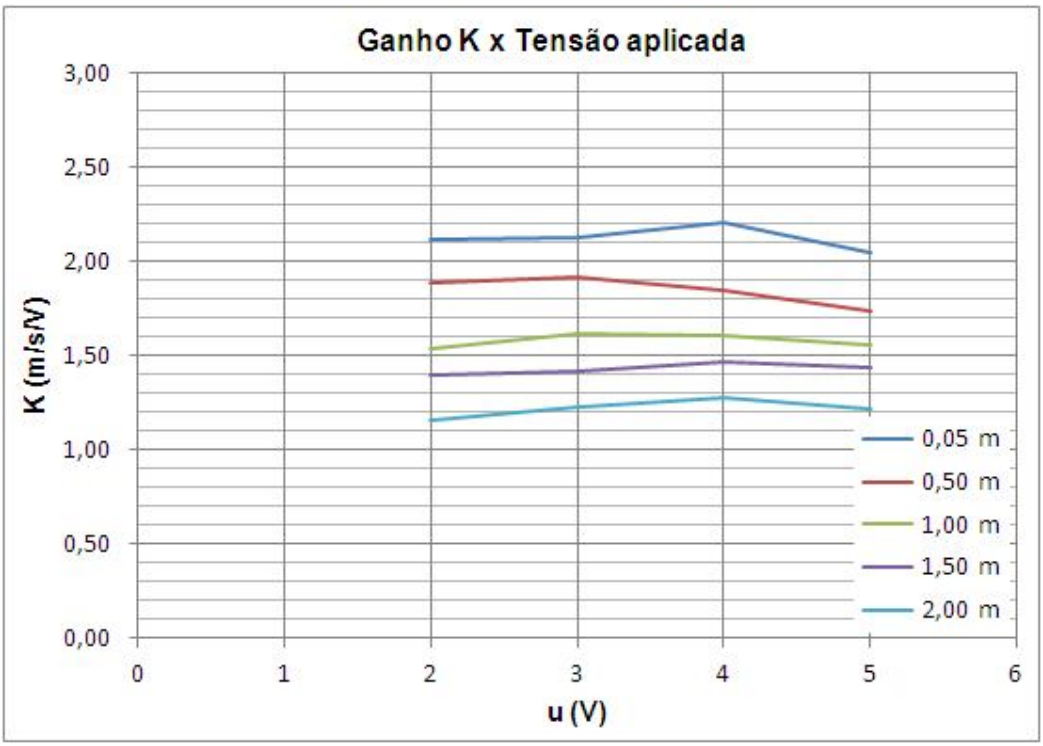


Figura 64: Ganho em função do degrau de tensão aplicado

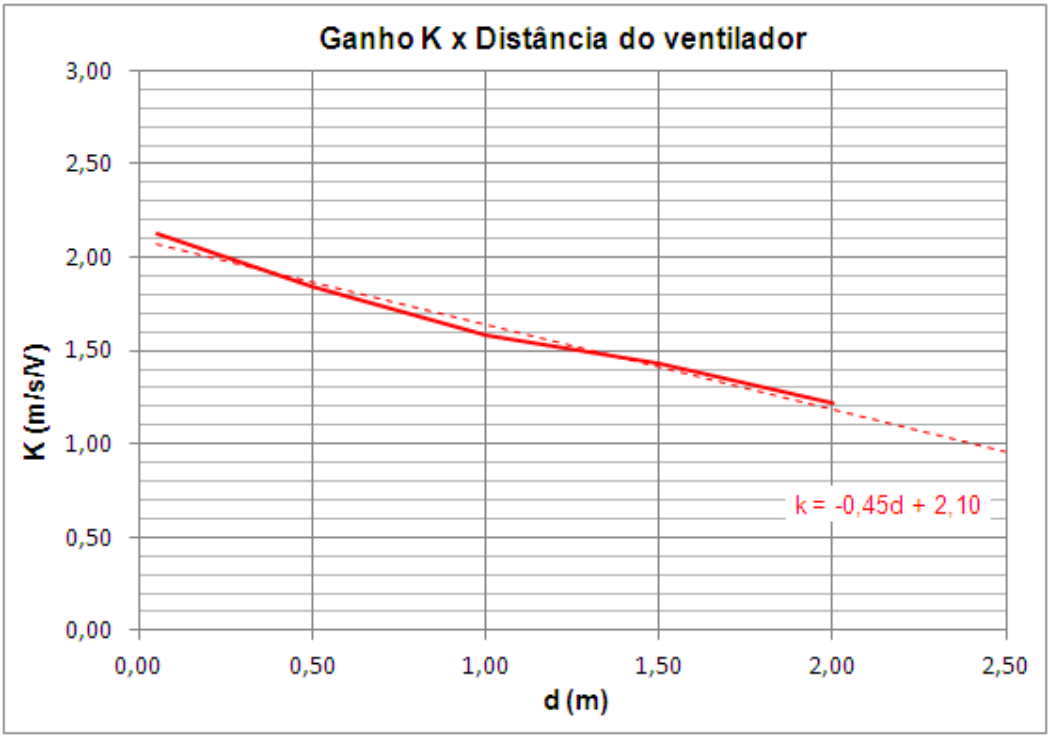


Figura 65: Ganho em função da distância do ventilador

Analisando o gráfico da constante de tempo de subida τ em função da tensão aplicada (Figura 66) e da distância (Figura 67), nota-se que não há grandes variações. Assim, considerou-se para o modelo o valor médio de τ para cada distância.

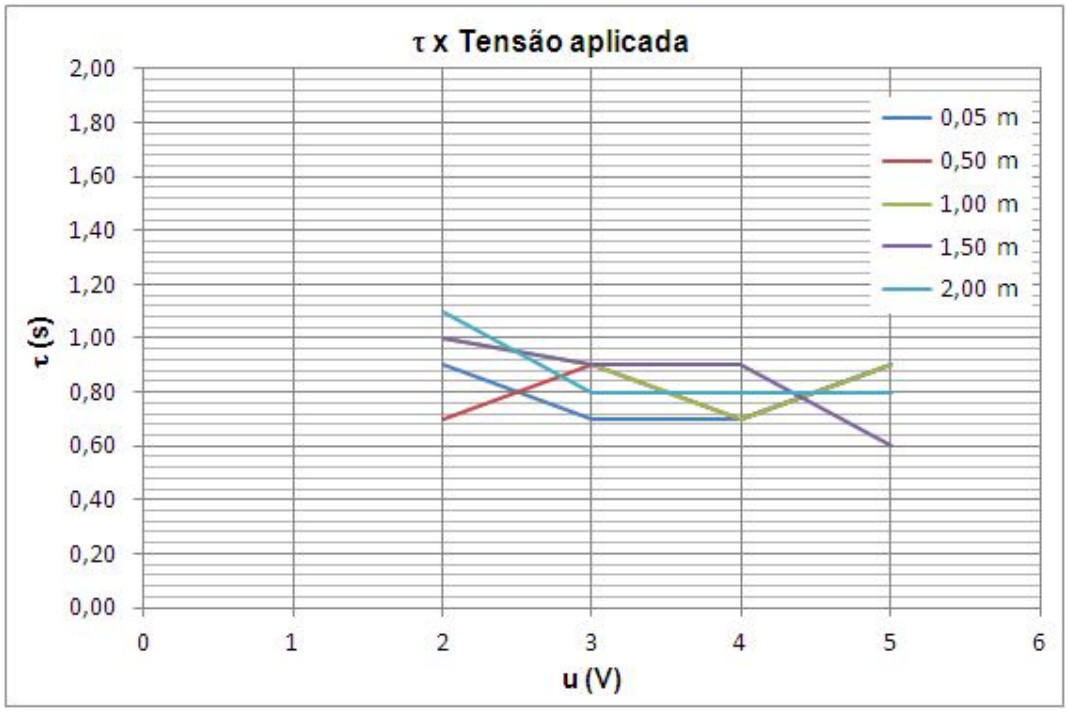


Figura 66: Constante de tempo de subida τ em função da tensão aplicada

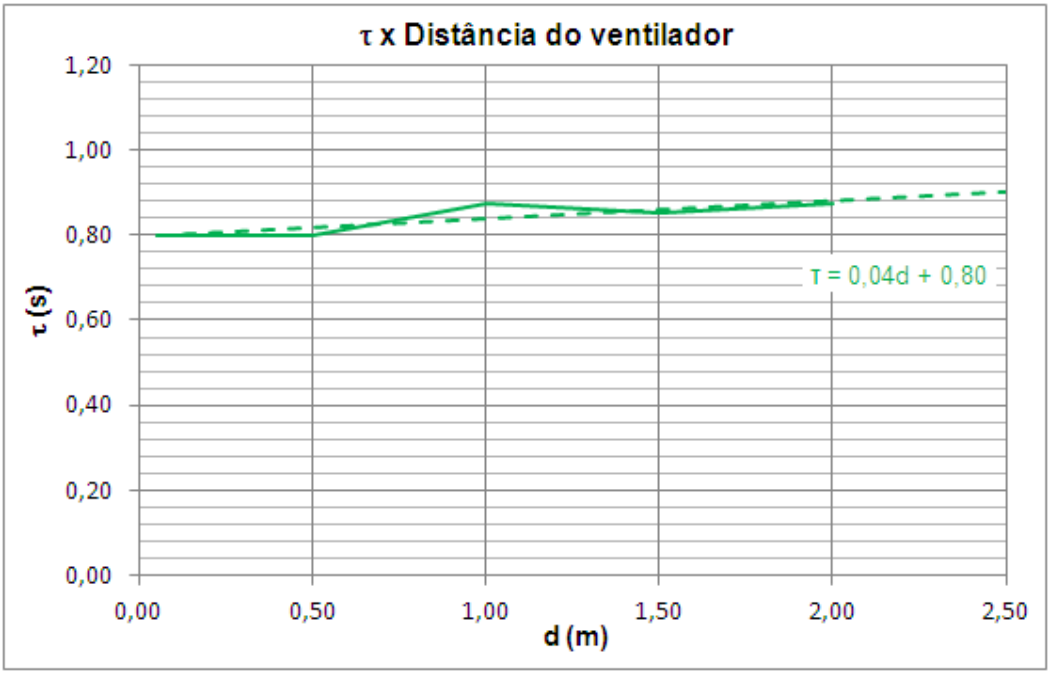


Figura 67: Constante de tempo de subida τ em função da distância

O atraso θ de subida diminui à medida que se vai aumentando o valor de tensão aplicada de 2 a 5 V justamente por estar aumentando o valor da velocidade do vento, chegando mais rápido ao sensor, conforme mostrado na Figura 68. Porém, conforme se pode notar na curva referente à distância de 5 cm, bem próximo ao ventilador e praticamente sem atraso de transporte, que ocorre inicialmente um atraso de aproximadamente 0,9 s, que é devido à automação do sistema. Conforme visto, parte dele deve-se ao ciclo de leitura do sensor que é feito por requisição: o *software* solicita o valor de medição ao sensor e aguarda o retorno da informação antes de fazer uma nova solicitação de medida.

As equações referentes a cada linha de tendência no gráfico mostram que o atraso θ é inversamente proporcional à tensão aplicada e consequentemente à velocidade do vento, apresentando uma tendência de queda até o valor de aproximadamente 0,9 s, que é o atraso devido à automação, não diminuindo aquém desse valor.

A Figura 69 contém o atraso de transporte médio para as tensões consideradas (de 2 V a 5 V) em função da distância com o ventilador. Também se verifica neste gráfico o atraso de automação de aproximadamente 0,9 s (para distância mínima) e este aumenta de forma proporcional à distância do ventilador. Traçando a linha de tendência no gráfico pode-se obter esse atraso médio para qualquer distância.

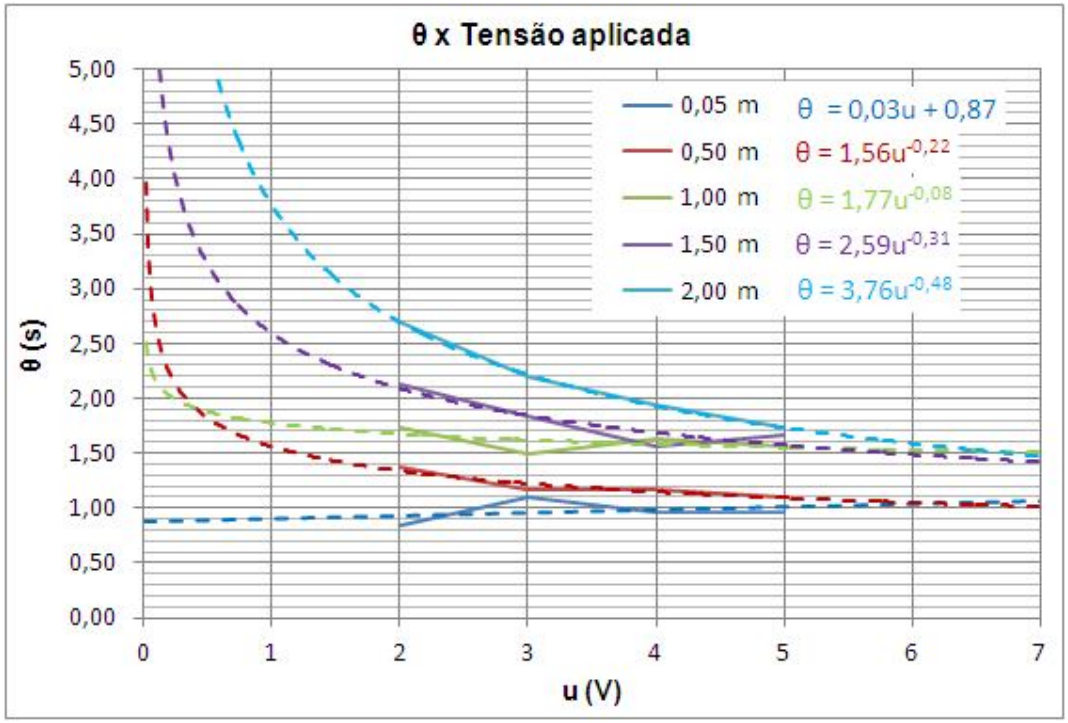


Figura 68: Atraso de subida θ em função do degrau de tensão aplicado

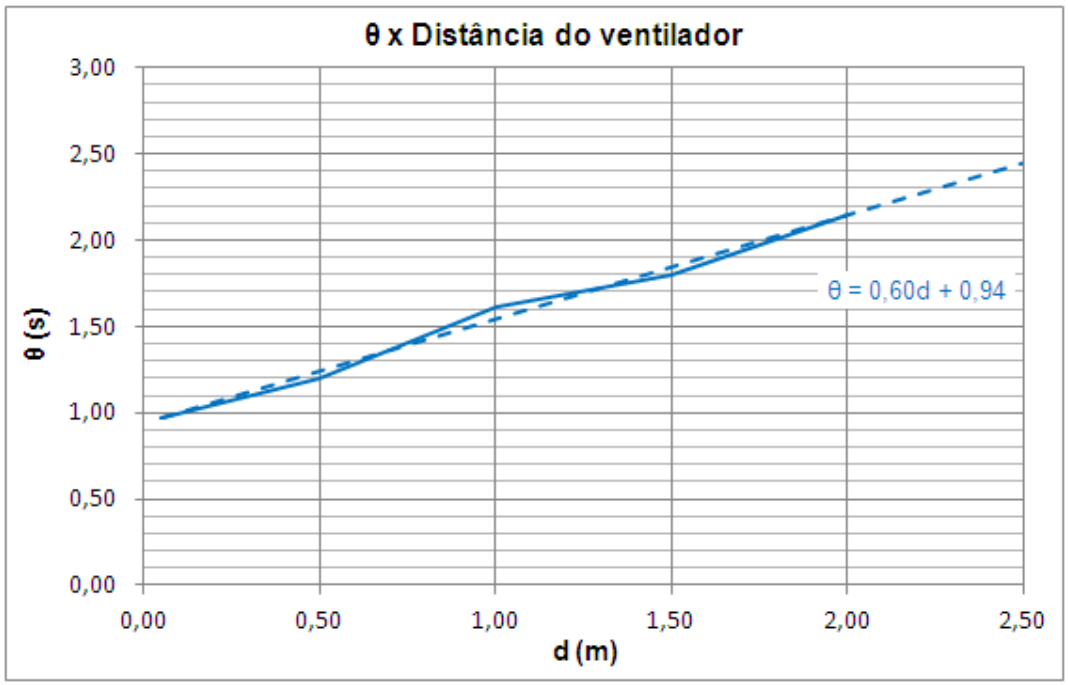


Figura 69: Atraso de subida θ em função da distância do ventilador

Para o gráfico da constante de tempo de descida τ_d em função da tensão aplicada (Figura 70) verifica-se que, da mesma forma que o τ de subida, este mantém um valor praticamente constante para cada distância considerada.

Já no segundo gráfico (Figura 71) percebe-se pela linha de tendência que τ_d não apresenta uma dependência forte com a distância. Considerou-se para efeito de modelagem o valor médio de τ_d para cada distância desejada e para as demais distâncias obtém-se esse valor médio na linha de tendência traçada.

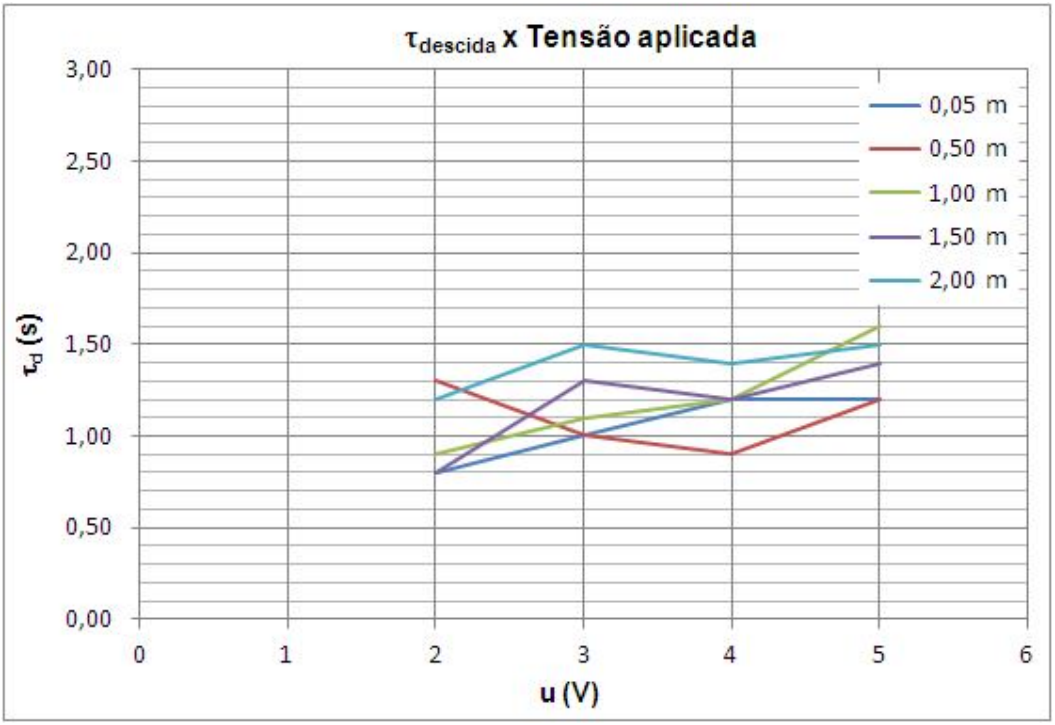


Figura 70: Constante de tempo de descida τ_d em função da tensão

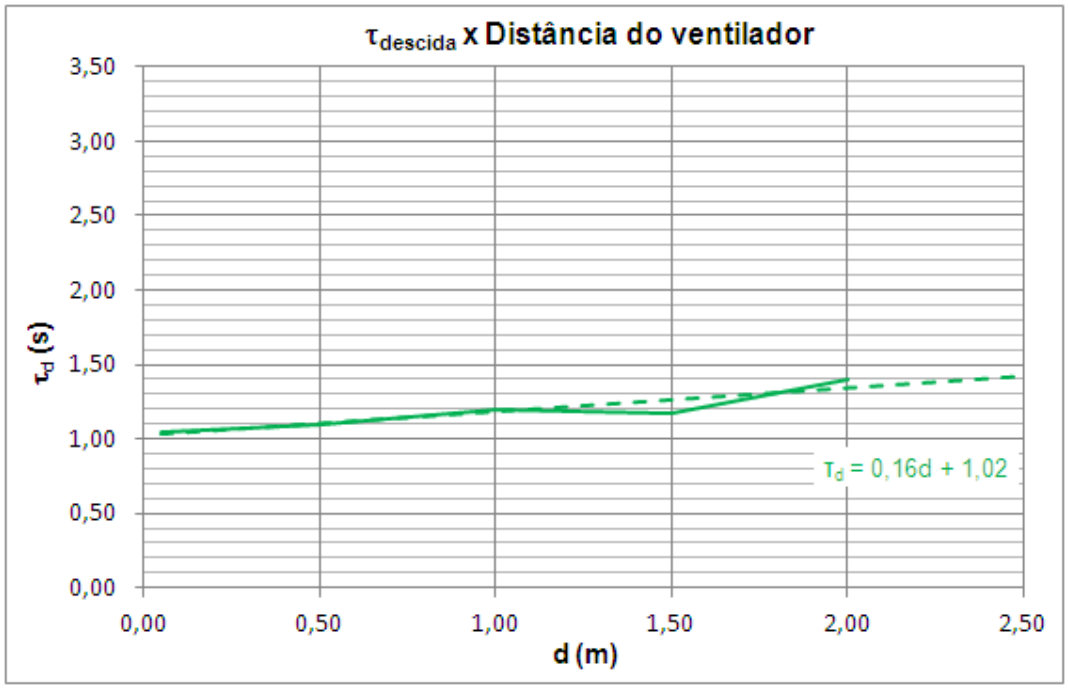


Figura 71: Constante de tempo de descida τ_d em função da distância

O atraso θ_d de descida diminui conforme se aumenta o valor de tensão, ou seja, aumentando o valor da velocidade do vento, como mostrado na Figura 72. Análogo ao atraso visto na aplicação do degrau de subida, também se nota que ocorre inicialmente um atraso de aproximadamente 0,9 s, que é devido à automação do sistema. Da mesma forma, percebe-se nas curvas tracejadas que, com o aumento do valor de tensão, θ tem uma tendência de queda de acordo com a distância considerada, até atingir um valor mínimo, não diminuindo mesmo que se aumente a tensão aplicada.

Na Figura 73 também se constata que θ_d aumenta de forma proporcional a distância do ventilador (atraso de transporte).

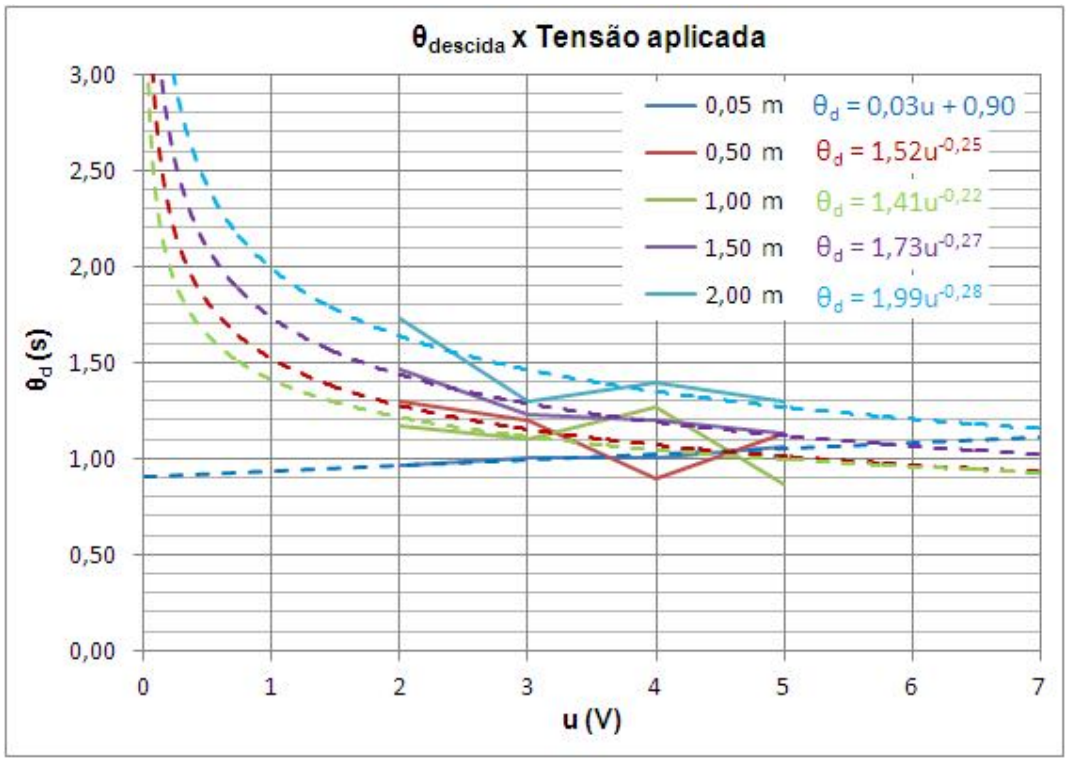


Figura 72: Atraso de descida θ_d em função do degrau de tensão aplicado

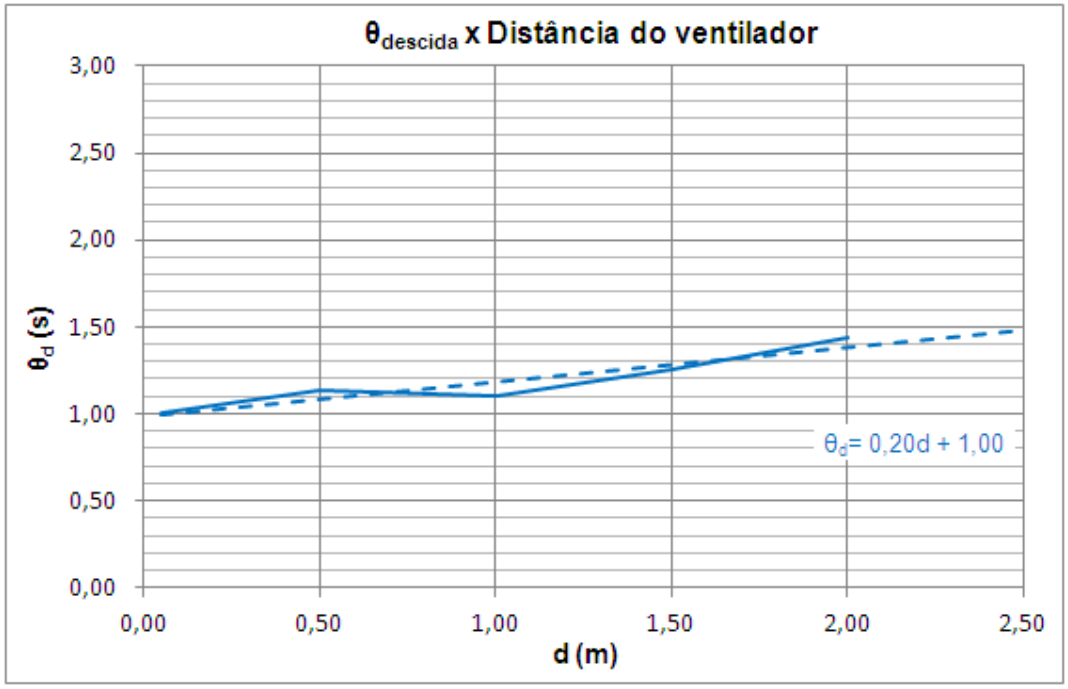


Figura 73: Atraso de descida θ_d em função da distância do ventilador

5.2 Modelo Final do Sistema

Considerando a análise feita no item 5.1, em função dos valores dos ensaios indicados nas tabelas e do que foi verificado nos gráficos, constata-se que o modelo poderia ser composto pela composição de dois sistemas de 1ª ordem:

- O primeiro com os valores médios de K, τ e θ aplicados em instantes de subida do sinal;

- O segundo com os valores médios de K, τ_d e θ_d aplicados em instantes de descida do sinal.

Para isso, os valores adotados para o modelo seriam os da Tabela 2, que correspondem à média consolidada dos parâmetros da Tabela 6 à Tabela 10, mostradas no anexo 2.

Tabela 2: Parâmetros médios da curva de resposta para cada distância

Valores médios dos parâmetros para cada distância					
Distância do sensor (m)	**K (m/s/V)**	**τ (s)**	**θ (s)**	**τ_d (s)**	**θ_d (s)**
0,05	2,12	0,80	0,97	1,05	1,01
0,50	1,84	0,80	1,20	1,10	1,13
1,00	1,58	0,88	1,61	1,20	1,10
1,50	1,43	0,85	1,80	1,18	1,26
2,00	1,22	0,88	2,14	1,40	1,43

Porém, pode-se fazer outra análise dos resultados obtidos, na qual se calcula o valor médio de τ e τ_d e o valor médio de θ e θ_d com os seus respectivos desvios $|\Delta\tau|$ e $|\Delta\theta|$, montando-se a Tabela 3. Observa-se nessa tabela que se incorre num erro pequeno ao fazer essa aproximação, sendo razoável adotar esses valores médios para o modelo.

Tabela 3: Parâmetros considerados no modelo para cada distância

Valores médios dos parâmetros considerados no modelo					
Distância do sensor (m)	**K (m/s/V)**	**$\tau_{médio}$ (s)**	**$\theta_{médio}$ (s)**	**$\|\Delta\tau\|$ (s)**	**$\|\Delta\theta\|$ (s)**
0,05	2,12	0,93	0,99	0,13	0,02
0,50	1,84	0,95	1,17	0,15	0,03
1,00	1,58	1,04	1,35	0,16	0,25
1,50	1,43	1,01	1,53	0,16	0,27
2,00	1,22	1,14	1,79	0,26	0,35

Com essa solução, pode-se considerar um modelo simplificado para o sistema de 1ª ordem com atraso de transporte:

$$\frac{V_{saída}(s)}{U_{entrada}(s)} = \frac{\bar{K}}{\bar{\tau}.s + 1}\, e^{-\bar{\theta}.s} \tag{79}$$

Onde $\bar{K}$, $\bar{\tau}$ e $\bar{\theta}$, são os valores médios mostrados na Tabela 3, para cada distância considerada. Com as considerações feitas elaborou-se o modelo computacional do sistema:

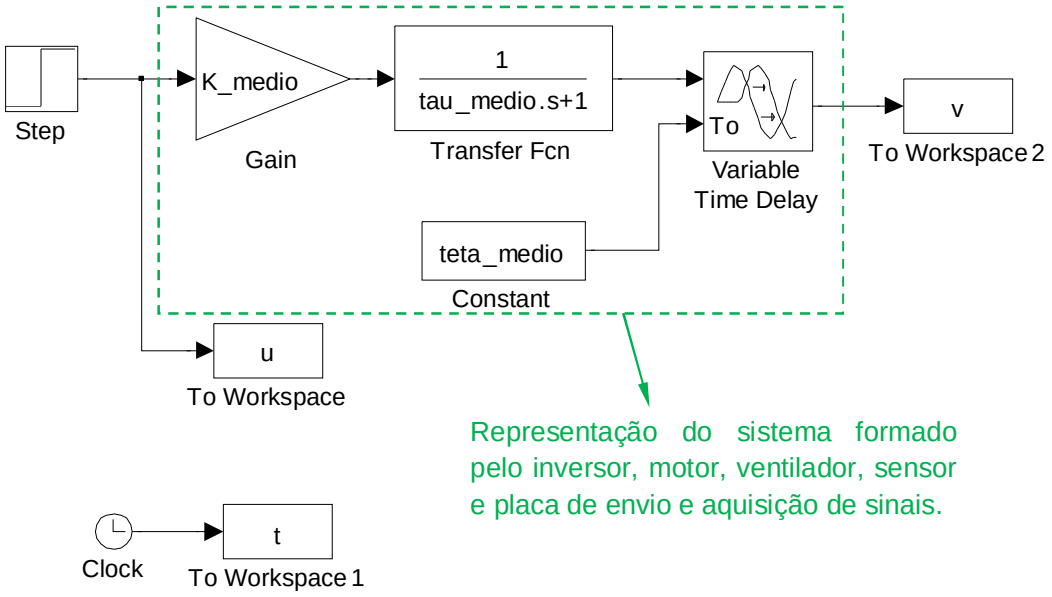


Figura 74: Modelo obtido pelos ensaios de identificação do sistema

6. VALIDAÇÃO DO MODELO

Uma vez obtidos os valores médios dos parâmetros $\overline{K}$, $\overline{\tau}$ e $\overline{\theta}$, referentes a cada distância, avaliou-se a capacidade do modelo matemático em estimar a resposta do sistema a sinais de entrada do tipo degrau e outros distintos, tais como senoidal e dente de serra. As curvas de resposta referentes a cada distância, comparando-se os resultados obtidos na simulação do modelo do sistema juntamente com os resultados obtidos dos ensaios no sistema real, são mostradas no anexo 3, e alguns resultados relevantes são apresentados e comentados no presente capítulo.

Para os ensaios de resposta ao degrau, observa-se, por exemplo, que há menor flutuação da velocidade do vento obtida após a aplicação do degrau para a distância de 5 cm (Figura 75), comparada com a obtida para a distância de 2,0 m (Figura 76). Isso ocorre porque o escoamento de vento é mais constante próximo ao ventilador e torna-se turbulento conforme se afasta deste. O modelo matemático adotado não considera isso e o seu valor permanece constante após a estabilização. Nota-se também que a resposta transitória do modelo para a distância de 5 cm melhor representa a resposta experimental do para a distância de 2,0 m. Esta constatação é corroborada pela Tabela 3, que mostra que para distâncias maiores, os parâmetros τ, θ, τ_d e θ_d apresentam uma maior variação em relação aos valores médios adotados.

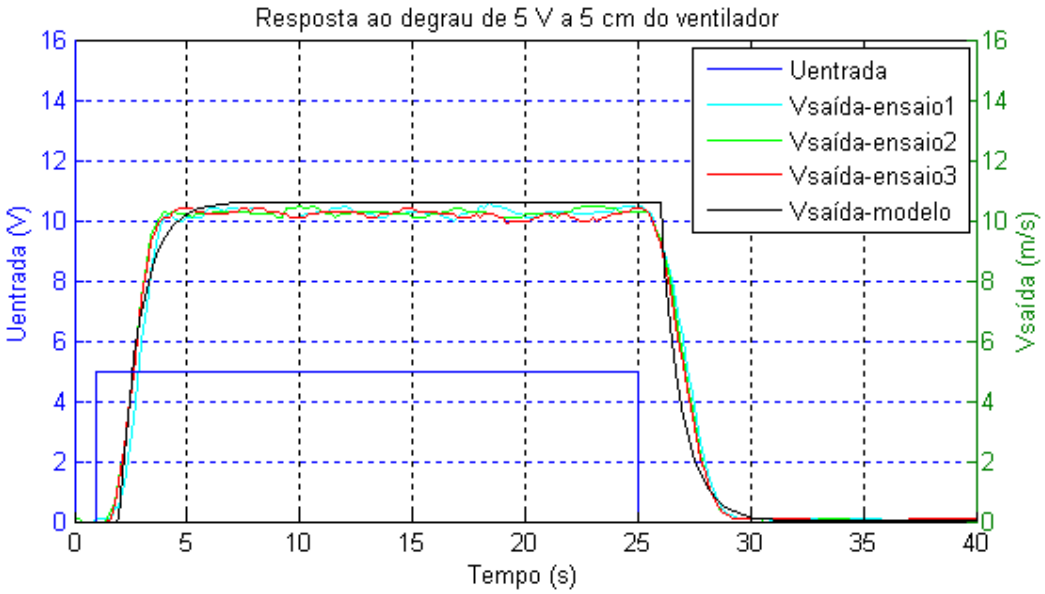


Figura 75: Comparação do modelo para a distância de 5 cm

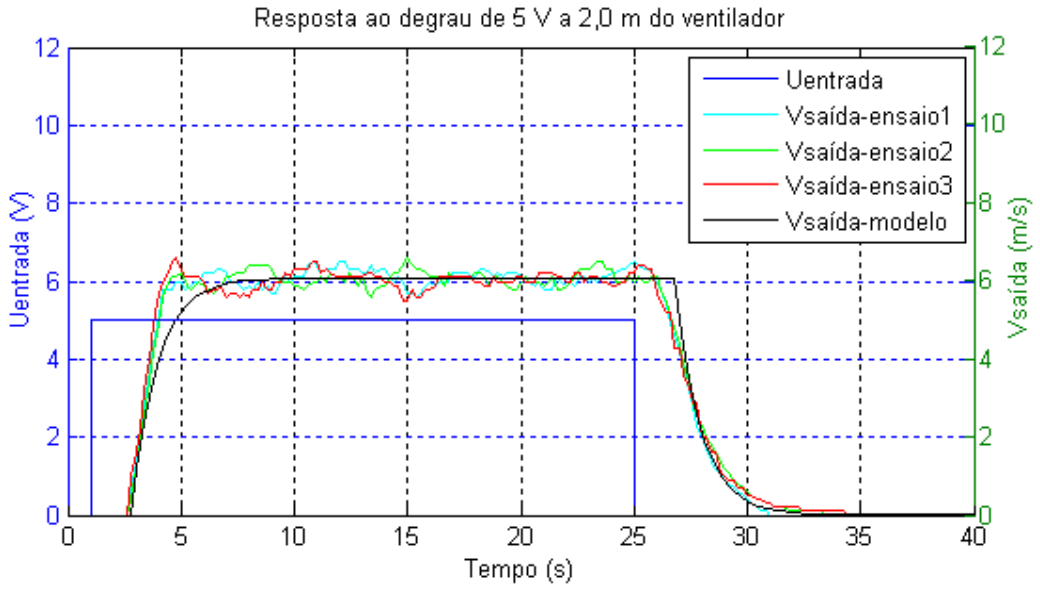


Figura 76: Comparação do modelo para a distância de 2,0 m

Verifica-se também que o modelo proposto é mais fiel aos resultados experimentais para maiores valores de tensão de entrada aplicada. Provavelmente, quanto mais se aumenta o valor de tensão mais se tende a diminuírem os efeitos da força de atrito nos mancais dos motores dos ventiladores que não foram considerados no modelo. Isso é notado na aplicação de sinal degrau, que impõe uma resposta mais brusca. Por exemplo, considerando para a distância de 1,0 m, a aplicação de sinal degrau de 2 V e 5 V (Figura 77 e Figura 78).

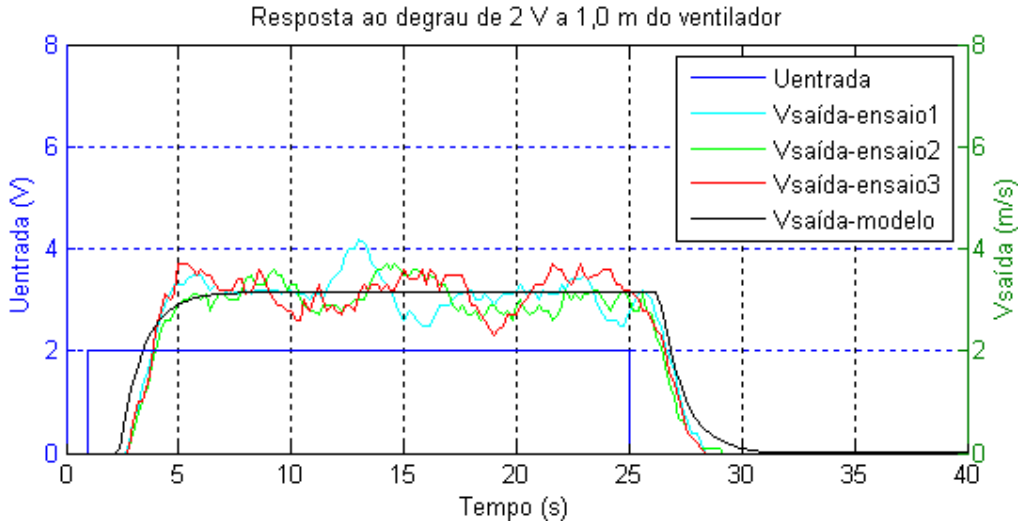


Figura 77: Comparação do modelo para degrau aplicado de 2 V

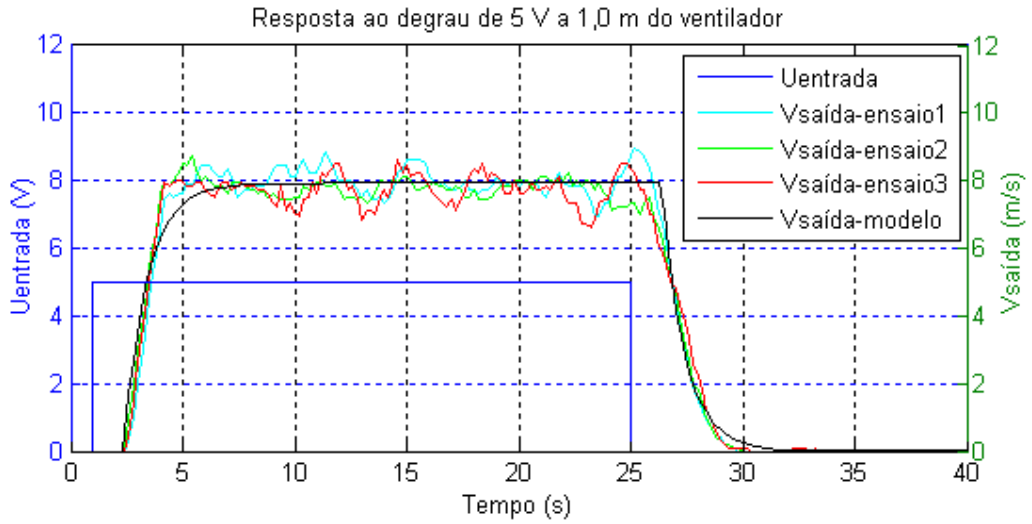


Figura 78: Comparação do modelo para degrau aplicado de 5 V

Compararam-se também os resultados dos ensaios para entradas senoidais.

Para uma distância de 5 cm do ventilador, por exemplo, com período de 2 s (Figura 79) verifica-se uma boa aderência das fases da resposta experimental e numérica, porém uma diferença significativa nos seus módulos. Para o período de 10 s (Figura 80), o modelo numérico apresenta boa aderência com a resposta experimental.

Para uma distância maior, como 1,0 m e período 10 s (Figura 81), verifica-se o efeito da turbulência na resposta experimental, com flutuações em torno da forma senoidal que não são recuperadas pelo modelo numérico.

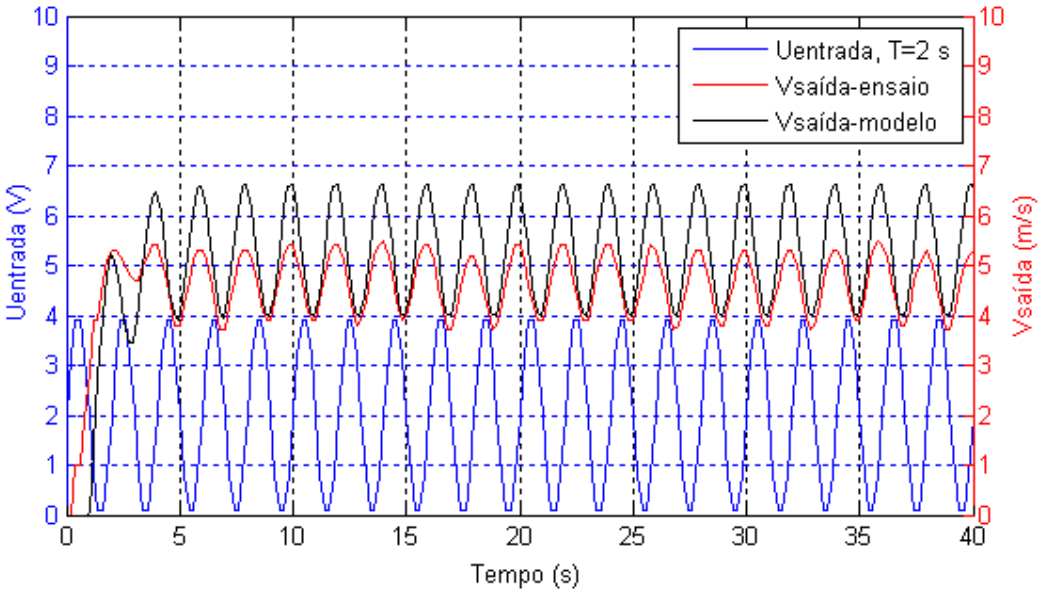


Figura 79: Comparação do modelo para senóide de período 2 s, D=5 cm.

Observa-se também nas Figura 80 e Figura 81, que a curva obtida pela resposta numérica se encontra atrasada em relação à curva obtida experimentalmente. Isso é devido à simplificação realizada ao se fazer a aproximação para um modelo médio do sistema.

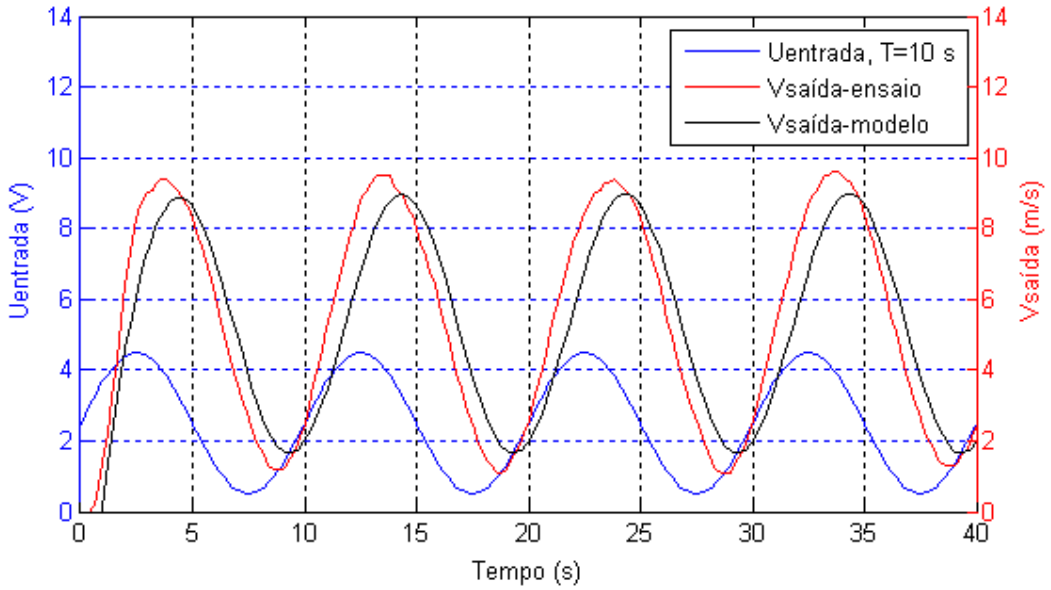


Figura 80: Comparação do modelo para senóide de período 10 s, D=5 cm

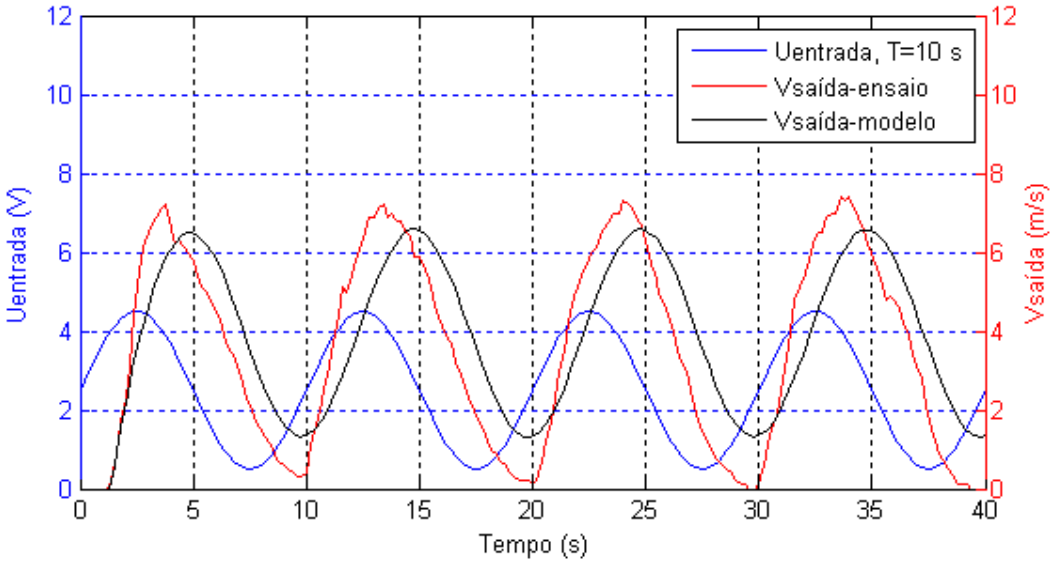


Figura 81: Comparação do modelo para senóide de período 10 s, D=1,0 m

Os gráficos de resposta em frequência são apresentados da Figura 82 a Figura 86. As curvas se assemelham e se nota que o modelo representa bem o comportamento real do sistema em baixas frequências (até aproximadamente 3 rad/s ou períodos maiores que 2 s), apresentando uma divergência em frequências mais altas (períodos menores).

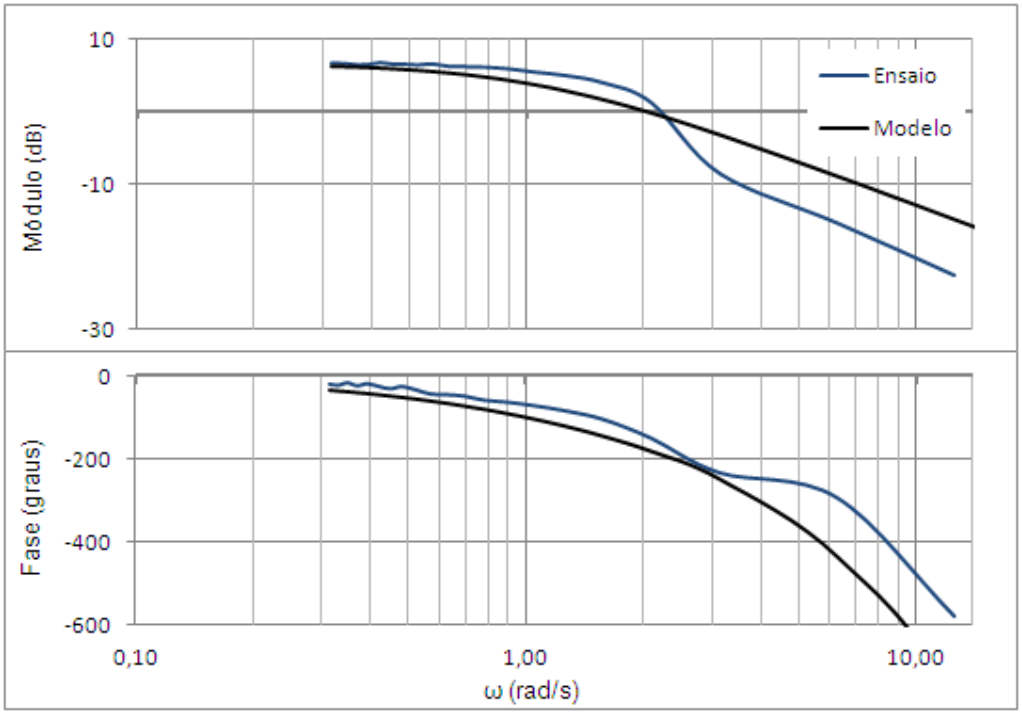


Figura 82: Comparação do diagrama de Bode considerando D=5,0 cm

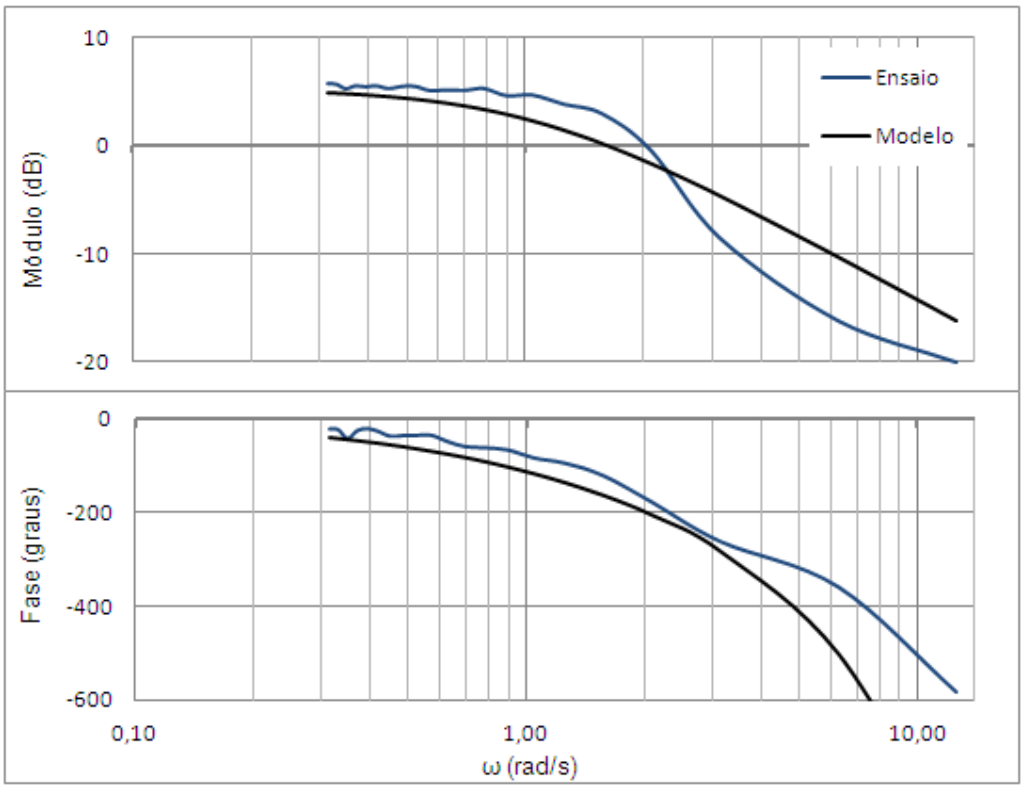


Figura 83: Comparação do diagrama de Bode considerando D=0,5 m

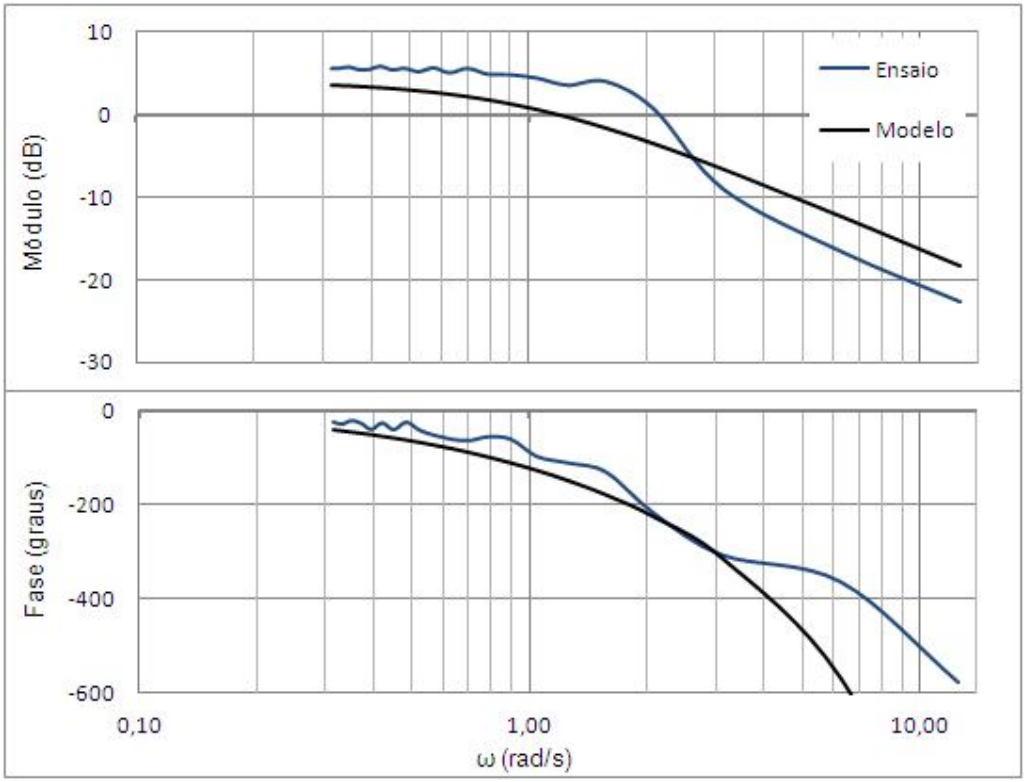


Figura 84: Comparação do diagrama de Bode considerando D=1,0 m

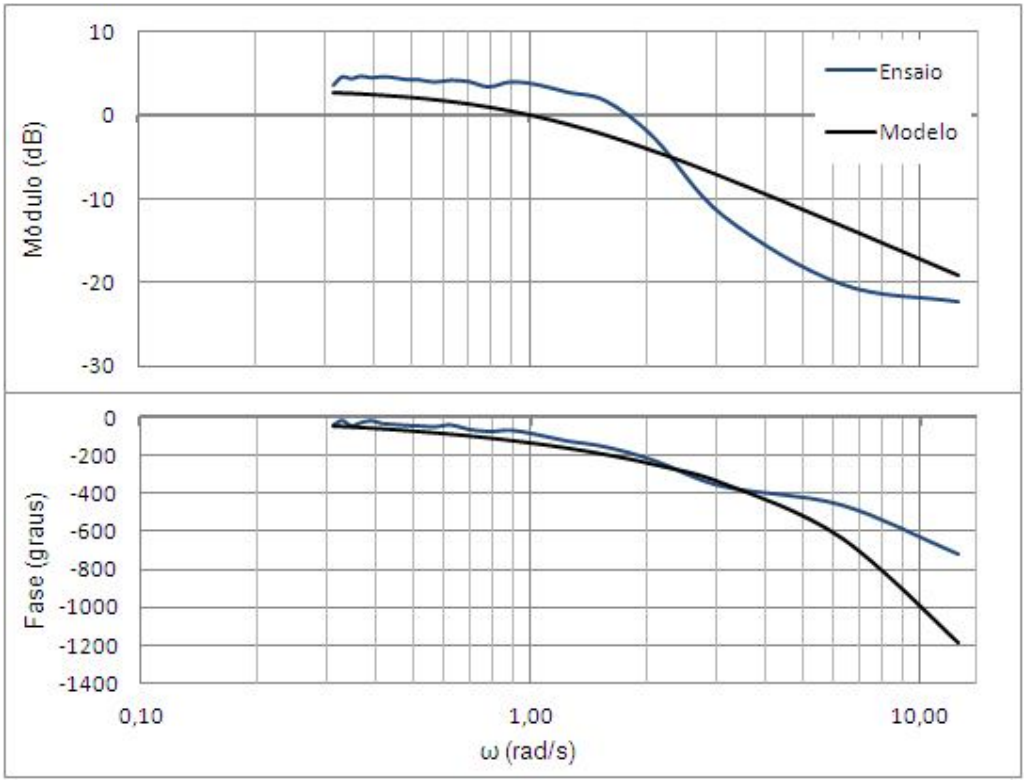


Figura 85: Comparação do diagrama de Bode considerando D=1,5 m

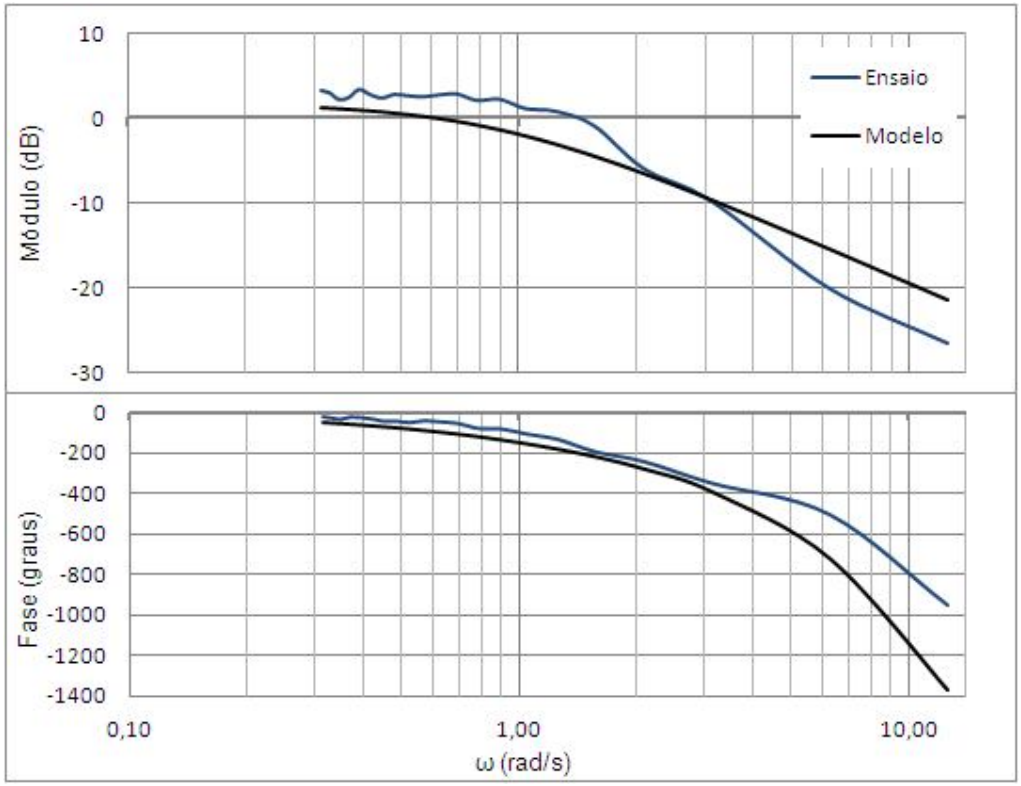


Figura 86: Comparação do diagrama de Bode considerando D=2,0 m

Comparando-se agora as respostas à aplicação de sinal dente de serra, constata-se que para uma distância próxima ao ventilador, como 5 cm e períodos de 2 s e 10 s, por exemplo, as curvas obtidas pela simulação conseguem seguir as obtidas experimentalmente (Figura 87 e Figura 88). Para uma distância maior, por exemplo, 1,0 m (Figura 89), a resposta do modelo tende a acompanhar o resultado experimental, desconsiderando-se as distorções ocorridas oriundas da turbulência do fluxo.

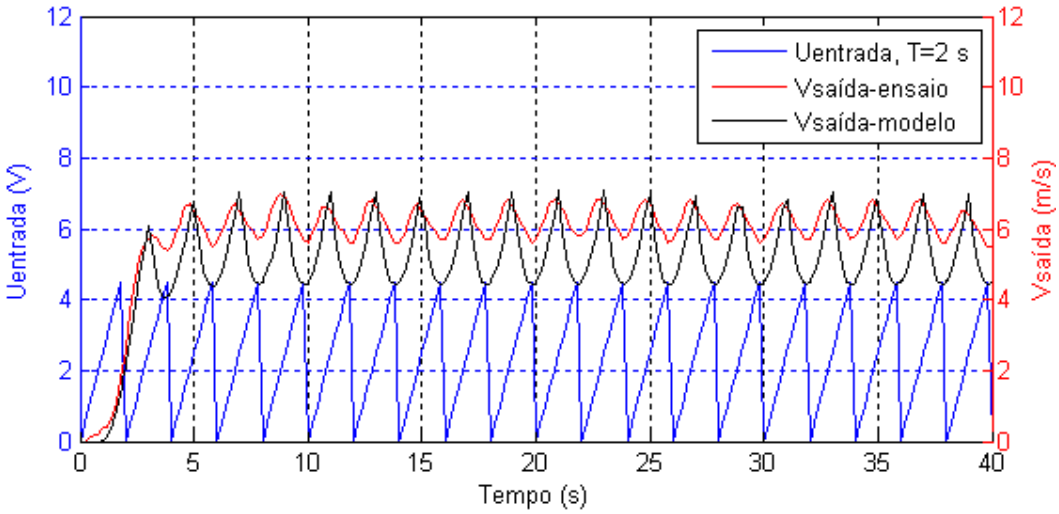


Figura 87: Comparação do dente de serra de período 2 s, D=5 cm

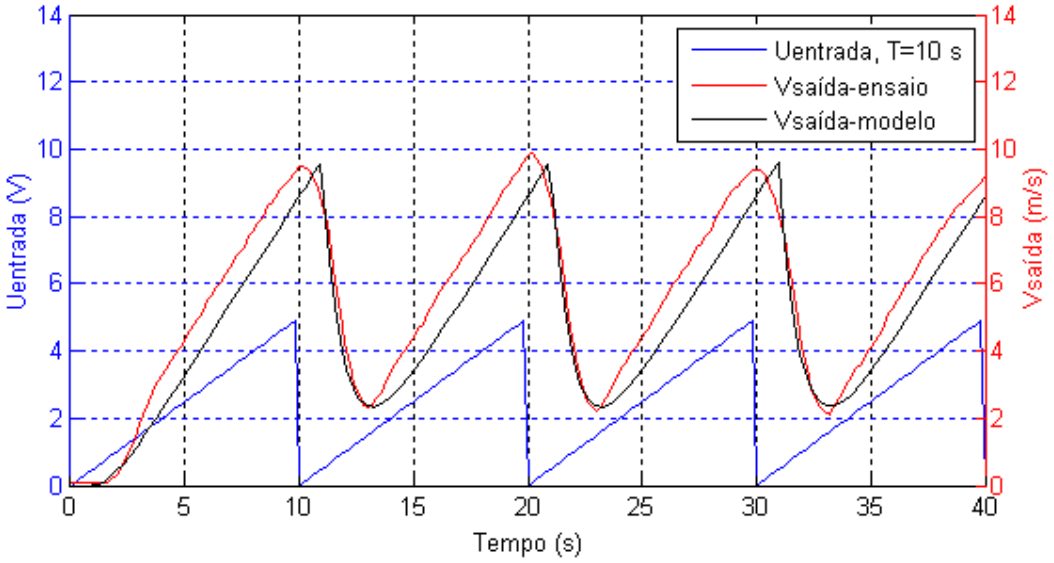


Figura 88: Comparação do dente de serra de período 10 s, D=5 cm

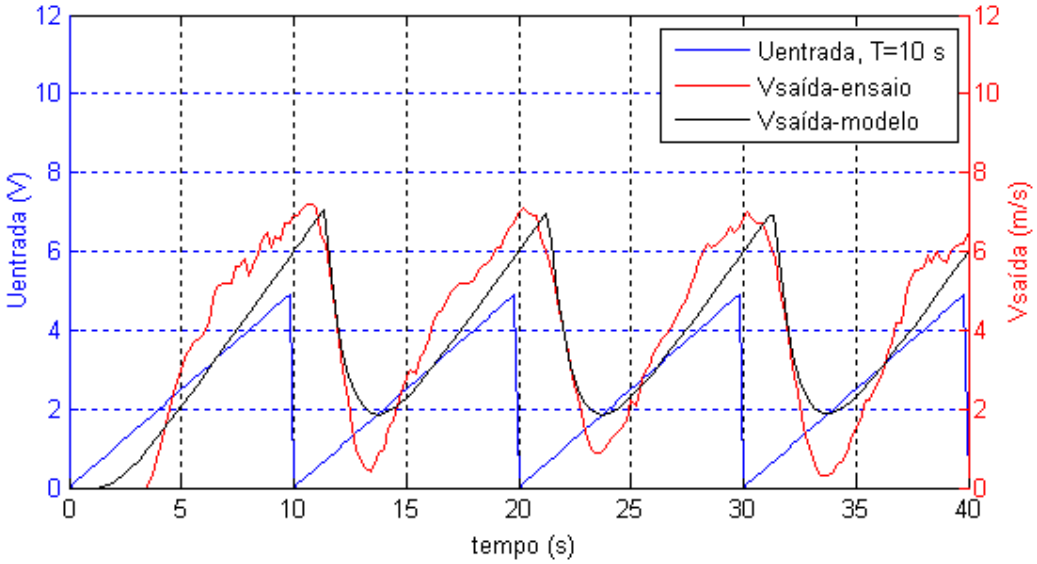


Figura 89: Comparação do dente de serra de período 10 s, D=1,0 m

Pela comparação das curvas de resposta ao degrau, resposta em frequência e resposta a sinal dente de serra, se constata que o modelo adotado para o sistema apresenta uma boa aproximação do sistema real, obtendo melhor resultado quanto mais próximo se estiver do ventilador.

Isso permite que se trabalhe com esse modelo do sistema e elabore-se um controle em malha fechada adequado para ela, considerando que há o efeito do atraso de transporte no sistema.

7. ELABORAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE

O modelo obtido pela curva de resposta do sistema foi utilizado no projeto do controlador aplicando-se a sintonia dos parâmetros pelo método do controle interno (IMC) descrito anteriormente (Figura 22). A cada distância considerada correspondem determinados valores dos parâmetros do sistema, K, τ e θ, conforme a seguir (Tabela 3).

Consequentemente, para cada distância é realizada uma sintonia do controlador IMC, variando-se o parâmetro de desempenho λ. Este parâmetro é relacionado ao tempo de resposta em malha fechada. Para tanto, aplicaram-se na entrada do sistema vários sinais do tipo degrau para cada distância definida e foram testados controladores ajustados com diversos valores de λ, adotando-se aqueles que forneciam melhor resultado na saída. Inicialmente realizaram-se os ensaios sem o compensador de tempo morto (Preditor de Smith).

Obtiveram-se os parâmetros de sintonia do controlador referente a cada distância determinada, apresentados na Tabela 4. Neste ensaio, considerou-se também para análise a distância de 20 cm do ventilador.

Tabela 4: Parâmetros do controlador sem a utilização do Preditor de Smith

	Modelo: Parâmetros obtidos pela curva de resposta do sistema			**Controlador PI: Parâmetros obtidos pelo IMC**		
				Sem Preditor de Smith		
Distância (m)	**K**	**$\tau_{médio}$**	**$\theta_{médio}$**	**K_p**	**T_i**	**λ**
0,05	2,12	0,93	0,99	0,31	1,42	2,15
0,20	2,11	0,93	1,08	0,35	1,46	2,00
0,50	1,84	0,95	1,17	0,33	1,53	2,50
1,00	1,58	1,04	1,35	0,36	1,72	3,00
1,50	1,43	1,01	1,53	0,41	1,78	3,00
2,00	1,22	1,14	1,79	0,88	2,03	1,90

A resposta do sistema controlado é apresentada na Figura 90 (para uma distância próxima do ventilador) e na Figura 91 (para uma distância mais afastada deste). Nestas figuras, apresentam-se o resultado experimental comparado ao resultado de simulação numérica do modelo do sistema

identificado anteriormente. Observa-se aceitável aderência entre o resultado numérico e experimental.

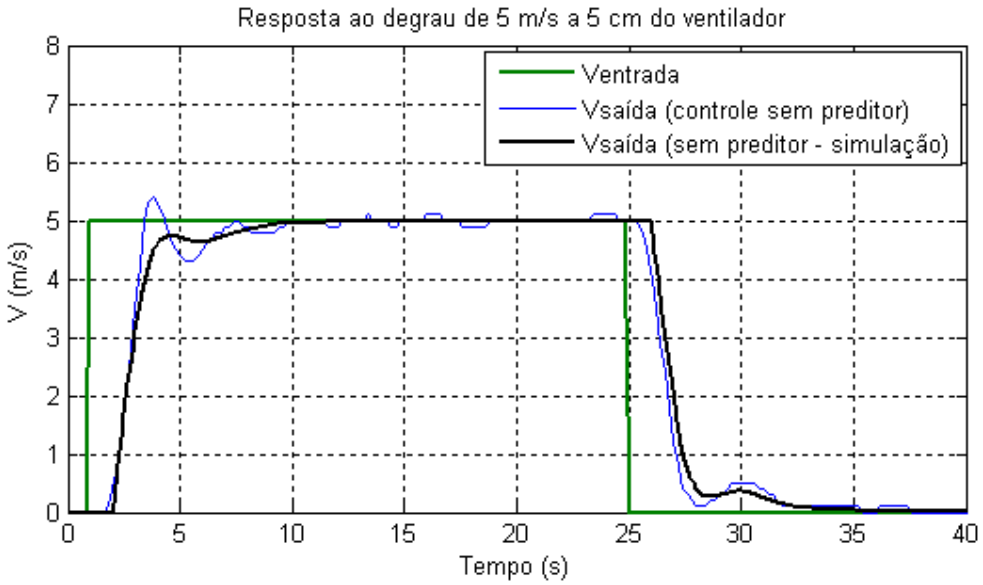


Figura 90: Controle aplicado no sistema real e no modelo para D=5 cm

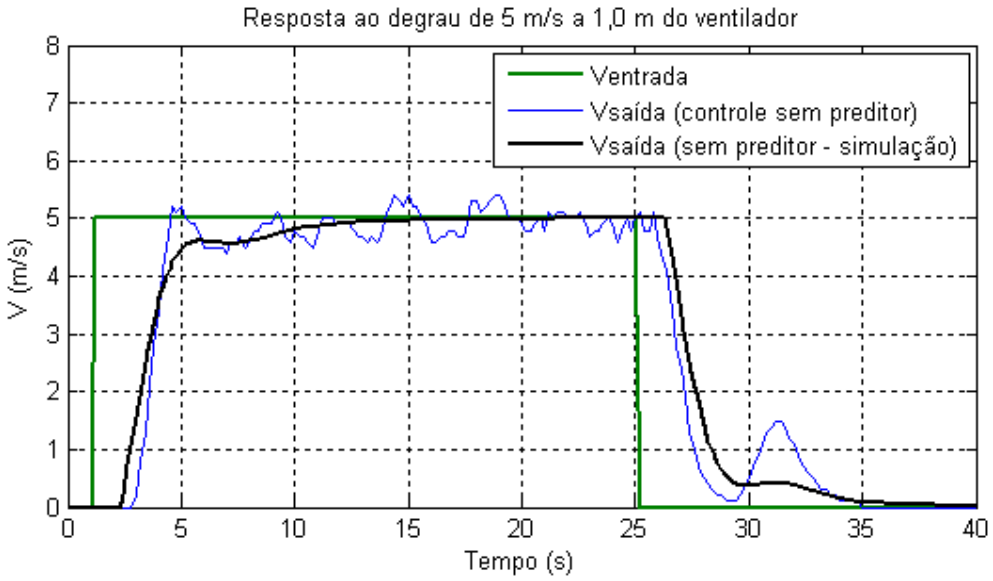


Figura 91: Controle aplicado no sistema real e no modelo para D=1,0 m

Para a aplicação de sucessivos sinais do tipo degrau no *set-point*, por exemplo, para as distâncias de 5 cm e 1,0 m (Figura 92 e Figura 93) observa-se que o resultado numérico representa bem o resultado experimental.

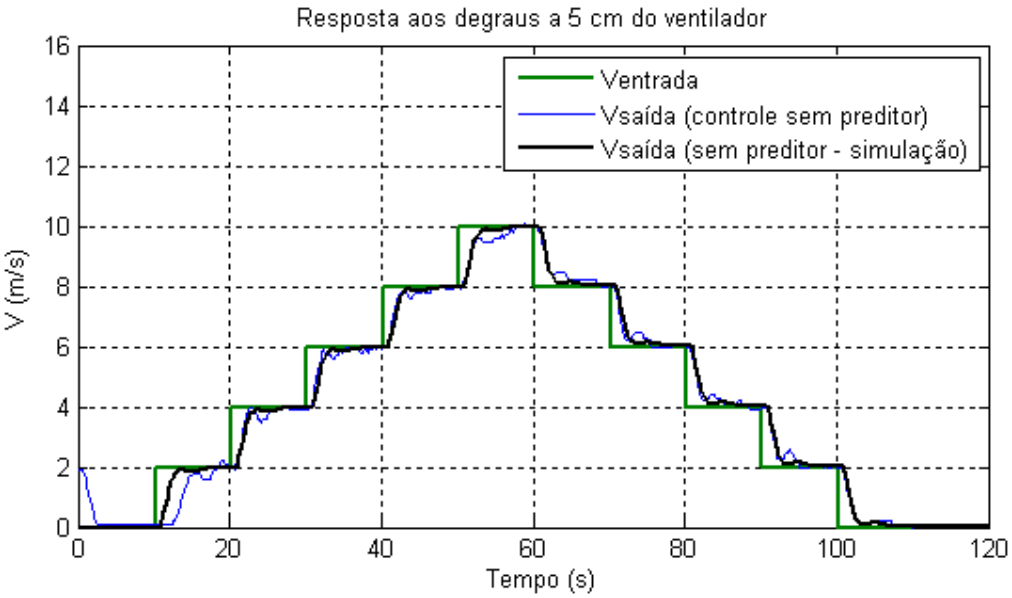


Figura 92: Simulação para sinais tipo degrau até 10 V, D=5,0 cm

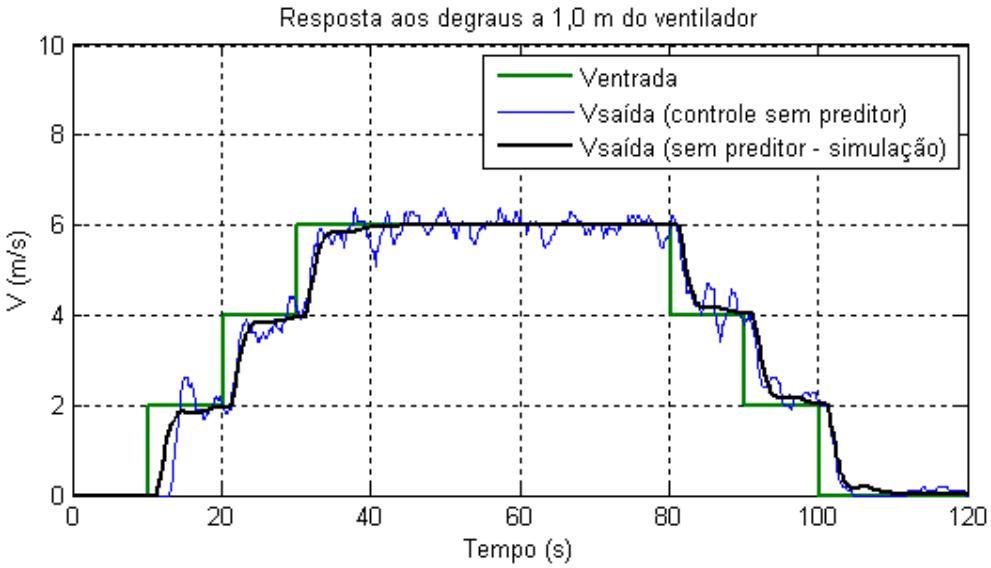


Figura 93: Simulação para sinais tipo degrau até 10 V, D=1,0 m

Demais curvas com os resultados das simulações são mostradas no anexo 4.

A seguir realizaram-se os ensaios com o compensador de tempo morto. O controlador neste caso passa a ter a configuração conforme a Figura 35. Devido aos erros de modelagem, não se pode considerar que o Preditor de Smith irá anular por completo os efeitos do atraso de transporte. Portanto, seguindo a recomendação proposta em Campos (2006), a nova sintonia do controlador PID para o sistema incluindo o Preditor de Smith considera que 60% do tempo morto é compensado com essa estratégia. Assim, nas fórmulas de sintonia do controlador (Tabela 1) foi considerado o valor de 0,40xθ no lugar de θ.

A tabela obtida no ensaio com compensador é mostrada a seguir.

Tabela 5: Parâmetros do controlador com a utilização do Preditor de Smith

	Modelo: Parâmetros obtidos pela curva de resposta do sistema			**Controlador PI: Parâmetros obtidos pelo IMC**		
				Com Preditor de Smith		
Distância (m)	**K**	**$\tau_{médio}$**	**$\theta_{médio}$**	**K_p**	**T_i**	**λ**
0,05	2,12	0,93	0,99	0,75	1,23	0,70
0,20	2,11	0,93	1,08	0,90	1,14	0,60
0,50	1,84	0,95	1,17	0,80	1,18	0,80
1,00	1,58	1,04	1,35	0,83	1,31	1,00
1,50	1,43	1,01	1,53	0,92	1,32	1,00
2,00	1,22	1,14	1,79	0,77	1,50	1,60

Comparando-se a Tabela 4 com a Tabela 5, verifica-se que se pôde utilizar um valor menor do parâmetro de desempenho λ e maior valor para o ganho proporcional, indicando-se que o sistema compensado terá um tempo de resposta menor em malha fechada do que o não compensado. Isso confirma o que foi demonstrado pela teoria no item 3.6 sobre o efeito do tempo morto na malha de controle. Conforme Figura 33, o aumento no ganho proporcional melhora o tempo de subida (*rising time*) e o tempo de estabilização (*settling time*) da resposta do sinal aplicado.

A resposta experimental do sistema controlado com e sem a aplicação do Preditor de Smith são comparadas na Figura 94 (para uma distância próxima do ventilador) e na Figura 96 (para uma distância mais afastada deste). Observa-se que a resposta sem o Preditor (em azul) foi mais afetada pelo atraso de transporte do que a obtida pela utilização do Preditor (em vermelho), apresentado maior sobressinal e flutuação em torno do valor controlado. Observando-se com mais detalhes, por exemplo, na aplicação do degrau de subida para a distância de 5 cm (Figura 95) e para a distância de 1,5 m (Figura 97) verifica-se nas curvas que as características de desempenho como tempo de subida - tr, tempo de estabilização - ts e sobressinal - Mp melhoram com aplicação do Preditor de Smith.

No anexo 5 apresentam-se resultados para outras distâncias e amplitudes de sinais tipo degrau aplicados, corroborando as conclusões aqui ressaltadas.

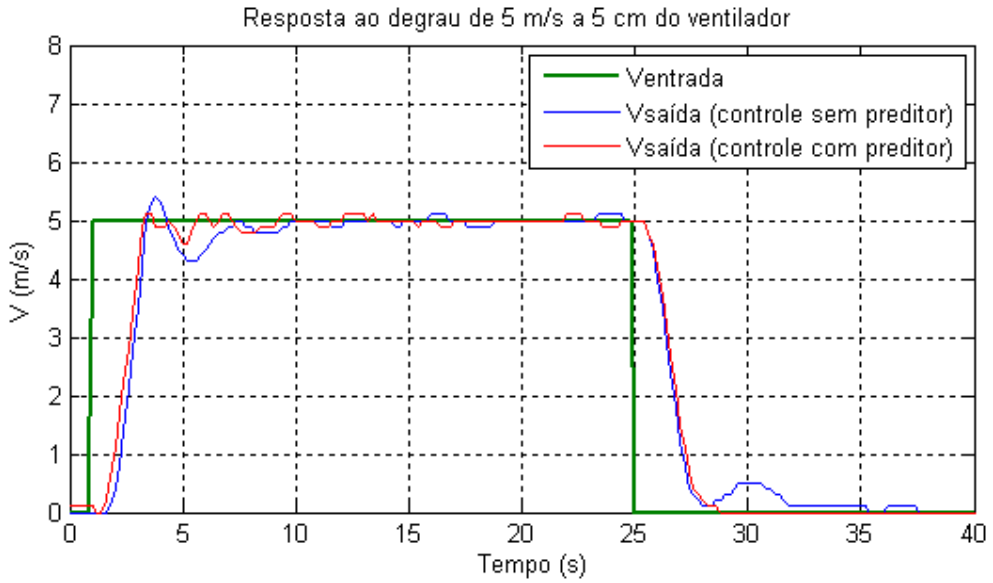


Figura 94: Controle sem e com o uso do Preditor para D=5 cm

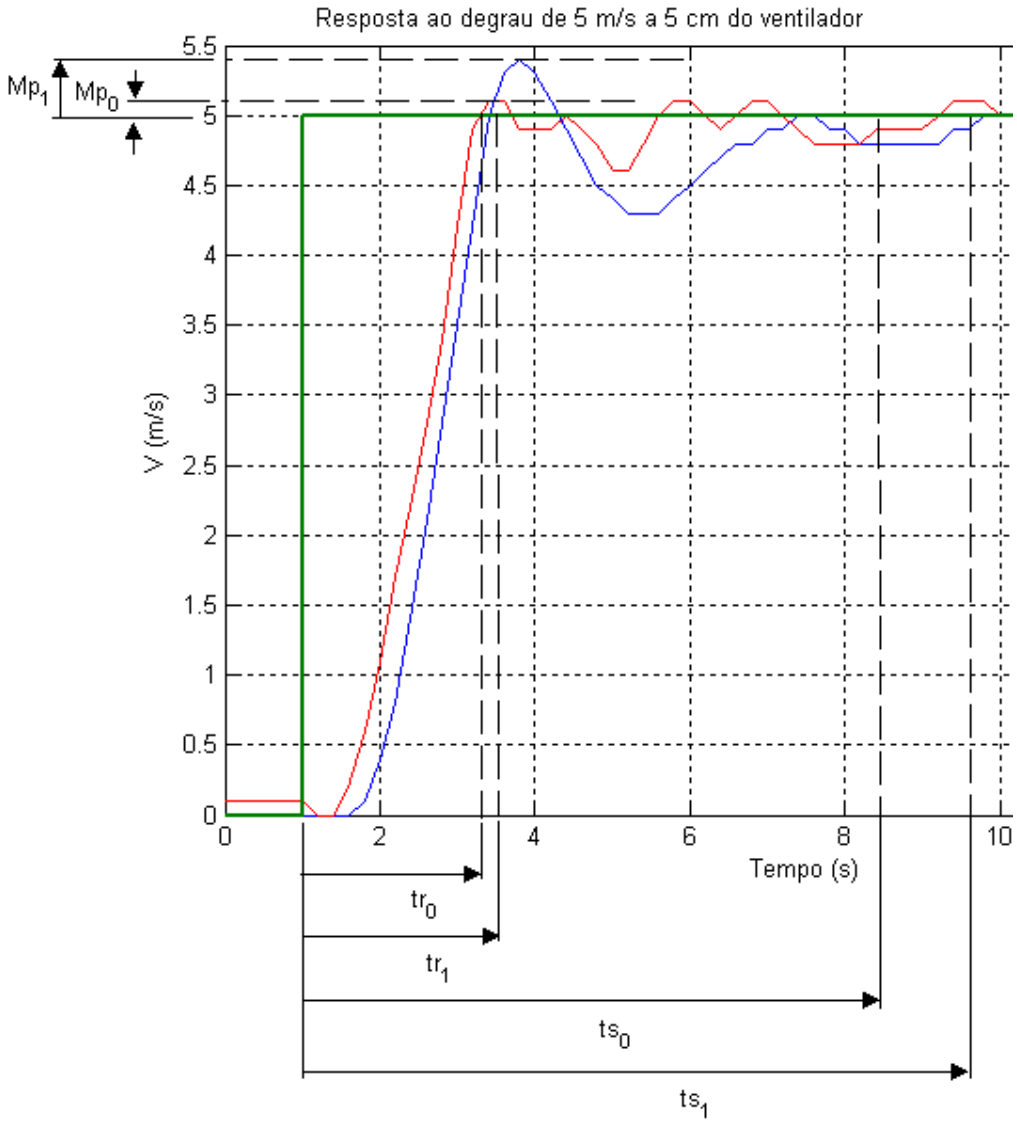


Figura 95: Características de desempenho para D=5 cm

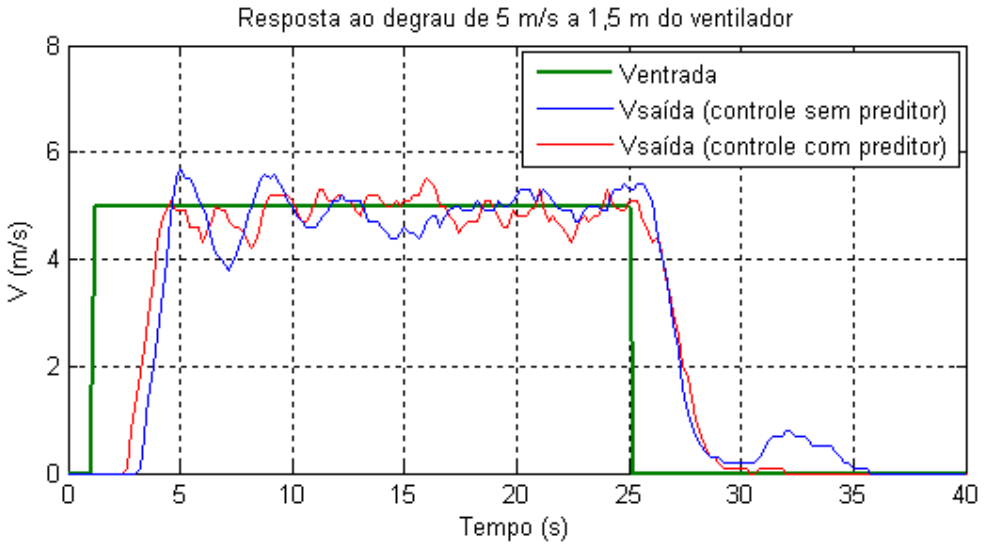


Figura 96: Controle sem e com Preditor para D=1,5 m

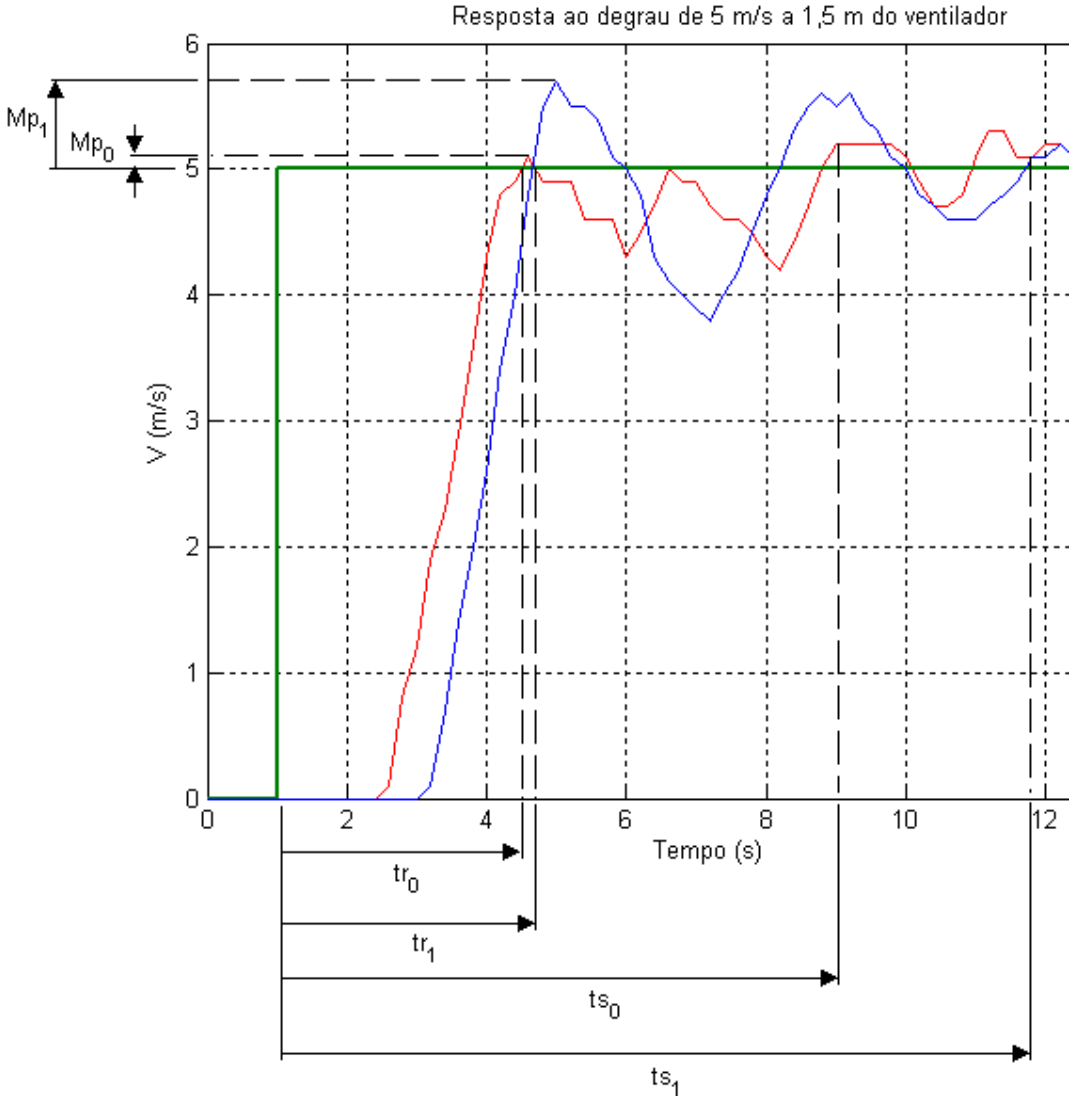


Figura 97: Características de desempenho para D=1,5 m

Aplicaram-se sucessivos degraus de subida e de descida na entrada da malha de controle. Nota-se, por exemplo, para as distâncias de 5 cm e 1,5 m (Figura 98 e Figura 99) que a curva de resposta obtida pelo controlador com Preditor de Smith tende a acompanhar melhor o sinal de *set-point* do que o controlador sem o Preditor.

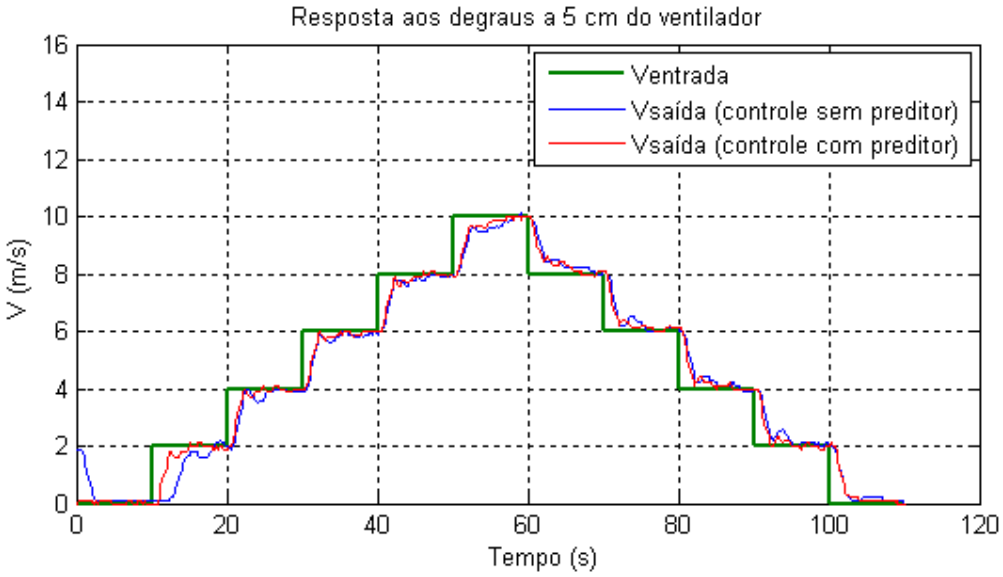


Figura 98: Resultado para sinais tipo degrau até 10 V, D=5,0 cm

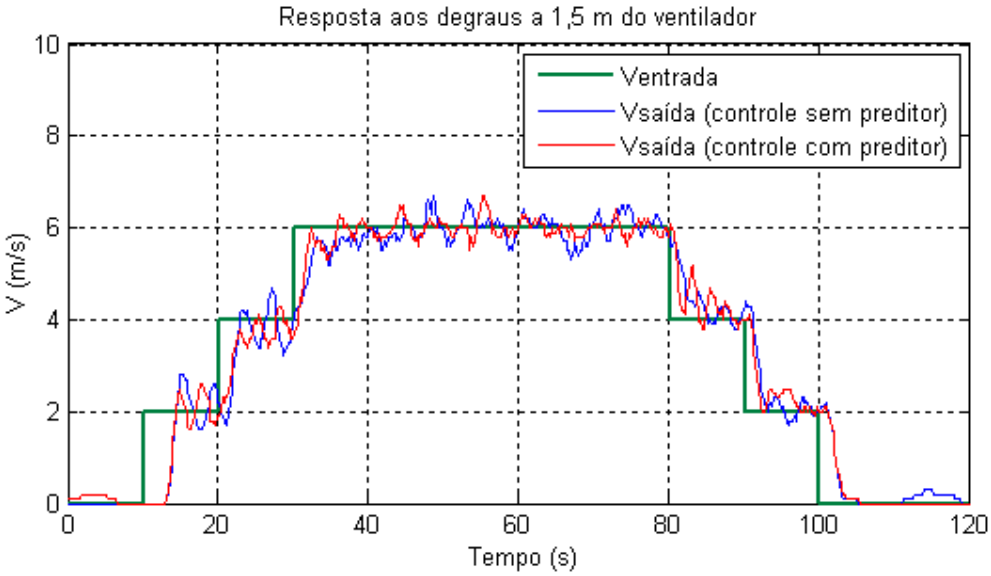


Figura 99: Resultado para sinais tipo degrau até 10 V, D=1,5 m

Em seguida, aplicou-se no *set-point* um sinal senoidal de frequência variável (*chirp*), para se observar o comportamento da resposta temporal sem e com a utilização do Preditor de Smith. A resposta (Figura 100) mostra que o controle com o Preditor mantém a amplitude da saída mais próxima do *set-point* para um intervalo de frequência mais amplo do que o caso sem o Preditor.

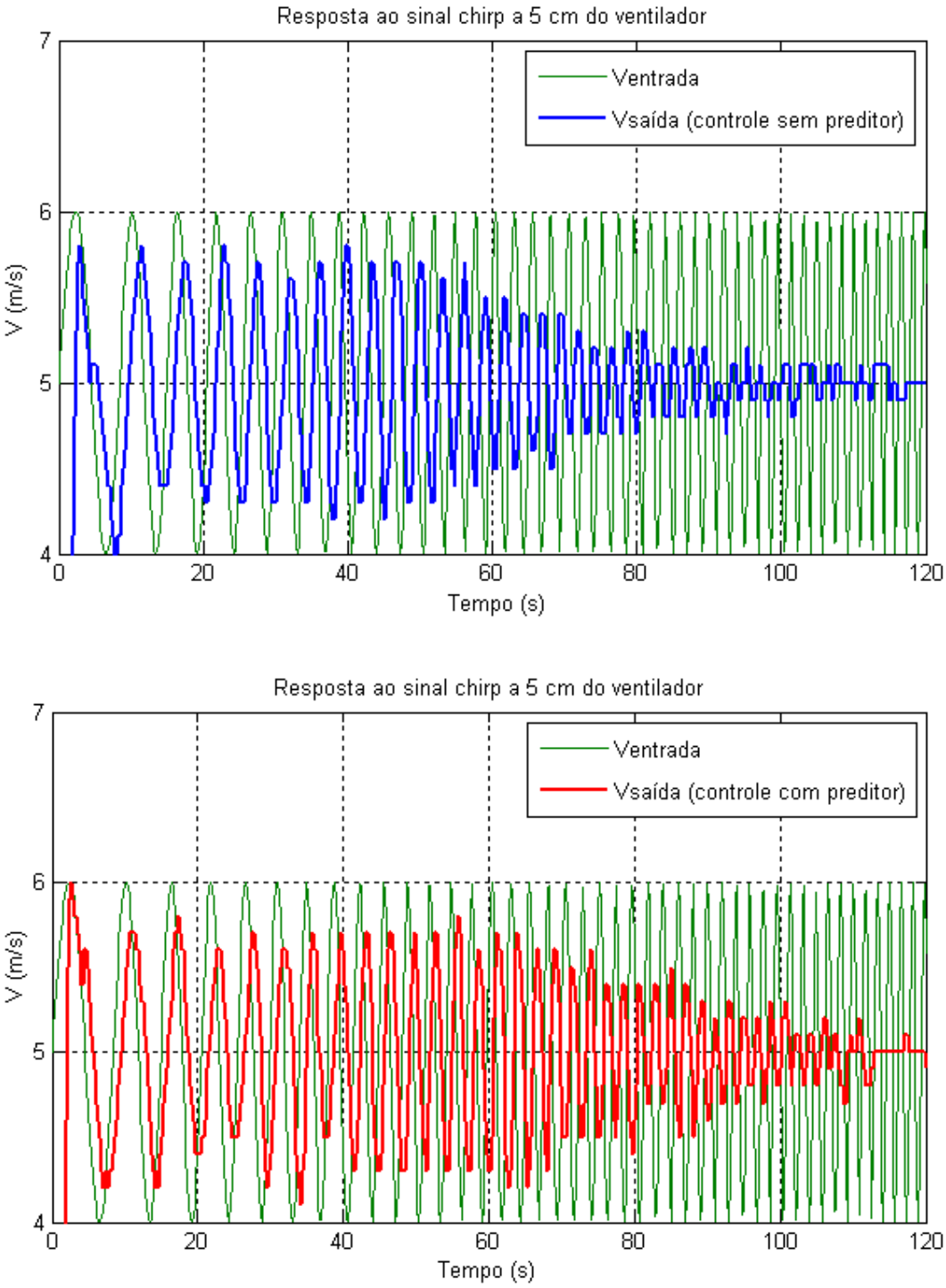


Figura 100: Resposta ao sinal do tipo *chirp* a 5 cm do ventilador

O último teste realizado foi a geração de vento em rajada. Considerando-se o espectro de Ochi & Shin (Figura 101) como exemplo. Nesta figura, o valor médio do vento é 20 m/s, e a realização temporal do espectro considera a escala real de tempo.

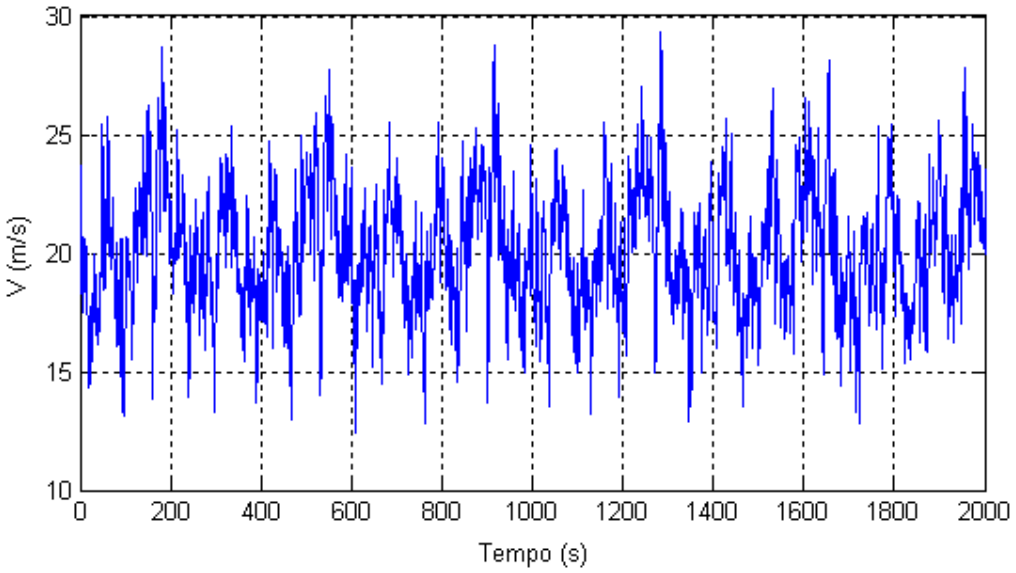


Figura 101: Série temporal de vento de Ochi & Shin

Num tanque de provas, os ensaios são feitos em escala reduzida e, portanto deve-se alterar a escala da série apresentada na Figura 101. Sendo v a velocidade do vento e t o tempo em segundos da série da Figura 101, adotando-se como fator de escala α=40, o sinal de referência na entrada v_{ref} e t_{ref} na malha será:

$$v_{ref} = \frac{v}{\sqrt{\alpha}} \tag{80}$$

$$t_{ref} = \frac{t}{\sqrt{\alpha}} \tag{81}$$

Foi aplicado esse sinal de referência na entrada da malha, com e sem o Preditor de Smith, para diversas distâncias com o ventilador (Figura 102 a Figura 104). Em todos os casos, apresentam-se as séries temporais e o gráfico de potência espectral, calculado desconsiderando-se o valor médio e com janelamento de 64 pontos (período de amostragem de 0,2 s).

Pode-se ver que para as distâncias de 5 cm e 20 cm há boa aderência entre o espectro de referência e o medido para frequências menores que 0,3 Hz (3,3 s). O formato das densidades espectrais também é semelhante, a menos de

uma diferença de energia que pode ser compensada através de uma calibração prévia. Há também notável vantagem da resposta experimental obtida com o Preditor de Smith. Para a distância maior de 1,5 m, as já discutidas flutuações e turbulências tornam-se mais relevantes e distorcem temporalmente as velocidades do vento, fazendo com que o espectro obtido experimentalmente seja muito distinto do espectro de referência.

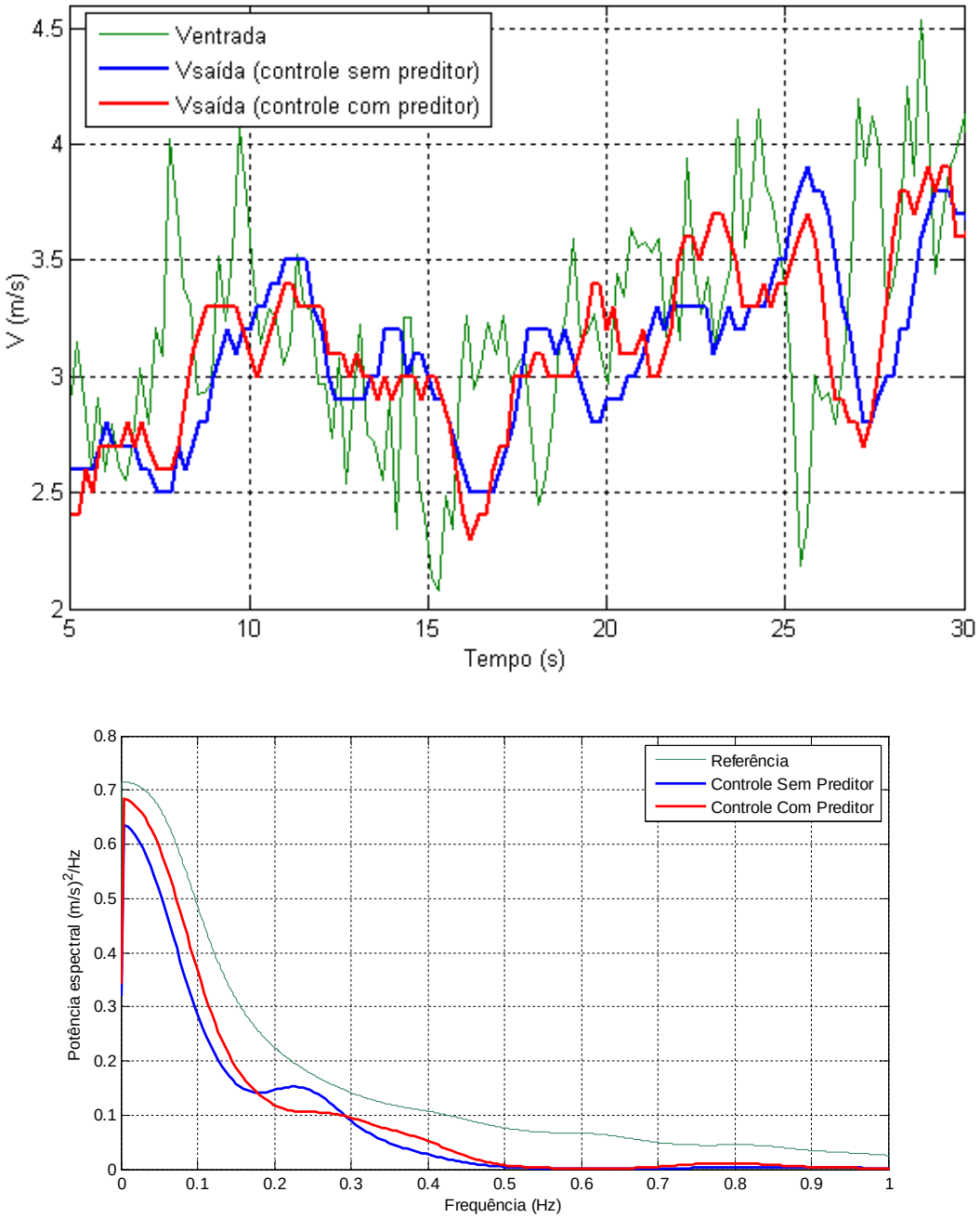


Figura 102: Comparação da série de Ochi & Shin para D=5 cm

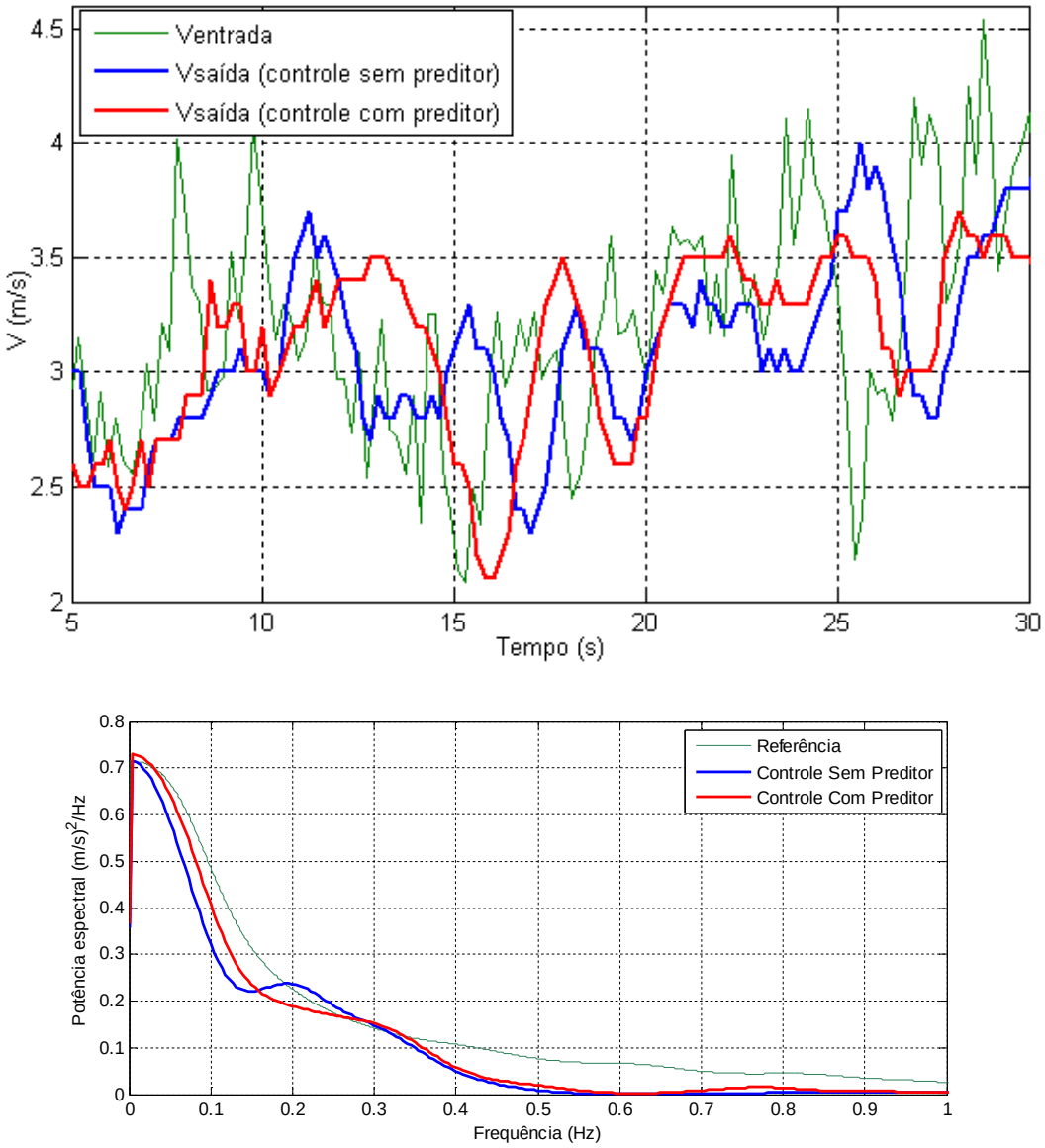
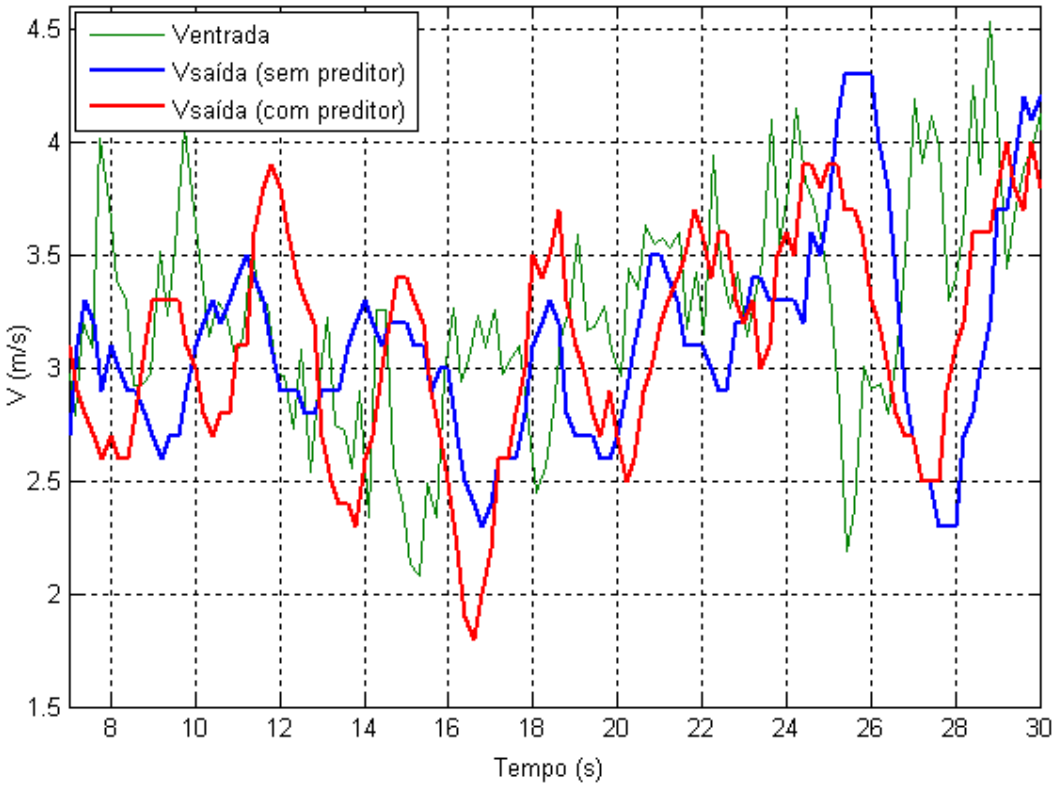


Figura 103: Comparação da série de Ochi & Shin para D=20,0 cm



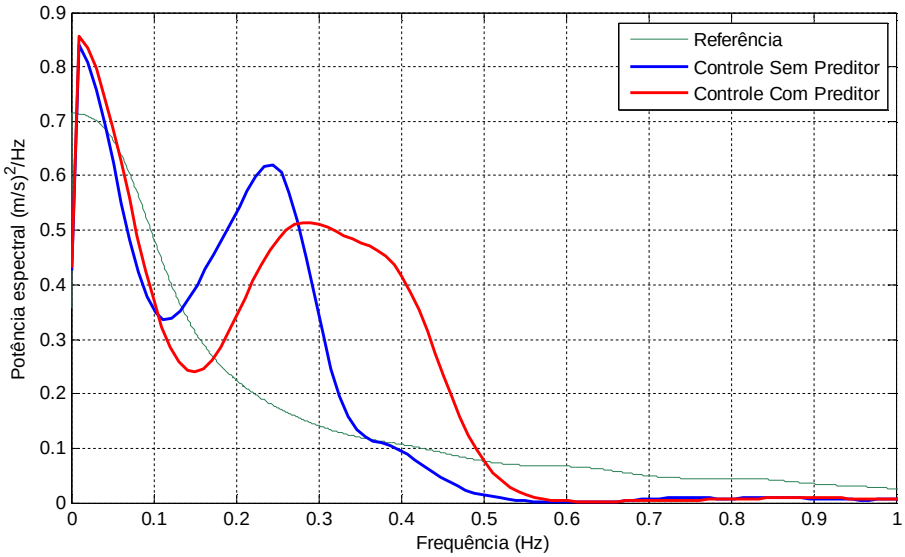


Figura 104: Comparação da série de Ochi & Shin para D=1,5 m

Constata-se pelas curvas obtidas nos ensaios e simulações que a aplicação do Preditor de Smith no controle melhora as características de desempenho do sistema de primeira ordem com atraso de transporte, sendo necessário que se conheça o modelo do sistema para poder implementá-lo. Os resultados da geração de vento foram melhores obtidos nas distâncias mais próximas do ventilador, onde o escoamento do ar é mais uniforme.

8. CONCLUSÕES

O trabalho compreendeu a aplicação de um compensador de tempo morto denominado Preditor de Smith em um sistema de primeira ordem com atraso, no caso um sistema de geração de vento em um tanque de prova. O deslocamento de ar na saída do ventilador leva certo tempo até atingir um ponto específico no tanque que somado a outros atrasos do sistema, como o devido à automação, constituem um tempo morto que afeta as características de desempenho do sistema.

Em alguns pontos ao longo do tanque foram tomados os parâmetros das curvas de resposta do sistema obtidas mediante a aplicação de sinal degrau na sua entrada. Com esses parâmetros foi possível modelar o sistema em cada um desses pontos e em seguida fazer a sua validação. Uma vez que o modelo do sistema foi conhecido, adotou-se o método do modelo interno (IMC) para projetar um controlador PI, estabelecendo um critério de desempenho através de um parâmetro λ que implica na velocidade com que a saída do sistema acompanha o *set-point*.

Projetado o controlador, foram aplicados na sua entrada vários sinais do tipo degrau, senoidal e dente de serra de modo a observar o comportamento do sistema em duas situações: uma utilizando o Preditor de Smith e outra não.

Os resultados mostraram que o compensador de tempo morto melhorou as características de desempenho do sistema ao aplicar-se sinal do tipo degrau, como tempo de subida, tempo de estabilização e sobressinal.

Os ensaios de aplicação de sinal senoidal mostraram que a resposta em frequência melhorou com a aplicação do Preditor. Da mesma forma, a reprodução do sinal dente de serra melhorou com a utilização do compensador.

Embora se tenha constatado que o sistema utilizando um inversor de frequência para controle da velocidade de ventilador não possibilitou reproduzir perfeitamente uma série temporal de vento, é possível simular rajadas que apresentem períodos maiores que 2 s, sendo melhores reproduzidas quanto mais próximo o modelo de embarcação estiver do ventilador, até um distância de 0,5 m deste.

Pôde-se observar, mesmo assim, o comportamento de um controle que utiliza o compensador de tempo morto em relação a outro que não o utiliza.

Conclui-se, portanto que, uma vez conhecido o modelo do sistema, é viável a utilização do Preditor de Smith em sistemas que apresentam tempo morto em sua dinâmica.

8.1 Sugestão de Trabalhos Futuros

É viável a partir daí o desenvolvimento de outros modos para geração de vento utilizando ventilador tais como a utilização de aletas móveis que, por meio de um sistema de servomecanismo, permita variar a velocidade do vento. Outra forma seria o uso de ventilador com pás ajustáveis. Ainda assim, poderia haver uma combinação destes modos com o descrito neste trabalho, que utiliza inversor de frequência para variação de velocidade do ventilador.

De qualquer meio que se utilize para simular a variação do vento, é necessário que se estude o comportamento do sistema com relação ao atraso de transporte existente neste, introduzindo melhoria na malha de controle através do compensador de tempo morto como se observou nos ensaios realizados.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguirre, L. A. (2004). *Introdução à Identificação de Sistemas - Técnicas Lineares e Não Lineares Aplicadas a Sistemas Reais.* Belo Horizonte, Brasil, Minas Gerais, Brasil: UFMG.

AMCA, ANSI. (2000). *Laboratory Methods of Testing Fans for Aerodynamic Performance Rating.* Illinois, Estados Unidos, Estados Unidos: AMCA.

API. (2005). *RP 2A-WSD - Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Working Stress Design, American Petroleum Institute.* Washington, D.C., Estados Unidos: IHS.

Australian Maritime College. (2011). *http://www.amc.edu.au/*. Acesso em 15 de 08 de 2012, disponível em Australian Maritime College.

Barlow, J. B., Rae, W. H., & Pope, A. (1999). *Low Speed Wind Tunnel Testing.* New York, Estados Unidos: John Wiley & Sons.

Brown, D. T., & Liu, F. (1998). *Use of Springs to Simulate the Wind Induced Moments on Turret on Moored Vessels* (Vol. 20). London, Reino Unido: Elsevier.

Campos, M. C., & Teixeira, H. C. (2006). *Controles Típicos de Equipamentos e Processos Industriais.* São Paulo, Brasil: Edgard Blucher.

Carvalho, F. (2007). *Geração de Vento para Estudo de Modelos em Escala de Estruturas Offshore em Tanques Oceânicos.* Rio de Janeiro, Brasil: Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Chevarria, G. C., & Coelho, R. R. (2006). *Identificação de Sistemas de Primeira Ordem com Atraso de Transporte.* Rio Grande do Sul, Brasil: XXI Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia.

Daga, L. (2008). *http://leonardodaga.insyde.it/Simulink/RTBlockset.htm*. Acesso em 20 de 7 de 2012, disponível em Leonardo Daga.

Det Norske Veritas. (1995). *DNV-95-2018 - Guideline for Offshore Structural Reliability Analysis.* Oslo, Noruega: DNV.

Det Norske Veritas. (2010). *DNV-RP-C205 - Recommended Practice for Environmental Conditions and Environmental Loads.* Oslo, Noruega: DNV.

Dukan, F., & Hana, S. (2008). *TMR4240 - Marine Control Systems Assignment 1 - Modeling and Simutation of Environmental Disturbances.* Trondhein, Noruega: Norwegian University of Science and Technology.

Garcia, C. (2008). *Controle de Processos Industriais - Capítulos 6 a 8.* São Paulo, Brasil: USP.

Garcia, C. (2005). *Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Eletromecânicos.* São Paulo, Brasil: EDUSP.

ITTC. Developments in Experimental Techniques. *Proceedings of the 23rd International Towing Tank Conference - Vol.1* (pp. 235-694). Veneza, Itália: 2002.

ITTC. Modeling and Simulation of Wind Environments. *Proceedings of the 24th International Towing Tank Conference - Vol.1. 1*, pp. 255-311. Edinburgh, Reino Unido: 2005.

Kaasen, K. E. (1999). Time Domain Model Representations of Standard Wind Gust Spectra. *Proceedings of the 19th International Offshore and Polar Engineers. 3*, pp. 74-78. Brest, França: ISOPE.

Komáromi, Z., Pilászy, G., & Móczár, G. (2010). Hardware-Software Co-Design in Control Engineering Based on MATLAB Environment. *Transactions on Computers and Intelligent Systems - Vol.2* (pp. 95-100). Finlândia: ISAST.

LabOceano. (2008). *http://www.laboceano.coppe.ufrj.br*. Acesso em 5 de Junho de 2013, disponível em Laboratório de Tecnologia Oceânica.

Machado, L. L. (1994). *Controle de Processos Distribuídos Na Presença de Tempo Morto.* Florianópolis, Brasil, Santa Catarina: Monografia (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina.

Marin. (2003). *http://www.marin.nl*. Acesso em 1 de Junho de 2013, disponível em Maritime Research Institute Netherlands.

Marintek. (2012). *http://www.marintek.com*. Acesso em 1 de Junho de 2013, disponível em Norwegian Marine Technology Research Institute.

Ochi, M. K., & Shin, Y. S. (1988). Wind Turbulent Spectra for Design Considerations of Offshore Structures. *Proceedings of the 20th Offshore Technology Conference. Paper No. 5736*, pp. 461-467. Texas, Estados Unidos: OTC.

OCIMF. (1981). *Disabled Tankers - Report on Studies on Ship Drift and Towage.* Londres, Inglaterra: Whiterby & Co. Ltd.

Ogata, K. (2010). *Engenharia de Controle Moderno* (5a ed.). São Paulo, Brasil, Brasil: Pearson Prentice Hall.

Parra, L. A., & Tannuri, E. A. (2011). Control of a Wind Generation System Applied to Ocean Basins. *21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering* (p. 10). Rio Grande do Norte, Brasil: COBEM.

Rivera, D. E., Morari, M., & Skogestad, S. (1986). Internal Model Control - PID Controller Design. *American Chemical Society - Vol.25, No.1* (pp. 252-265). California, Estados Unidos: ACS.

Sakthivel, G., Anandhi, T. S., & Natarajan, S. P. (September de 2011). Design of Fuzzy Logic Controller for a Spherical Tank System and Its Real Time Implementation. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) , v. 1* (3), pp. p. 934-940.

Singh, C., & Poddar, K. (2008). Implementation of a LabVIEW-Based Automated Wind Tunnel Instrumentation System. *IEEE - INDICON 2008 - Vol.1* (pp. 103-108). Kanpur, India: IITK.

Tannuri, E. A., & Cruz, J. J. (2008). *Entendendo e Ajustando Malhas de Controle.* São Paulo, São Paulo, São Paulo, Brasil: PECE_USP.

WEG Equipamentos Elétricos. (2007). *Manual do Inversor de Frequência CFW-10.* Jaraguá do Sul, Santa Catarina, Brasil: Weg.

WEG Equipamentos Elétricos. (2011). *Manual do Inversor de Frequência CFW-700.* Jaraguá do Sul, Santa Catarina, Brasil: Weg.

Zenghong, H., & Pengtao, L. (2009). *The Development of Wind Velocity Control System Based on PSDNN.* Xian, China, Shaanxi, China: Northwestern Polytechnical University.

ANEXO 1 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS DISPOSITIVOS

Os seguintes dispositivos foram instalados no laboratório do tanque de prova para compor o sistema de controle em malha fechada:

- Ventilador - Fabricante *Ventisilva*, modelo RAX2:

- Tensão de alimentação do motor: trifásica de 220 VAC;
- Potência: 89 W (para 220 VAC);
- Rotação nominal: 3.250 RPM;
- Dimensões (LxAxP): 265 x 265 x 85 mm.

- Inversor de frequência #1 - Fabricante *WEG*, modelo CFW-10:

- Tensão de entrada: 220 VAC e frequência de 60 Hz;
- Tensão de saída: 220 VAC trifásica e frequência variável de 0 a 300 Hz;
- Corrente nominal de saída de 10 A;
- Entrada analógica (AI1): para comando, *range* de 0 a 10 VDC;
- Entradas digitais (DI1 a DI4): para configuração do modo de operação;
- Controle escalar (V/F).

- Inversor de frequência #2 - Fabricante *WEG*, modelo CFW-700:

- Tensão de entrada: 220 VAC e frequência de 60 Hz;
- Tensão de saída: 220 VAC trifásica e frequência variável de 0 a 300 Hz;
- Corrente nominal de saída de 6 a 10 A;
- Entradas analógicas (AI1 e AI2): para comando, *range* de 0 a 10 VDC;
- Entradas digitais (DI1 a DI8): para configuração do modo de operação;
- Conexão para resistor de frenagem;
- Controle escalar (V/F), VVW ou controle vetorial programável.

- Resistor de frenagem – Fabricante *Eletele*:

- Potência 600 W;
- Valor de resistência 39 Ω.

- Conversor USB/RS422 – Fabricante *Novus*, modelo USB-i485:

- Taxa de transmissão: 300 bps a 250 Kbps;
- Isolação: 1.500 Vcc entre a interface USB e a interface RS485/RS422;
- Comprimento máximo do cabo: 1.200 m.

- Placa de aquisição de dados – Fabricante *Advantech*, modelo USB-4702:

- 8 canais de entrada analógica, com resolução de 12 bits;
- Taxa de amostragem: 10 KS/s;
- 2 canais de saída analógica de 0 a 5 VDC;
- 8 canais de entrada e 8 canais de saída digital.

- Conversor 5/10 VDC - Amplificador operacional LM 741, com:

- R_offset = *trimpot* de 10 KΩ, para ajuste de offset;

- R1 = 2 resistores de 1,2 KΩ ligados em série;

- R2 = *trimpot* de 1 KΩ, para ajuste do ganho.

$$\text{Ganho} = \frac{R1 + R2}{R1} = \text{ajustável até } 2{,}2 \qquad (82)$$

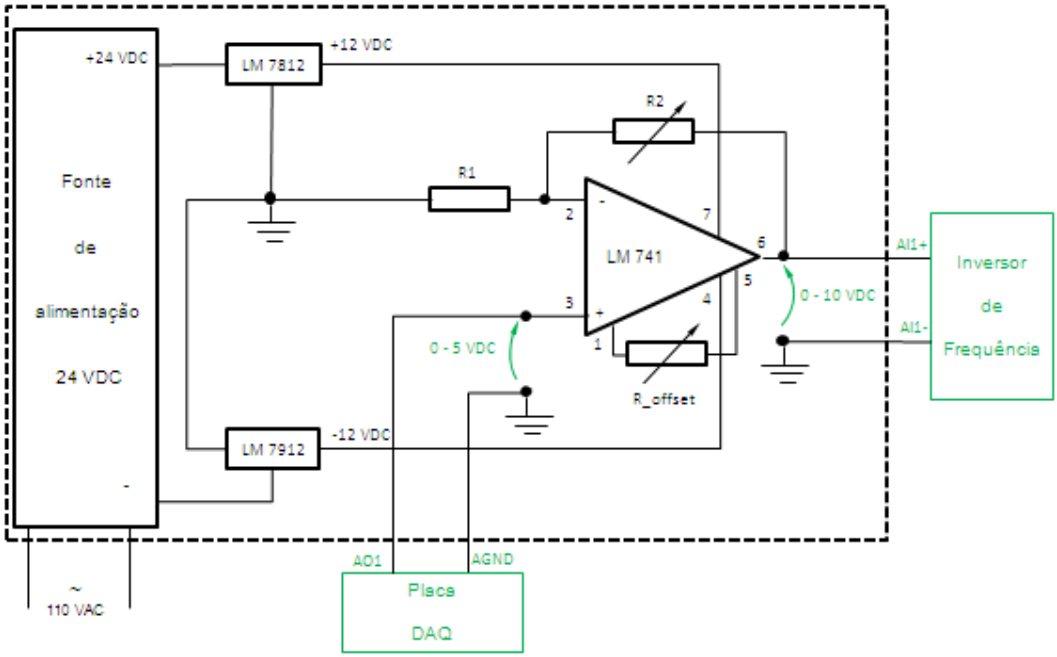


Figura 105: Diagrama elétrico do conversor 5/10 VDC

- Anemômetro - Fabricante *FT Technologies*, modelo FT702LM:

- Intervalo de medição da direção do vento: 0 - 50 m/s, resolução 0,1 m/s;
- Intervalo de medição da direção do vento: 0 - 360˚, resolução 1˚;
- Interface RS 422;
- Taxa de aquisição de dados: 5 leituras por segundo;
- Alimentação de 3,5 a 30 VDC.

ANEXO 2 – RESULTADO DOS ENSAIOS DE IDENTIFICAÇÃO

Foi aplicado sinal do tipo degrau na entrada do sistema em malha aberta e observado a resposta na saída. As tensões aplicadas foram de 2, 3, 4 e 5 V, sendo realizados 3 ensaios para cada uma delas, para que se obtivesse uma média dos parâmetros. Isso foi feito para as distâncias de 5 cm, 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m e 2,0 m entre o ventilador e o sensor. Seguem os resultados obtidos:

- Sinal de entrada tipo degrau – Distância 5,0 cm

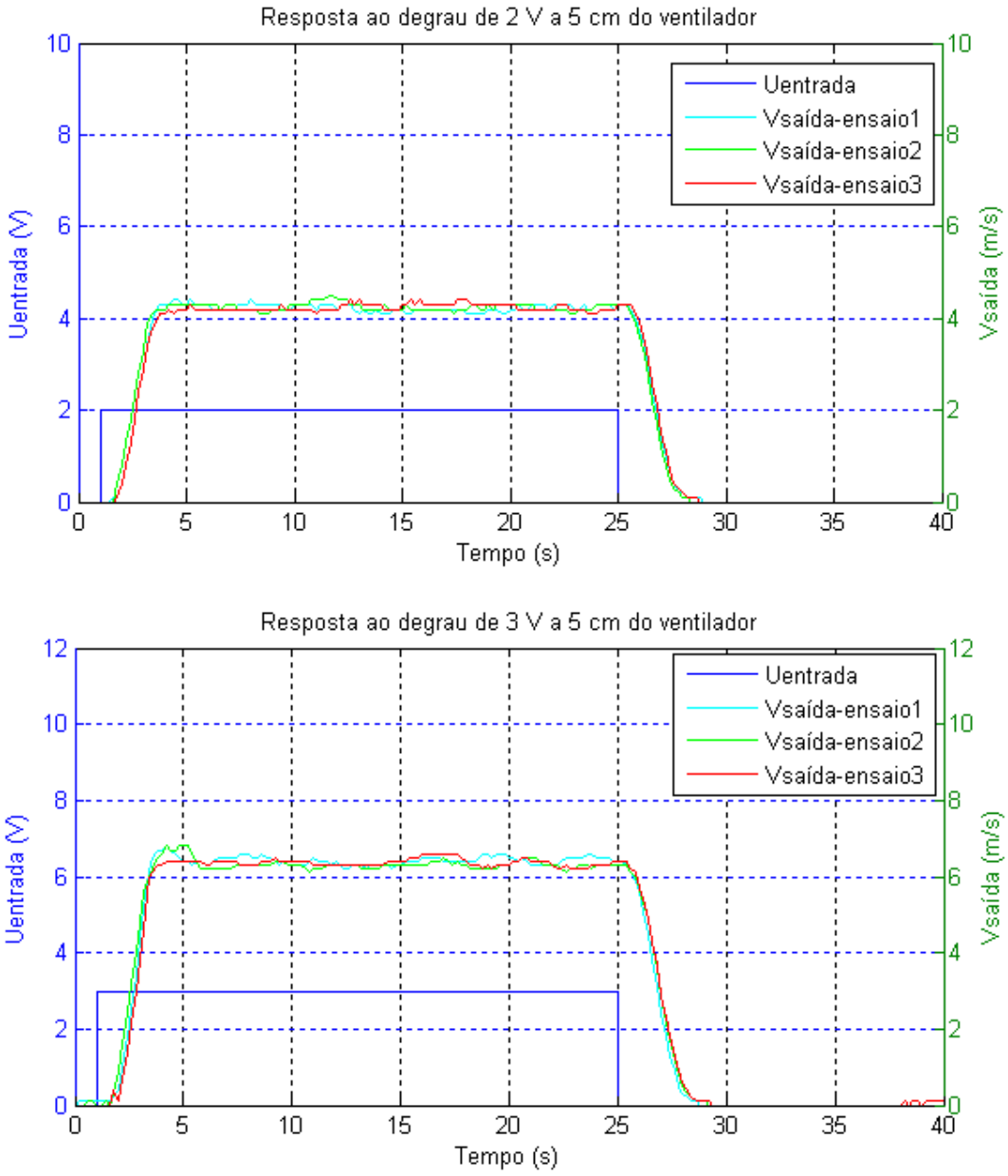
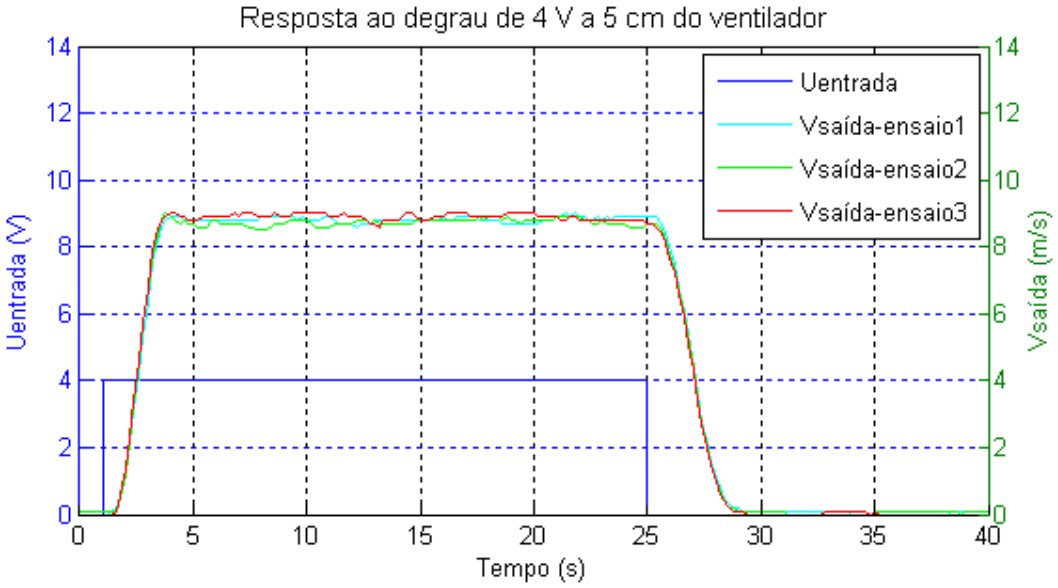


Figura 106: Sinal degrau de 2 e 3 V, D=5,0 cm



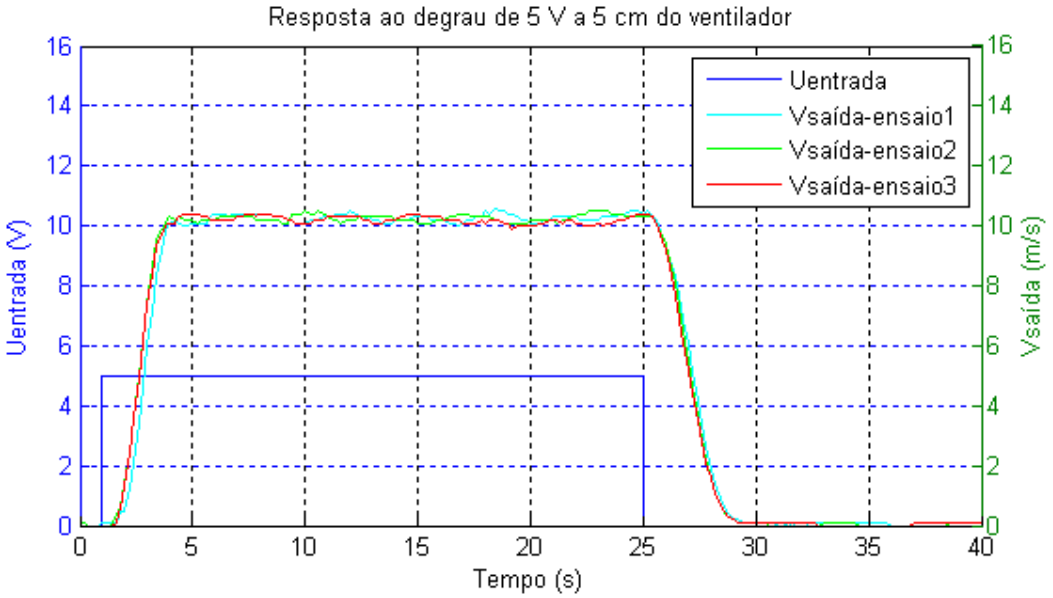
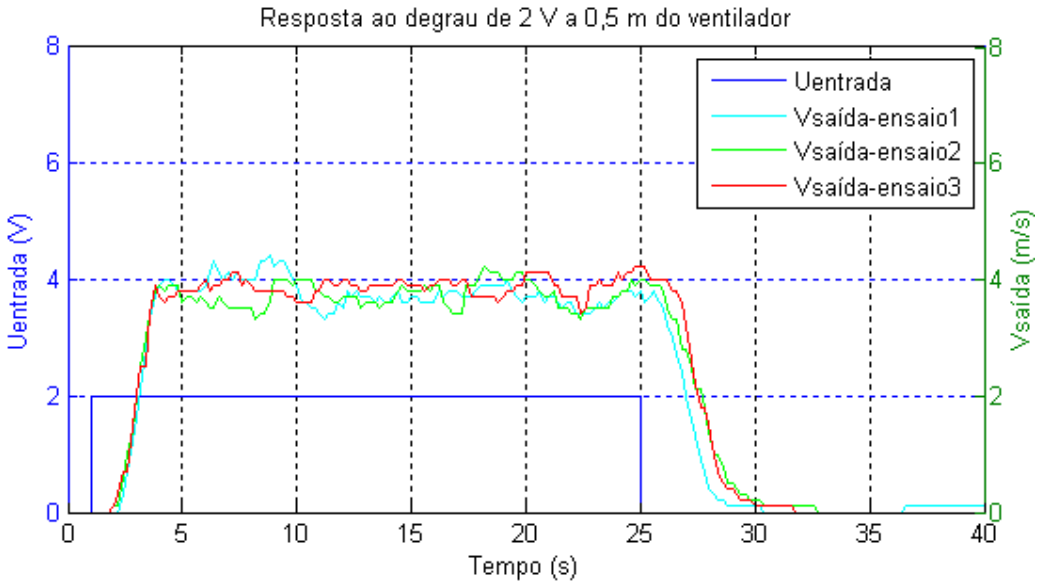


Figura 107: Sinal degrau de 4 e 5 V, D=5,0 cm

- Sinal de entrada tipo degrau – Distância 0,5 m



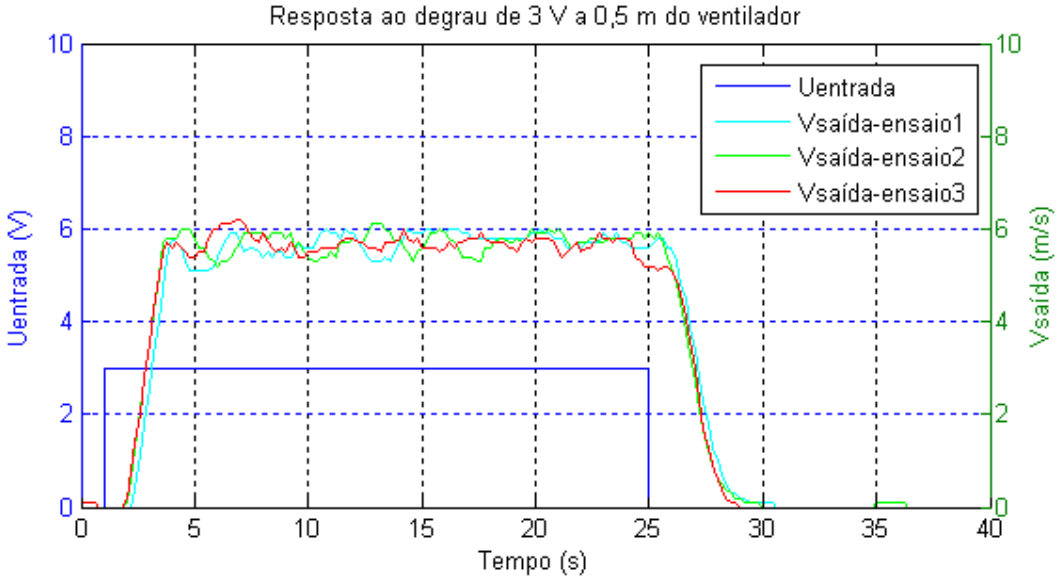
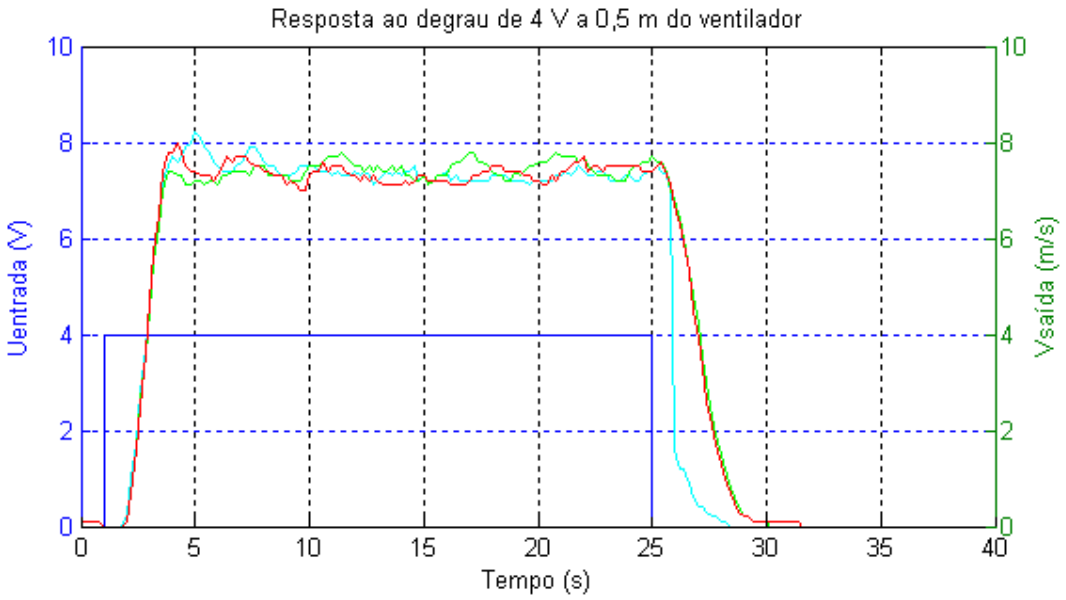


Figura 108: Sinal degrau de 2 e 3 V, D=0,5 m



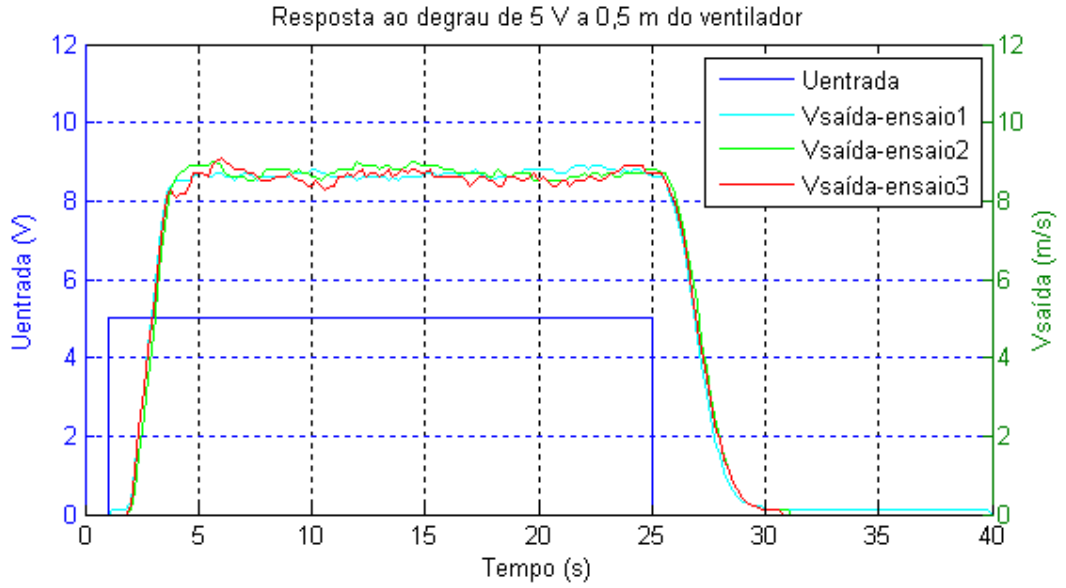
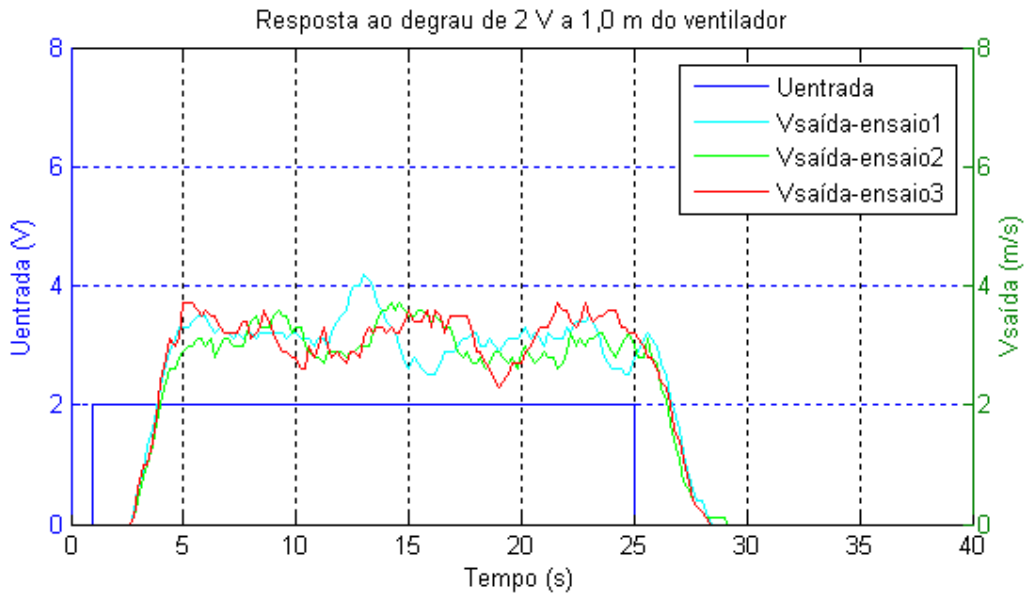


Figura 109: Sinal degrau de 4 e 5 V, D=0,5 m

- Sinal de entrada tipo degrau – Distância 1,0 m



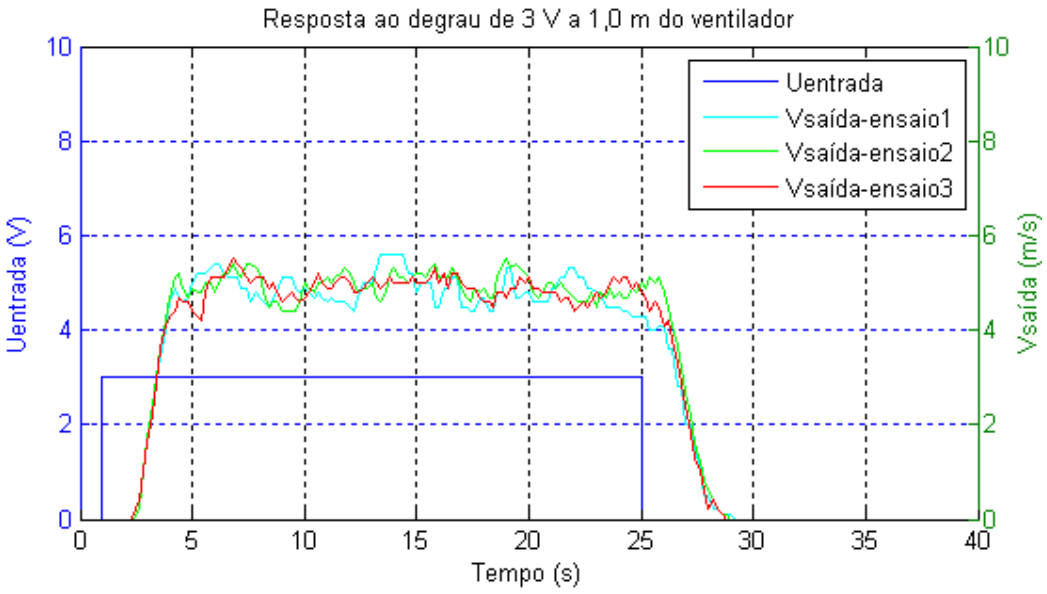
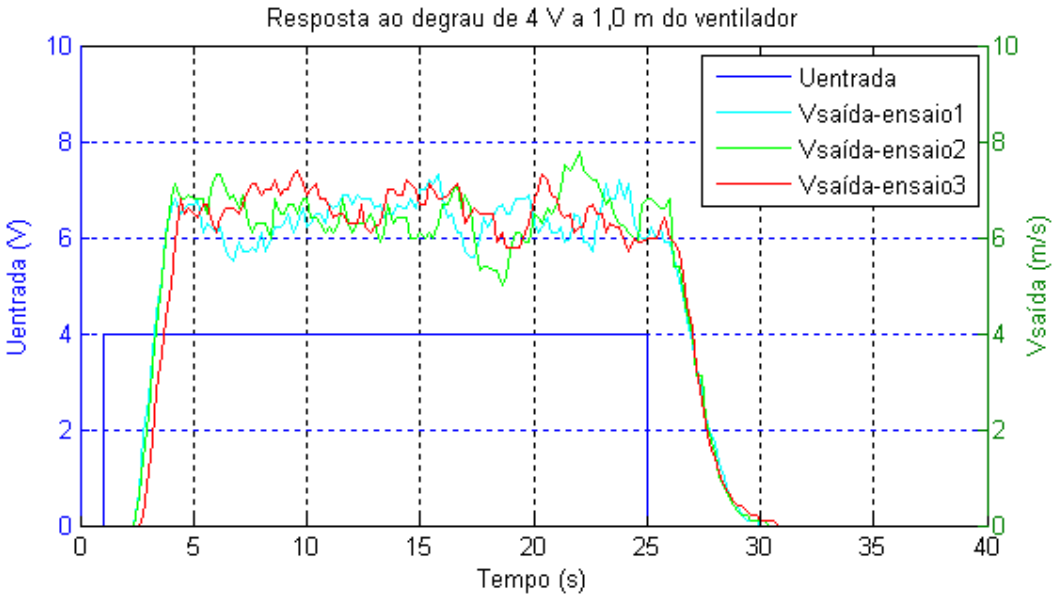


Figura 110: Sinal degrau de 2 e 3 V, D=1,0 m



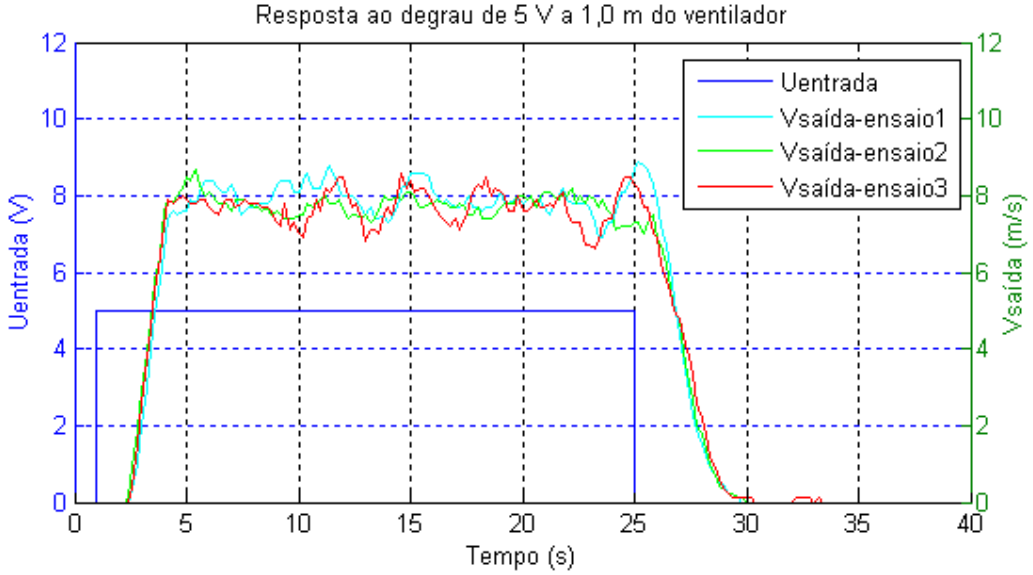
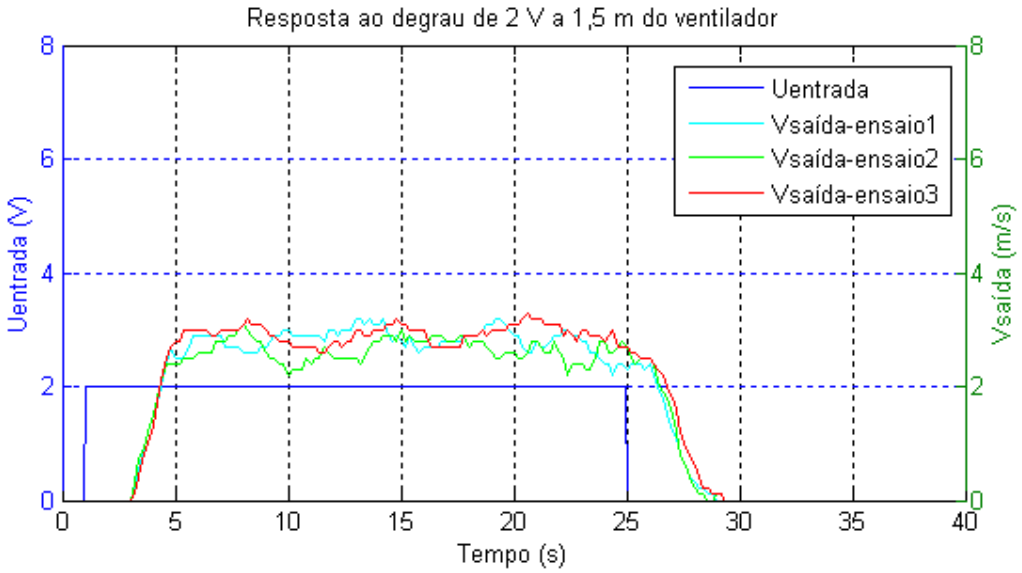


Figura 111: Sinal degrau de 4 e 5 V, D=1,0 m

- Sinal de entrada tipo degrau – Distância 1,5 m



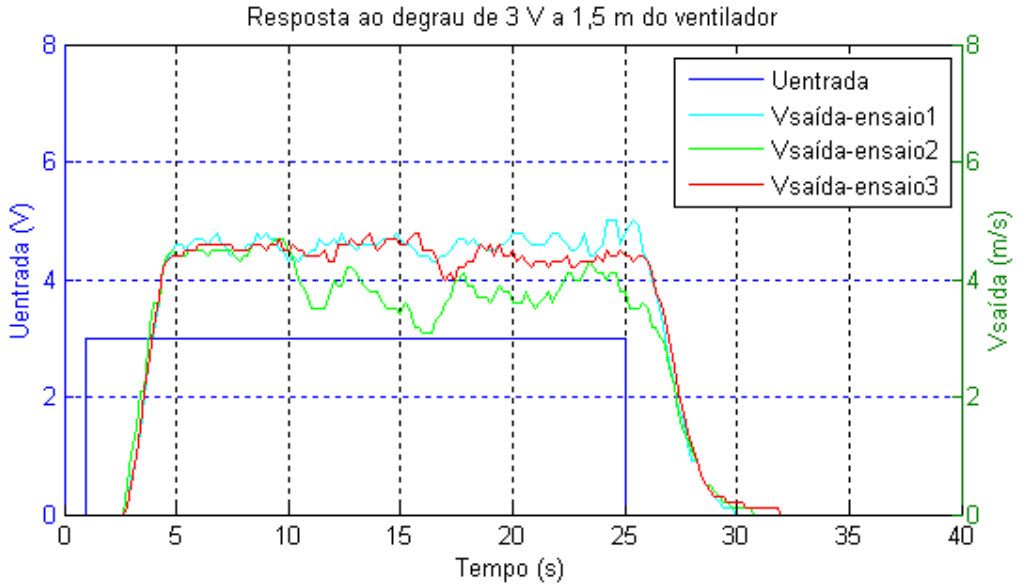
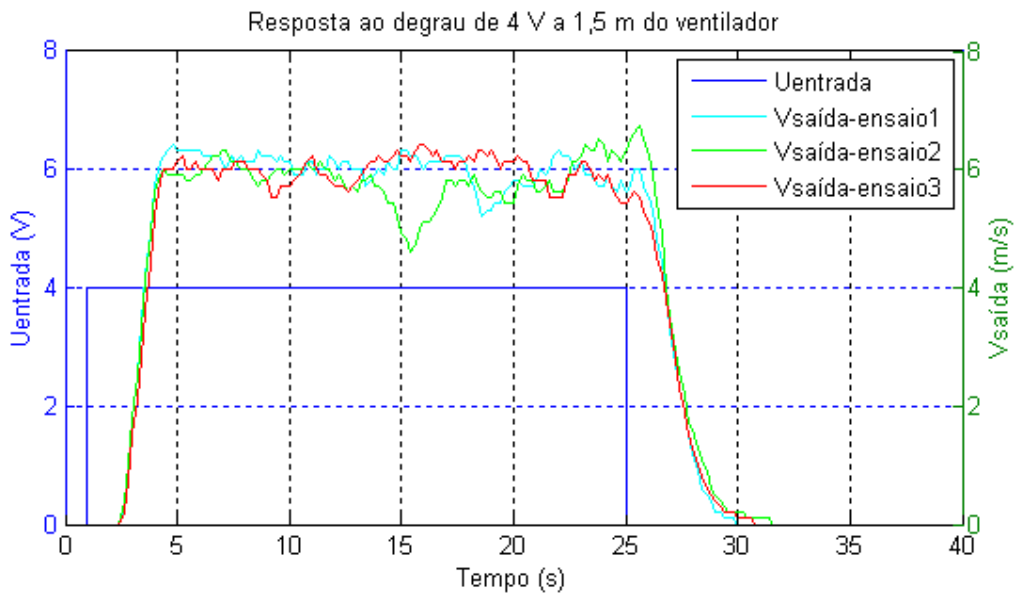


Figura 112: Sinal degrau de 2 e 3 V, D=1,5 m



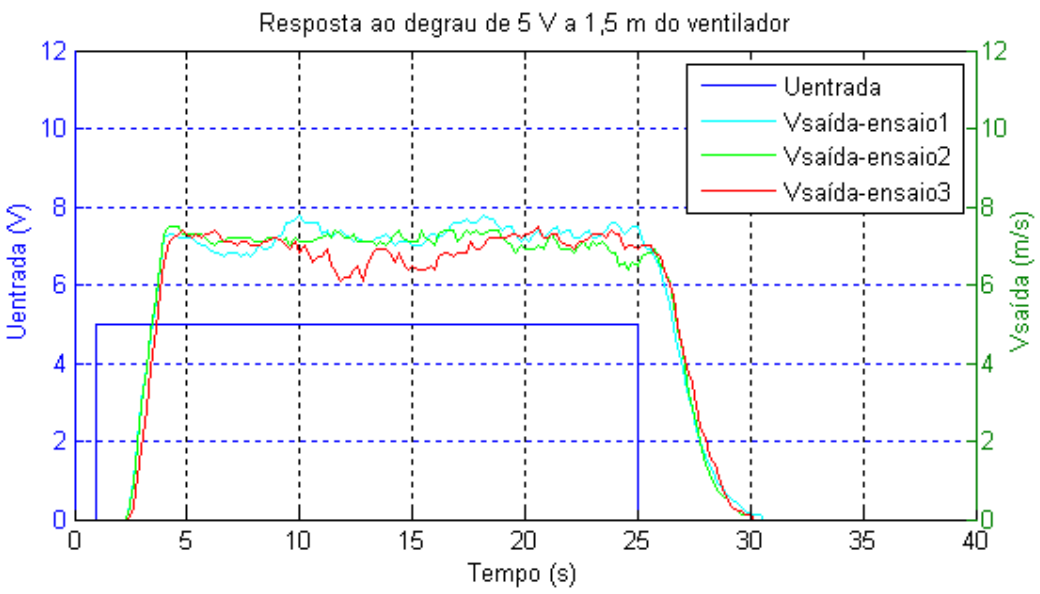
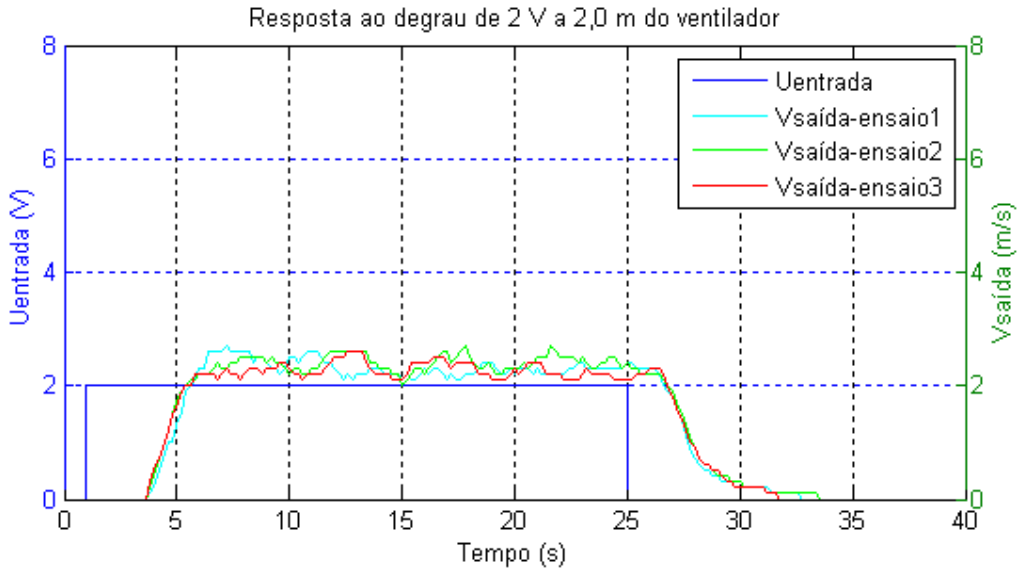


Figura 113: Sinal degrau de 4 e 5 V, D=1,5 m

- Sinal de entrada tipo degrau – Distância 2,0 m



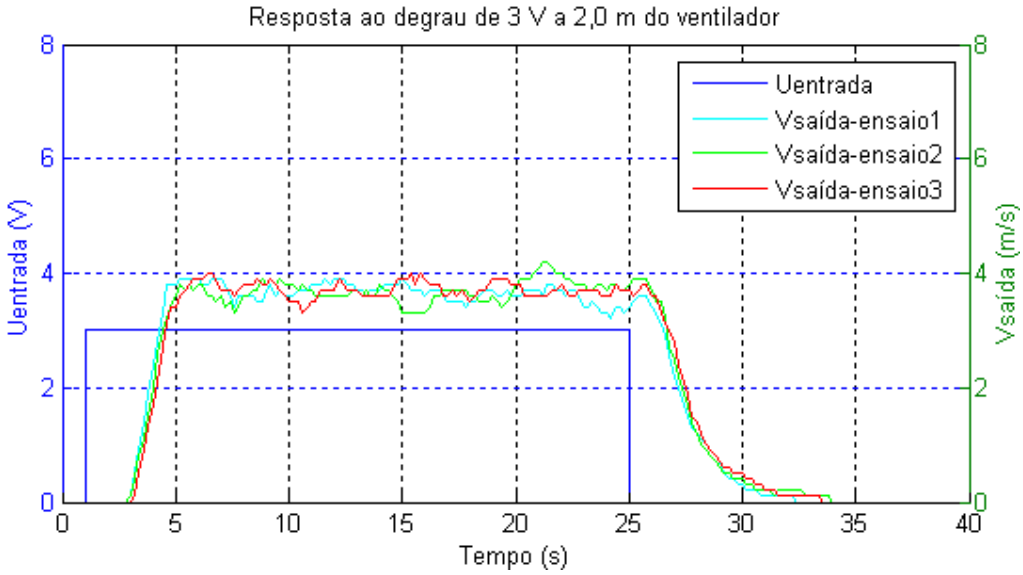
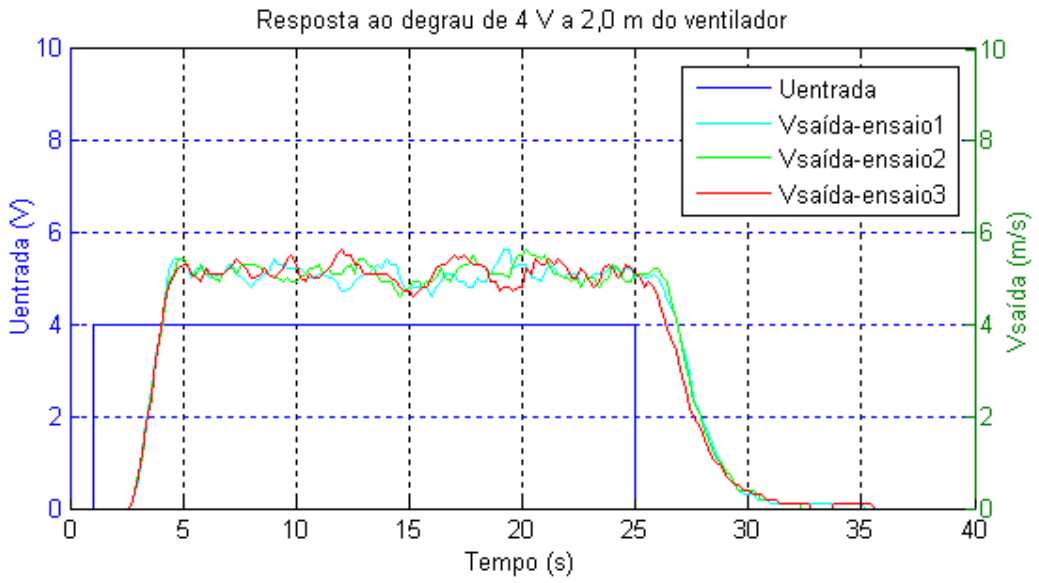


Figura 114: Sinal degrau de 2 e 3 V, D=2,0 m



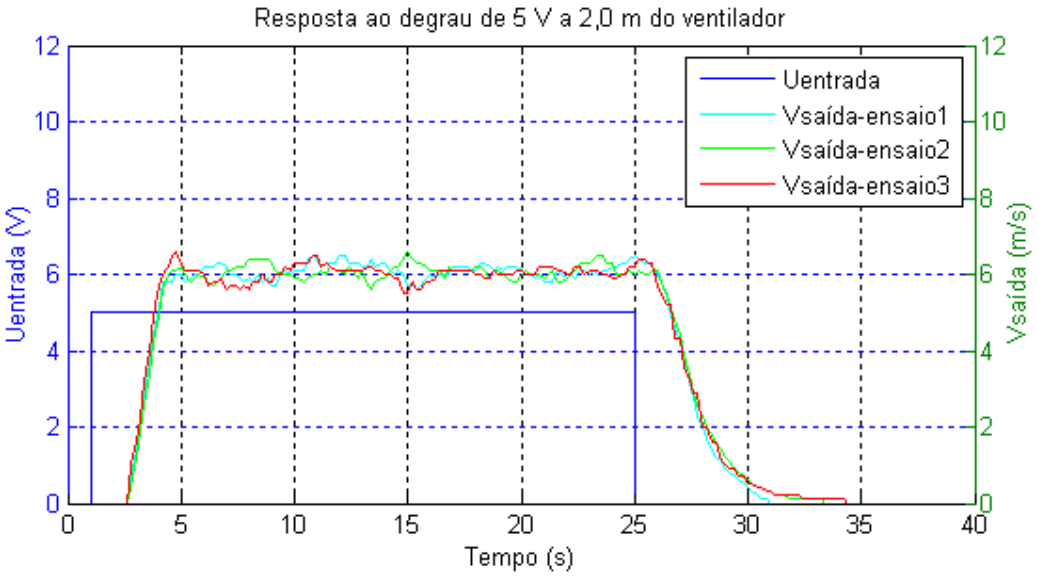


Figura 115: Sinal degrau de 4 e 5 V, D=2,0 m

- Tabelas com os resultados obtidos da curva de resposta do sistema

Uma vez obtidas as curvas de resposta do sistema, foram tomados os valores dos parâmetros K, τ, θ, τ_d e θ_d para cada ensaio realizado e calculada a média de cada um deles. Esses valores foram anotados nas tabelas a seguir:

Tabela 6: Parâmetros da curva de resposta para a distância de 5,0 cm

Resposta ao sinal degrau de subida e descida						
Parâmetros K, τ e θ obtidos a partir da curva de resposta do sistema						
Distância do sensor: 5,0 (cm)		**K (m/s/V)**	**τ (s)**	**θ (s)**	**τ_d (s)**	**θ_d (s)**
$U_{entrada}$: Degrau 2 (V)	**Ensaio 1**	2,11	0,90	0,90	0,90	0,90
	Ensaio 2	2,12	0,90	0,70	0,90	0,80
	Ensaio 3	2,13	0,90	0,90	0,60	1,20
	Média	2,12	0,90	0,83	0,80	0,97
$U_{entrada}$: Degrau 3 (V)	**Ensaio 1**	2,15	0,60	1,20	1,20	0,80
	Ensaio 2	2,10	0,60	1,00	0,90	1,10
	Ensaio 3	2,13	0,90	1,10	0,90	1,10
	Média	2,13	0,70	1,10	1,00	1,00
$U_{entrada}$: Degrau 4 (V)	**Ensaio 1**	2,21	0,90	0,90	1,20	1,00
	Ensaio 2	2,20	0,60	1,00	1,20	1,00
	Ensaio 3	2,22	0,60	1,00	1,20	1,00
	Média	2,21	0,70	0,97	1,20	1,00
$U_{entrada}$: Degrau 5 (V)	**Ensaio 1**	2,6	0,90	1,10	1,20	1,20
	Ensaio 2	2,05	0,90	0,90	1,20	1,00
	Ensaio 3	2,03	0,90	0,90	1,20	1,00
	Média	2,05	0,90	0,97	1,20	1,07

Valores médios dos parâmetros x Tensão aplicada					
Distância do sensor: 5,0 (cm)	**K (m/s/V)**	**τ (s)**	**θ (s)**	**τ_d (s)**	**θ_d (s)**
Degrau 2 (V)	2,12	0,90	0,83	0,80	0,97
Degrau 3 (V)	2,13	0,70	1,10	1,00	1,00
Degrau 4 (V)	2,21	0,70	0,97	1,20	1,00
Degrau 5 (V)	2,05	0,90	0,97	1,20	1,07
Média	2,12	0,80	0,97	1,05	1,01

Tabela 7: Parâmetros da curva de resposta para a distância de 0,5 m

Resposta ao sinal degrau de subida e descida						
Parâmetros K, τ e θ obtidos a partir da curva de resposta do sistema						
Distância do sensor: 0,5 (m)		**K (m/s/V)**	**τ (s)**	**θ (s)**	**τ_d (s)**	**θ_d (s)**
$U_{entrada}$: Degrau 2 (V)	**Ensaio 1**	1,84	0,90	1,30	0,90	1,30
	Ensaio 2	1,88	0,60	1,40	1,80	1,00
	Ensaio 3	1,94	0,60	1,40	1,20	1,60
	Média	1,89	0,70	1,37	1,30	1,30
$U_{entrada}$: Degrau 3 (V)	**Ensaio 1**	1,94	0,90	1,30	1,20	1,20
	Ensaio 2	1,92	0,90	1,10	0,90	1,10
	Ensaio 3	1,89	0,90	1,10	0,90	1,30
	Média	1,91	0,90	1,17	1,00	1,20
$U_{entrada}$: Degrau 4 (V)	**Ensaio 1**	1,82	0,60	1,20	0,00	0,80
	Ensaio 2	1,87	0,90	1,10	1,50	0,90
	Ensaio 3	1,84	0,60	1,20	1,20	1,00
	Média	1,84	0,70	1,17	0,90	0,90
$U_{entrada}$: Degrau 5 (V)	**Ensaio 1**	1,75	0,90	1,10	1,20	1,00
	Ensaio 2	1,73	0,90	1,10	1,20	1,20
	Ensaio 3	1,72	0,90	1,10	1,20	1,20
	Média	1,73	0,90	1,10	1,20	1,13

Valores médios dos parâmetros x Tensão aplicada					
Distância do sensor: 0,5 (m)	**K (m/s/V)**	**τ (s)**	**θ (s)**	**τ_d (s)**	**θ_d (s)**
Degrau 2 (V)	1,89	0,70	1,37	1,30	1,30
Degrau 3 (V)	1,91	0,90	1,17	1,00	1,20
Degrau 4 (V)	1,84	0,70	1,17	0,90	0,90
Degrau 5 (V)	1,73	0,90	1,10	1,20	1,13
Média	1,84	0,80	1,20	1,10	1,13

Tabela 8: Parâmetros da curva de resposta para a distância de 1,0 m

Resposta ao sinal degrau de subida e descida						
Parâmetros K, τ e θ obtidos a partir da curva de resposta do sistema						
Distância do sensor: 1,0 (m)		**K (m/s/V)**	**τ (s)**	**θ (s)**	**τ_d (s)**	**θ_d (s)**
$U_{entrada}$: Degrau 2 (V)	**Ensaio 1**	1,50	0,90	1,70	0,90	1,30
	Ensaio 2	1,50	0,90	1,90	0,90	1,10
	Ensaio 3	1,62	1,20	1,60	0,90	1,10
	Média	1,54	1,00	1,73	0,90	1,17
$U_{entrada}$: Degrau 3 (V)	**Ensaio 1**	1,59	0,90	1,50	1,20	1,00
	Ensaio 2	1,65	0,90	1,50	0,90	1,30
	Ensaio 3	1,62	0,90	1,50	1,20	1,00
	Média	1,62	0,90	1,50	1,10	1,10
$U_{entrada}$: Degrau 4 (V)	**Ensaio 1**	1,61	0,90	1,30	1,50	1,10
	Ensaio 2	1,60	0,60	1,60	1,20	1,20
	Ensaio 3	1,61	0,60	2,00	0,90	1,50
	Média	1,61	0,70	1,63	1,20	1,27
$U_{entrada}$: Degrau 5 (V)	**Ensaio 1**	1,57	0,90	1,70	1,20	1,00
	Ensaio 2	1,55	0,90	1,50	1,50	1,10
	Ensaio 3	1,54	0,90	1,50	2,10	0,50
	Média	1,55	0,90	1,57	1,60	0,87

Valores médios dos parâmetros x Tensão aplicada					
Distância do sensor: 1,0 (m)	**K (m/s/V)**	**τ (s)**	**θ (s)**	**τ_d (s)**	**θ_d (s)**
Degrau 2 (V)	1,54	1,00	1,73	0,90	1,17
Degrau 3 (V)	1,62	0,90	1,50	1,10	1,10
Degrau 4 (V)	1,61	0,70	1,63	1,20	1,27
Degrau 5 (V)	1,55	0,90	1,57	1,60	0,87
Média	1,58	0,88	1,61	1,20	1,10

Tabela 9: Parâmetros da curva de resposta para a distância de 1,5 m

Resposta ao sinal degrau de subida e descida						
Parâmetros K, τ e θ obtidos a partir da curva de resposta do sistema						
Distância do sensor: 1,5 (m)		**K (m/s/V)**	**τ (s)**	**θ (s)**	**τ_d (s)**	**θ_d (s)**
$U_{entrada}$: Degrau 2 (V)	**Ensaio 1**	1,39	1,20	2,00	0,90	1,30
	Ensaio 2	1,33	0,90	2,10	0,60	1,60
	Ensaio 3	1,48	0,90	2,30	0,90	1,50
	Média	1,40	1,00	2,13	0,80	1,47
$U_{entrada}$: Degrau 3 (V)	**Ensaio 1**	1,53	0,90	1,90	1,20	1,00
	Ensaio 2	1,25	0,90	1,70	1,50	1,30
	Ensaio 3	1,46	0,90	1,90	1,20	1,40
	Média	1,41	0,90	1,83	1,30	1,23
$U_{entrada}$: Degrau 4 (V)	**Ensaio 1**	1,47	0,90	1,50	1,20	1,20
	Ensaio 2	1,42	0,90	1,50	1,20	1,20
	Ensaio 3	1,50	0,90	1,70	1,20	1,20
	Média	1,47	0,90	1,57	1,20	1,20
$U_{entrada}$: Degrau 5 (V)	**Ensaio 1**	1,48	0,60	1,60	1,50	0,90
	Ensaio 2	1,41	0,60	1,60	1,20	1,40
	Ensaio 3	1,41	0,60	1,80	1,50	1,10
	Média	1,43	0,60	1,67	1,40	1,13

Valores médios dos parâmetros x Tensão aplicada					
Distância do sensor: 1,5 (m)	**K (m/s/V)**	**τ (s)**	**θ (s)**	**τ_d (s)**	**θ_d (s)**
Degrau 2 (V)	1,40	1,00	2,13	0,80	1,47
Degrau 3 (V)	1,41	0,90	1,83	1,30	1,23
Degrau 4 (V)	1,47	0,90	1,57	1,20	1,20
Degrau 5 (V)	1,43	0,60	1,67	1,40	1,13
Média	1,43	0,85	1,80	1,18	1,26

Tabela 10: Parâmetros da curva de resposta para a distância de 2,0 m

Resposta ao sinal degrau de subida e descida						
Parâmetros K, τ e θ obtidos a partir da curva de resposta do sistema						
Distância do sensor: 2,0 (m)		**K (m/s/V)**	**τ (s)**	**θ (s)**	**τ_d (s)**	**θ_d (s)**
$U_{entrada}$: Degrau 2 (V)	**Ensaio 1**	1,13	1,20	2,80	1,20	1,60
	Ensaio 2	1,20	1,20	2,60	1,20	1,80
	Ensaio 3	1,13	0,90	2,70	1,20	1,80
	Média	1,15	1,10	2,70	1,20	1,73
$U_{entrada}$: Degrau 3 (V)	**Ensaio 1**	1,19	0,60	2,20	1,50	1,30
	Ensaio 2	1,24	0,90	2,10	1,50	1,10
	Ensaio 3	1,24	0,90	2,30	1,50	1,50
	Média	1,22	0,80	2,20	1,50	1,30
$U_{entrada}$: Degrau 4 (V)	**Ensaio 1**	1,27	0,60	2,00	1,50	1,50
	Ensaio 2	1,28	0,90	1,90	1,20	1,60
	Ensaio 3	1,28	0,90	1,90	1,50	1,10
	Média	1,28	0,80	1,93	1,40	1,40
$U_{entrada}$: Degrau 5 (V)	**Ensaio 1**	1,21	0,90	1,70	1,20	1,40
	Ensaio 2	1,22	0,90	1,70	1,50	1,50
	Ensaio 3	1,20	0,60	1,80	1,80	1,00
	Média	1,21	0,80	1,73	1,50	1,30

Valores médios dos parâmetros x Tensão aplicada					
Distância do sensor: 2,0 (m)	**K (m/s/V)**	**τ (s)**	**θ (s)**	**τ_d (s)**	**θ_d (s)**
Degrau 2 (V)	1,15	1,10	2,70	1,20	1,73
Degrau 3 (V)	1,22	0,80	2,20	1,50	1,30
Degrau 4 (V)	1,28	0,80	1,93	1,40	1,40
Degrau 5 (V)	1,21	0,80	1,73	1,50	1,30
Média	1,22	0,88	2,14	1,40	1,43

ANEXO 3 – VALIDAÇÃO DO MODELO

Com as análises feitas a partir das tabelas com os parâmetros das curvas de resposta do sistema, obteve-se o seu modelo. O procedimento de aplicação de sinal tipo degrau feito no ensaio foi realizado no modelo e o resultado obtido foi comparado com o experimental, conforme curvas mostradas a seguir:

- Comparação do sinal degrau – Distância 5,0 cm

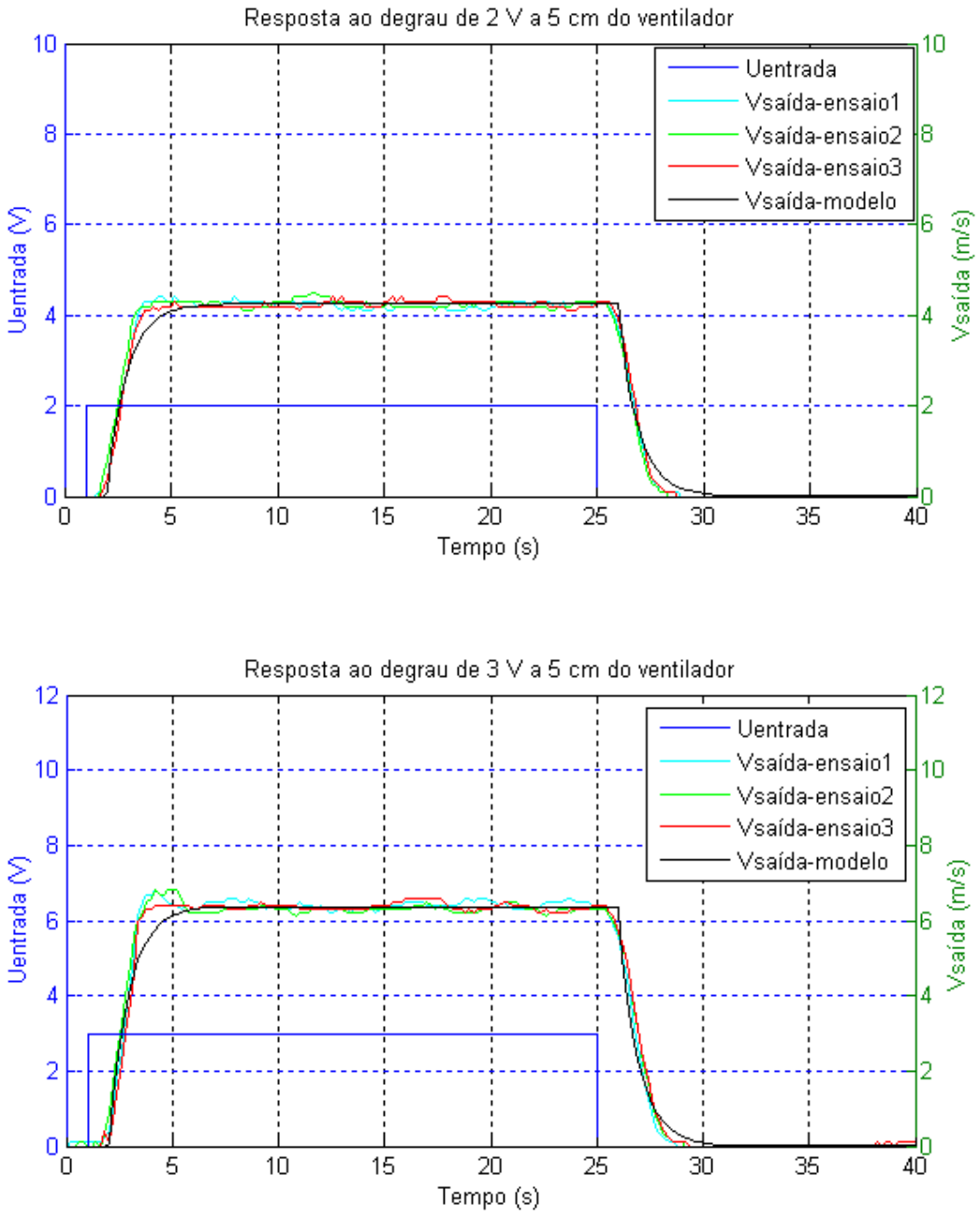
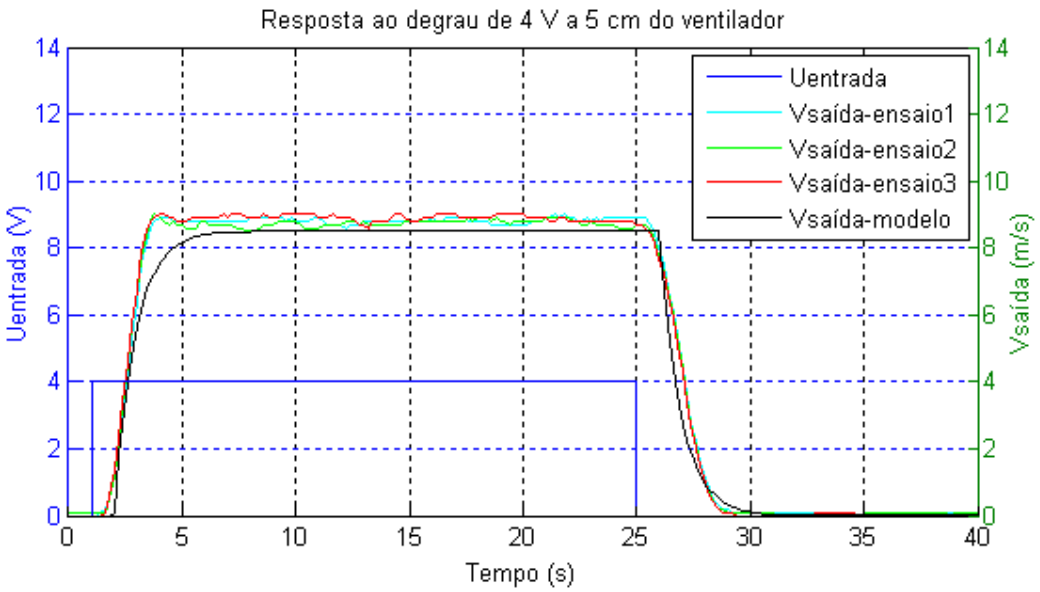


Figura 116: Sinal degrau de 2 e 3 V, D=5,0 cm



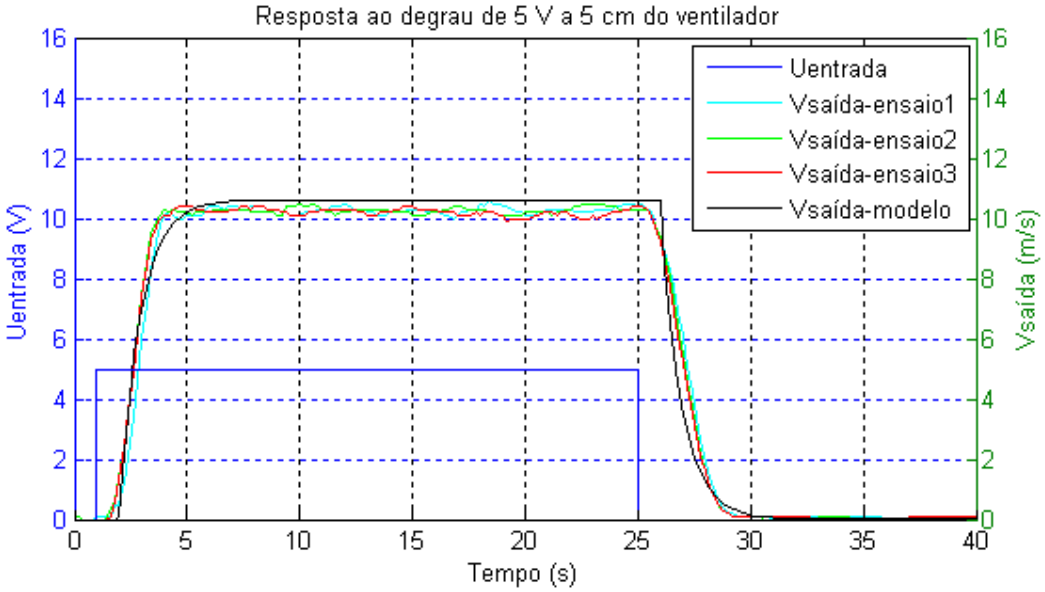
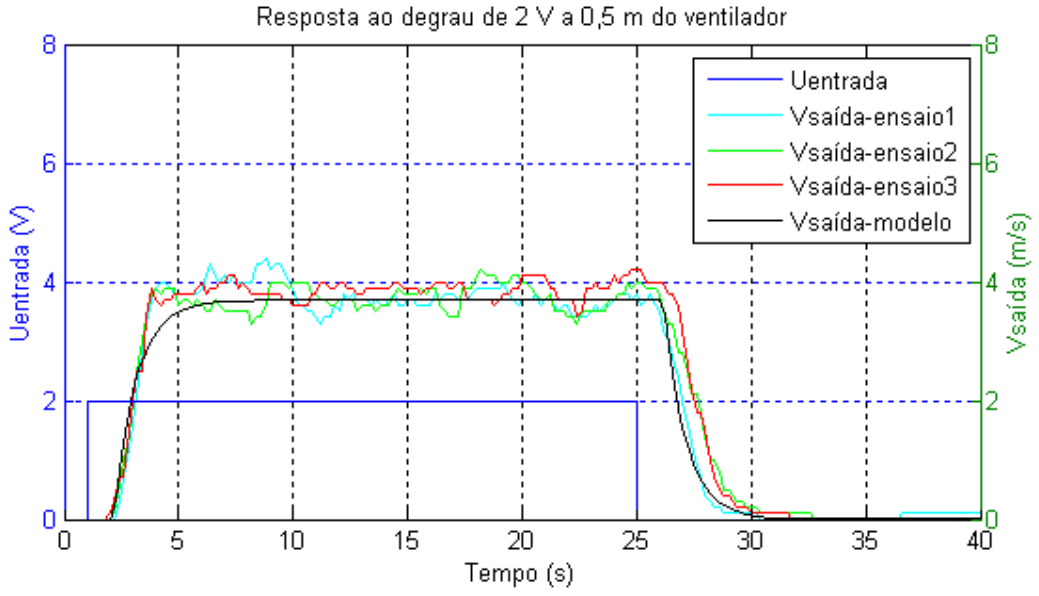


Figura 117: Sinal degrau de 4 e 5 V, D=5,0 cm

- Comparação do sinal degrau – Distância 0,5 m



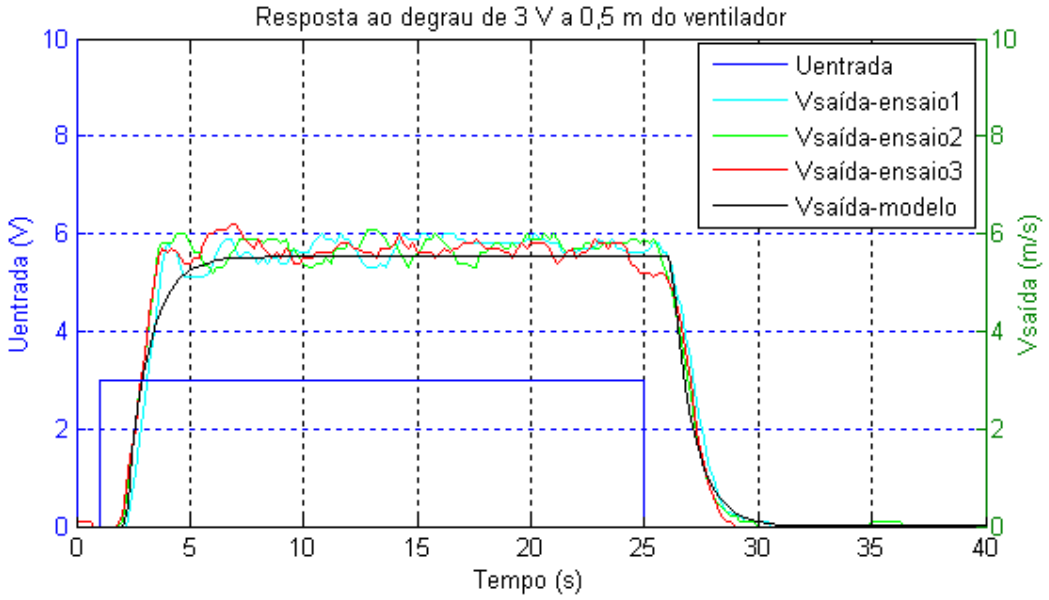
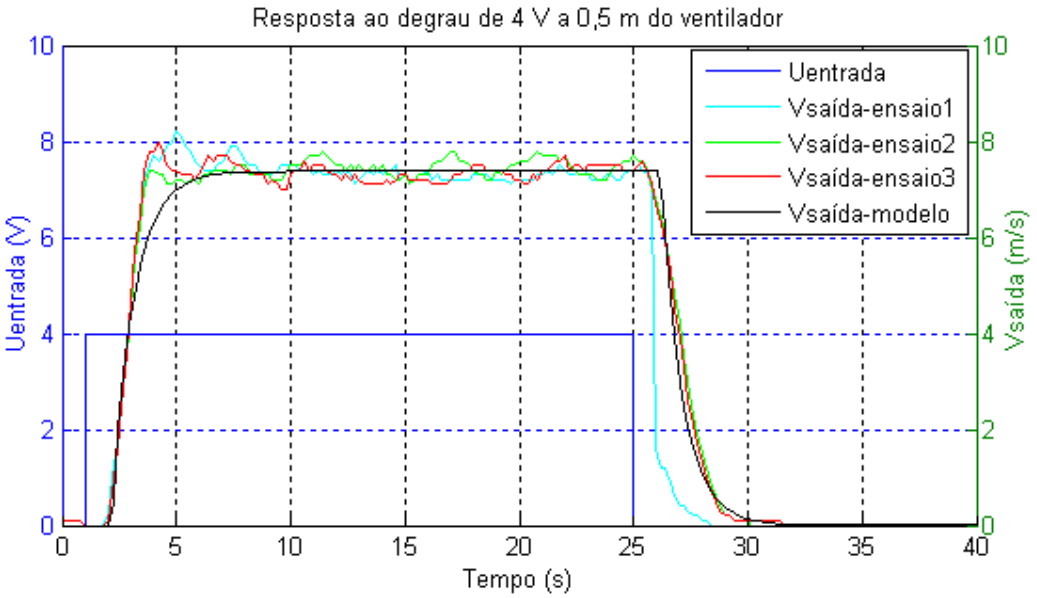


Figura 118: Sinal degrau de 2 e 3 V, D=0,5 m



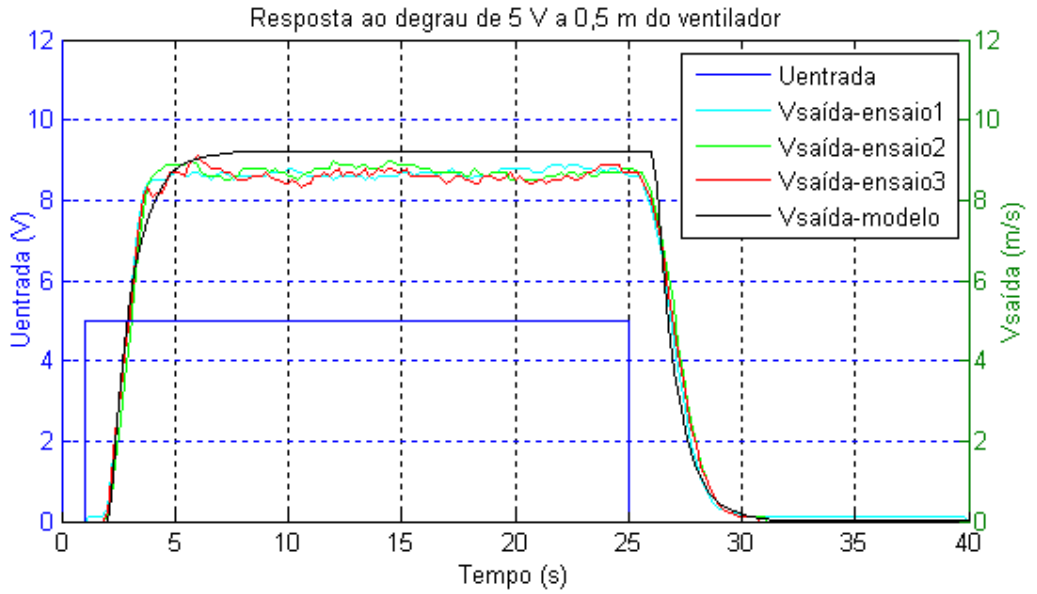
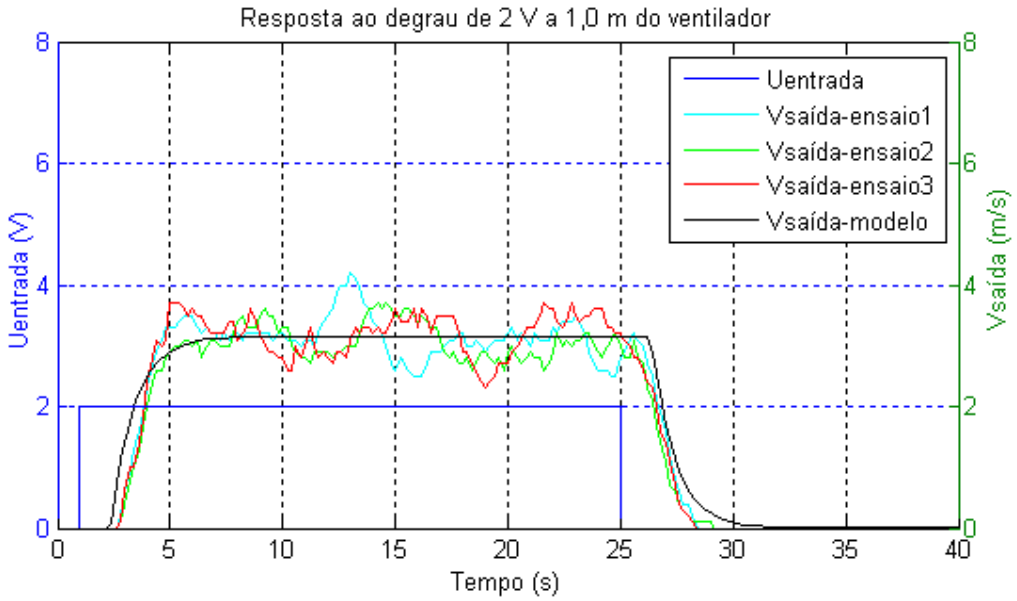


Figura 119: Sinal degrau de 4 e 5 V, D=0,5 m

- Comparação do sinal degrau – Distância 1,0 m



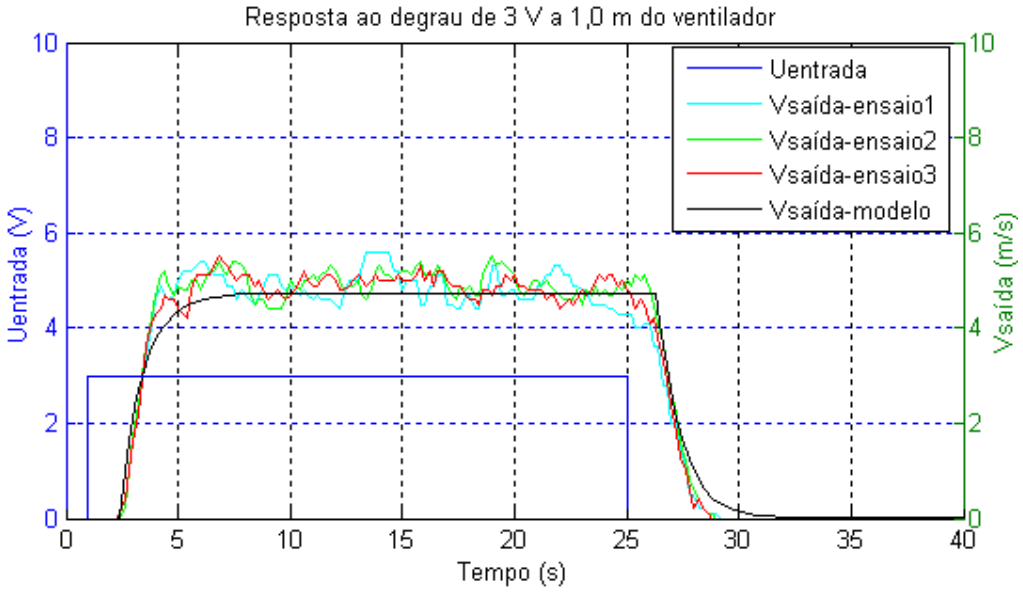
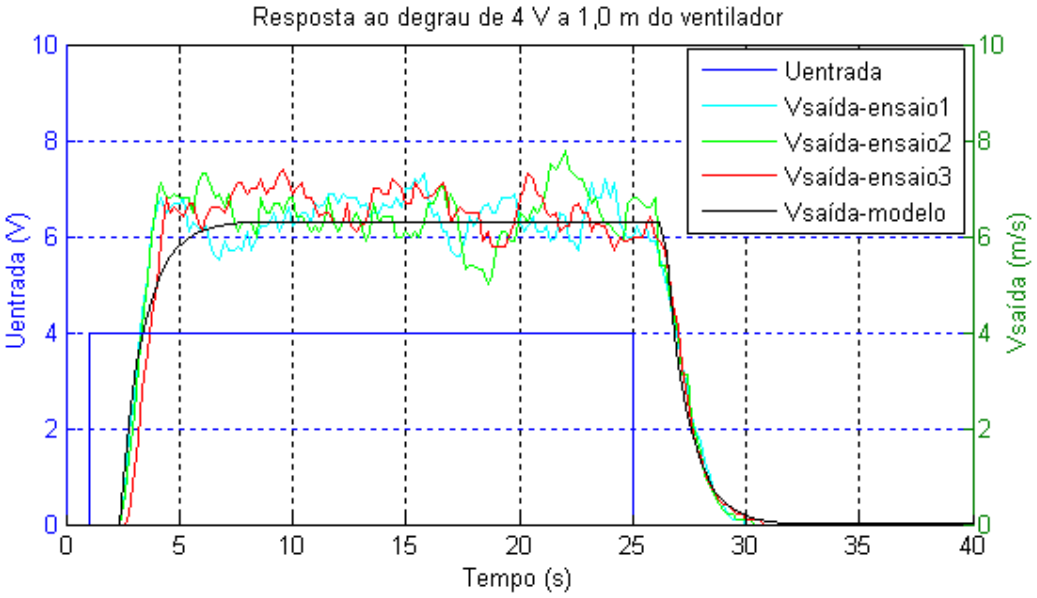


Figura 120: Sinal degrau de 2 e 3 V, D=1,0 m



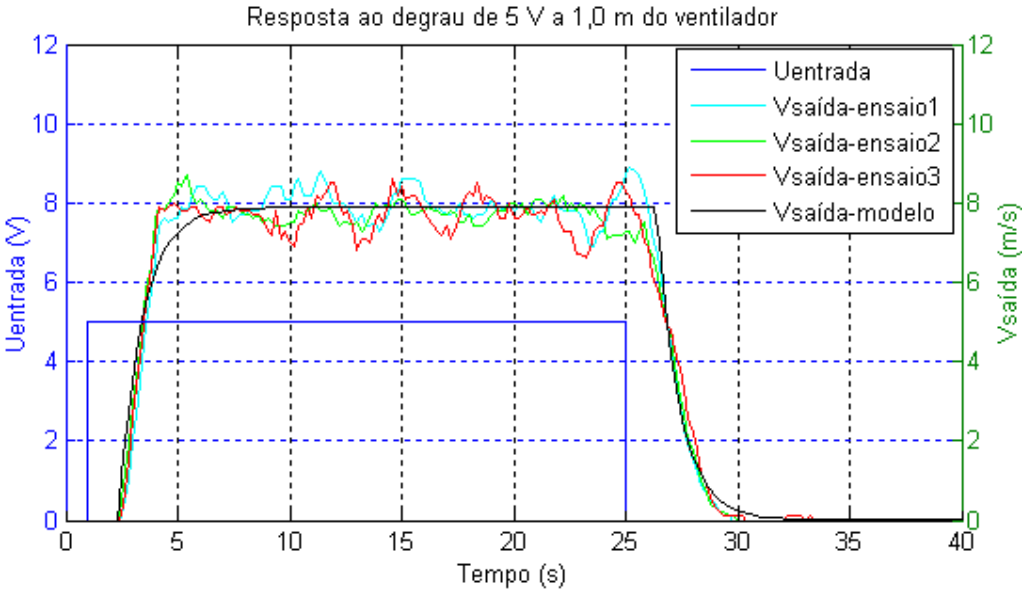
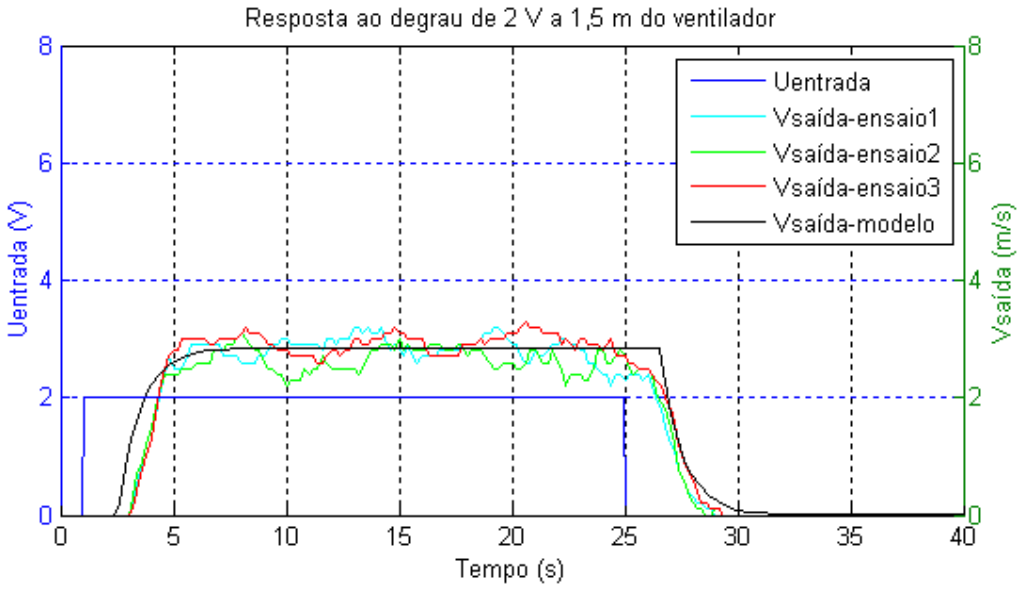


Figura 121: Sinal degrau de 4 e 5 V, D=1,0 m

- Comparação do sinal degrau – Distância 1,5 m



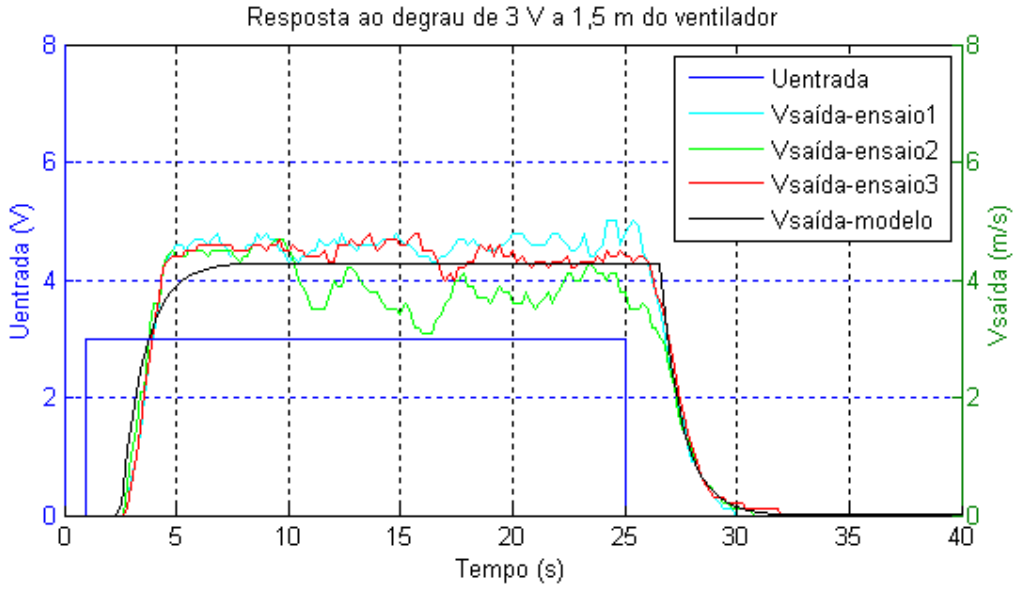
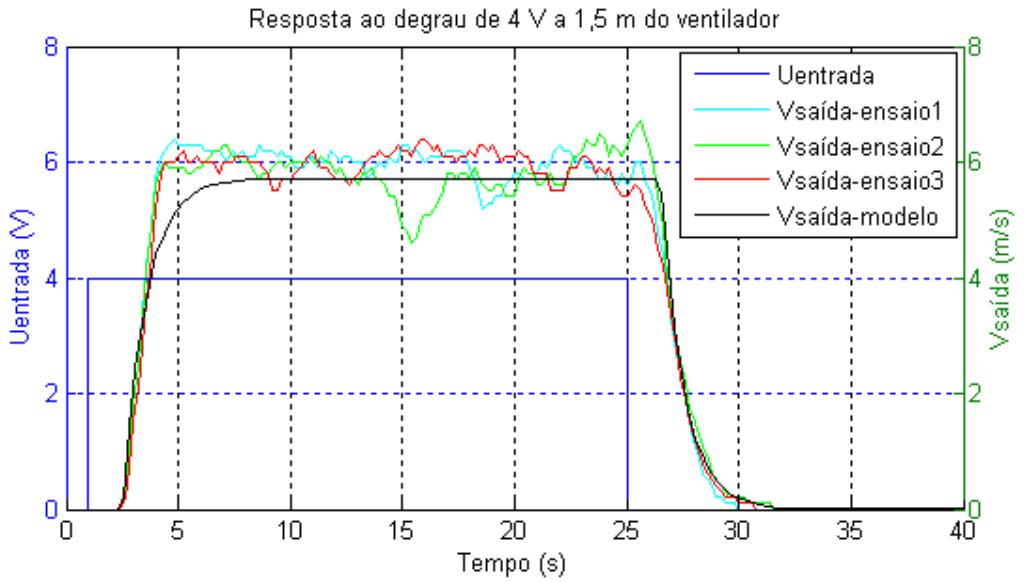


Figura 122: Sinal degrau de 2 e 3 V, D=1,5 m



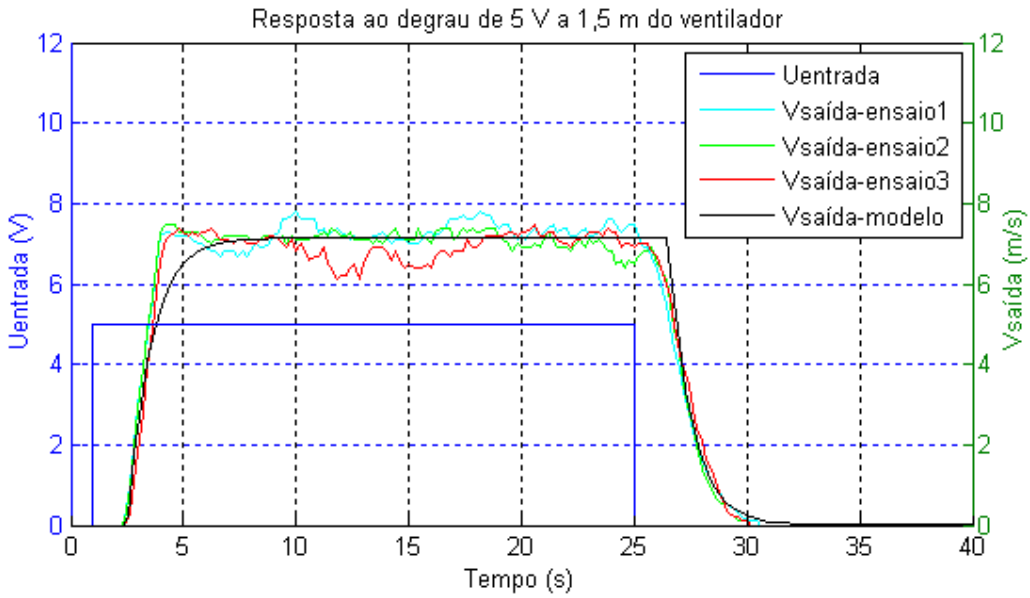
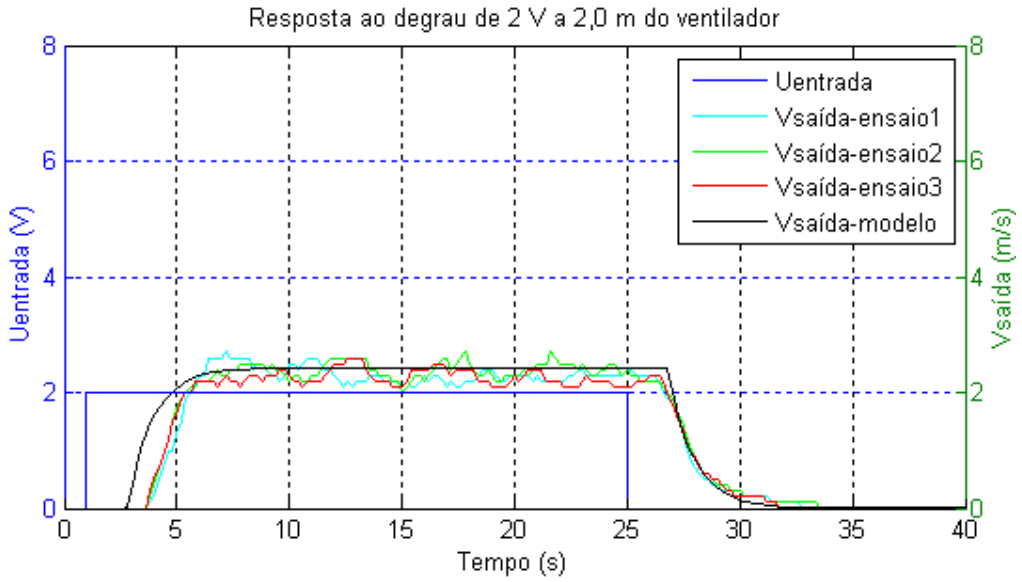


Figura 123: Sinal degrau de 4 e 5 V, D=1,5 m

- Comparação do sinal degrau – Distância 2,0 m



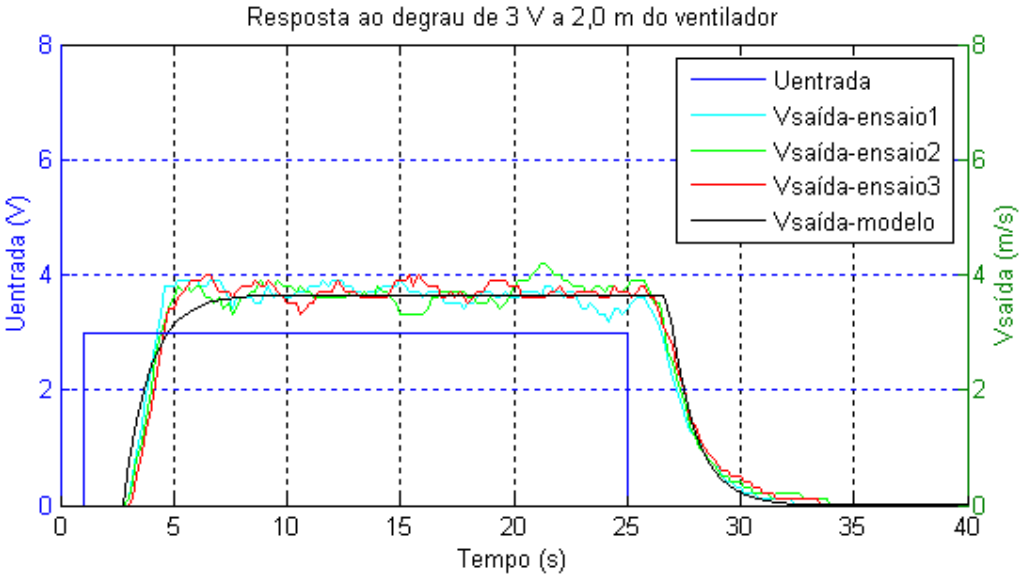
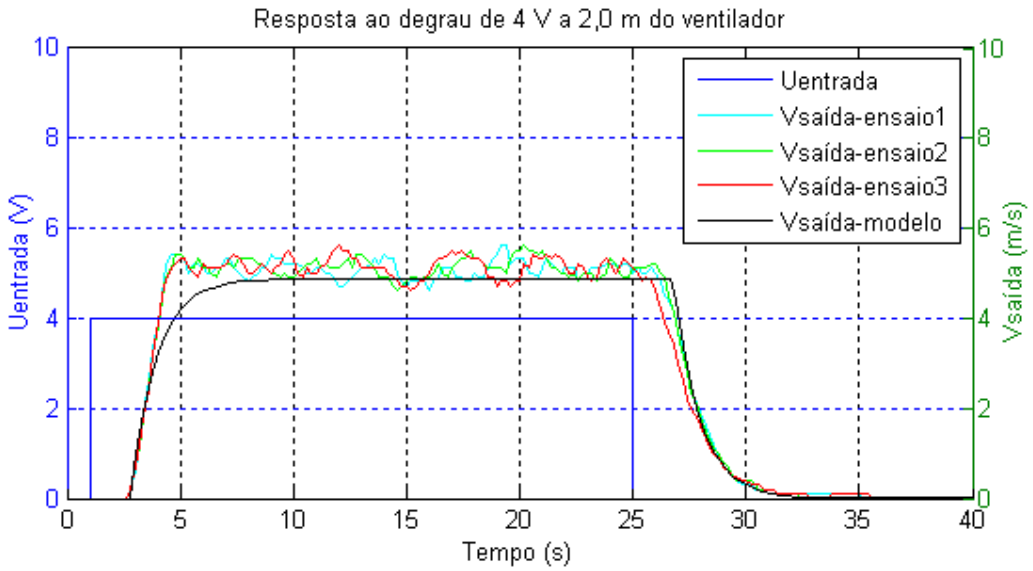


Figura 124: Sinal degrau de 2 e 3 V, D=2,0 m



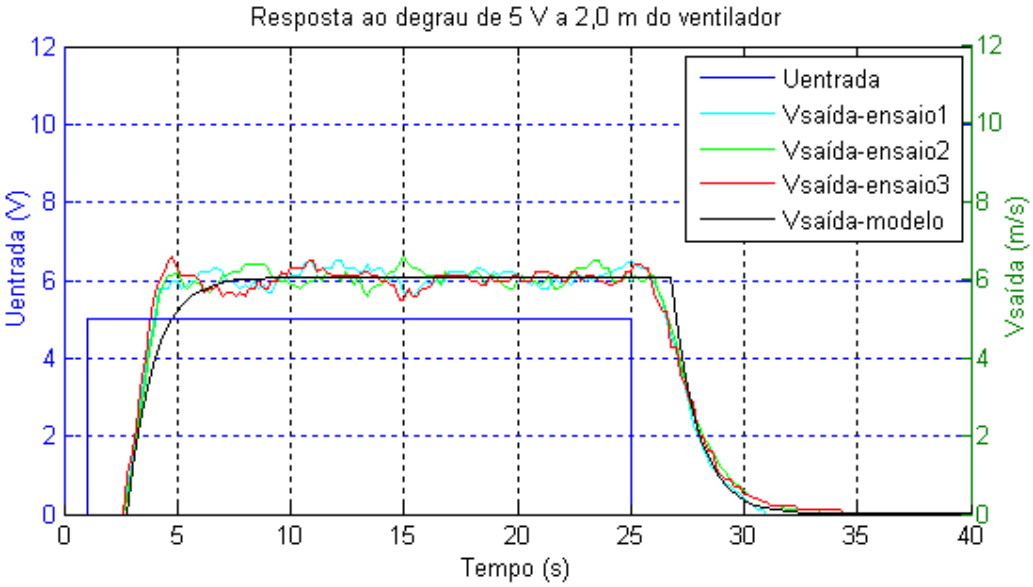
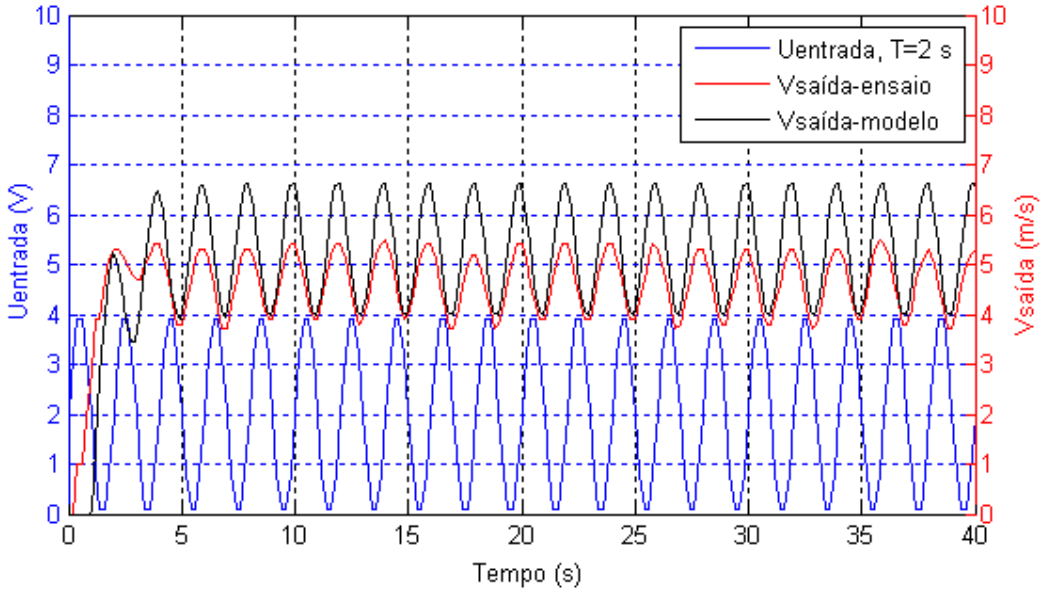


Figura 125: Sinal degrau de 4 e 5 V, D=2,0 m

Para validação também foi aplicado sinal senoidal na entrada da malha obtendo-se as curvas mostradas a seguir, para cada distância considerada:

- Comparação do sinal senoidal – Distância 5,0 cm



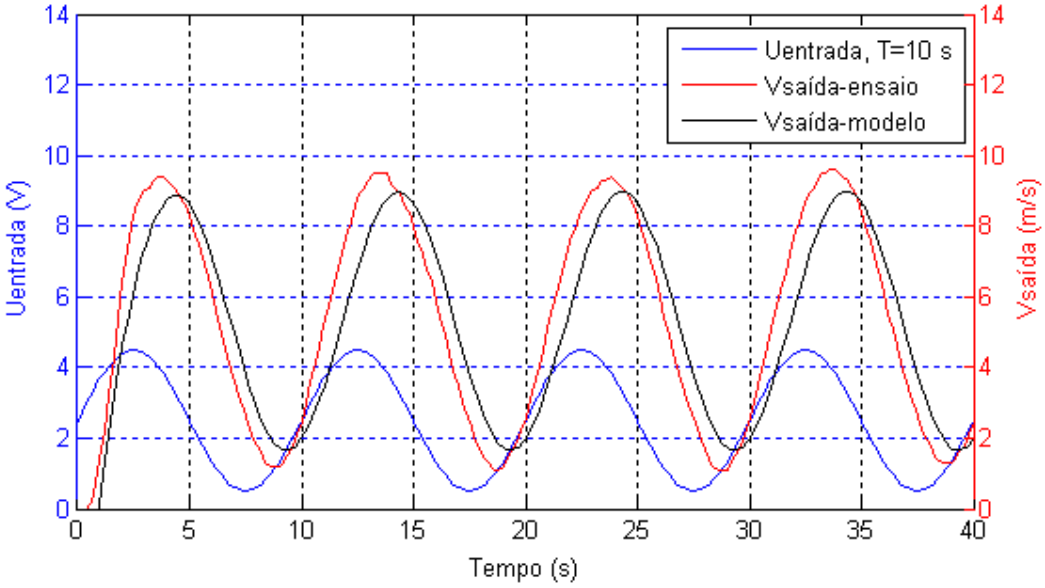
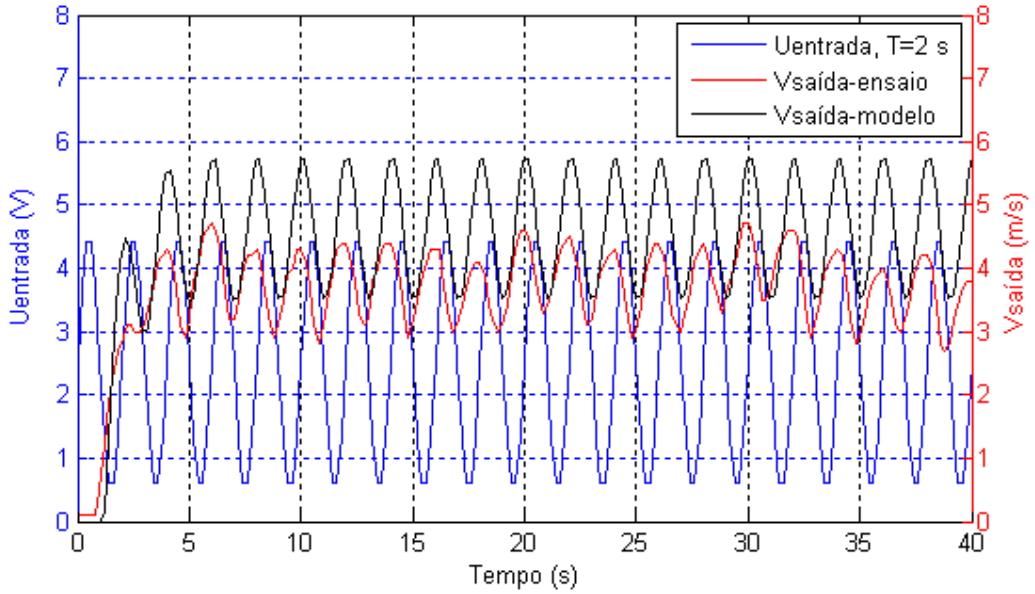


Figura 126: Sinal senoidal de período 2 e 10 s, D=5 cm

- Comparação do sinal senoidal – Distância 0,5 m



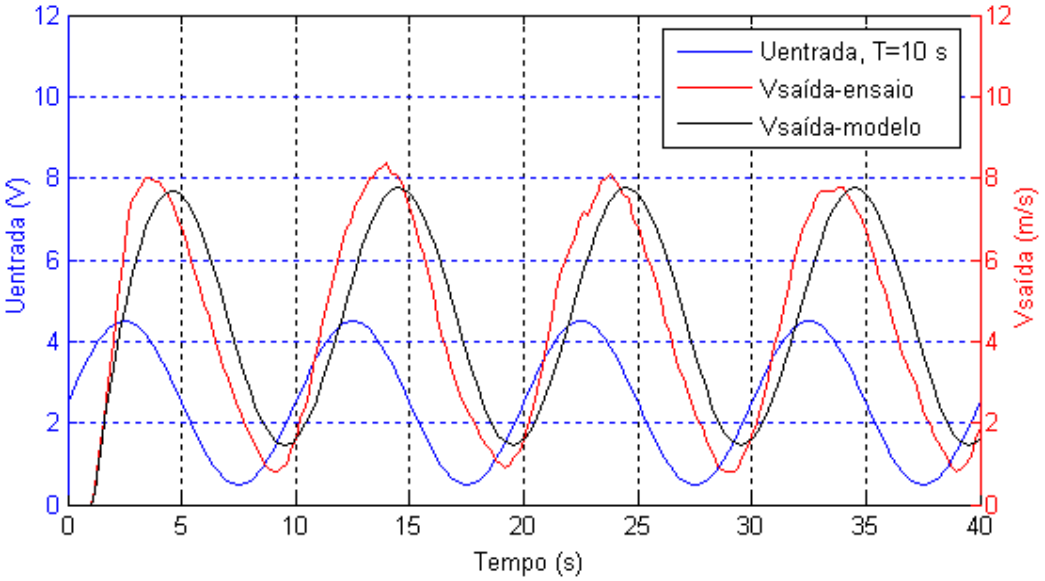
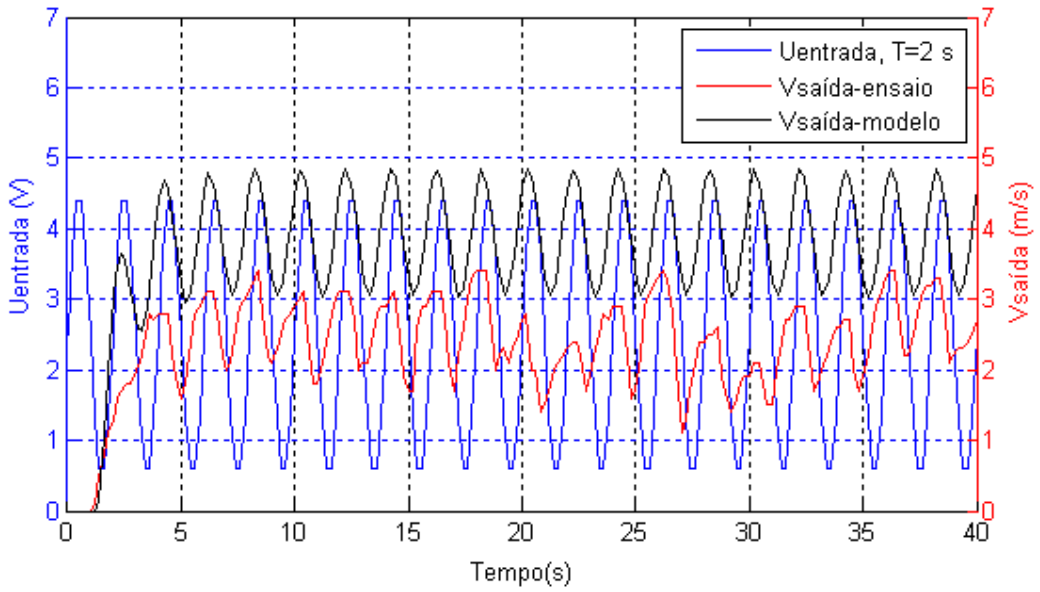


Figura 127: Sinal senoidal de período 2 e 10 s, D=0,5 m

- Comparação do sinal senoidal – Distância 1,0 m



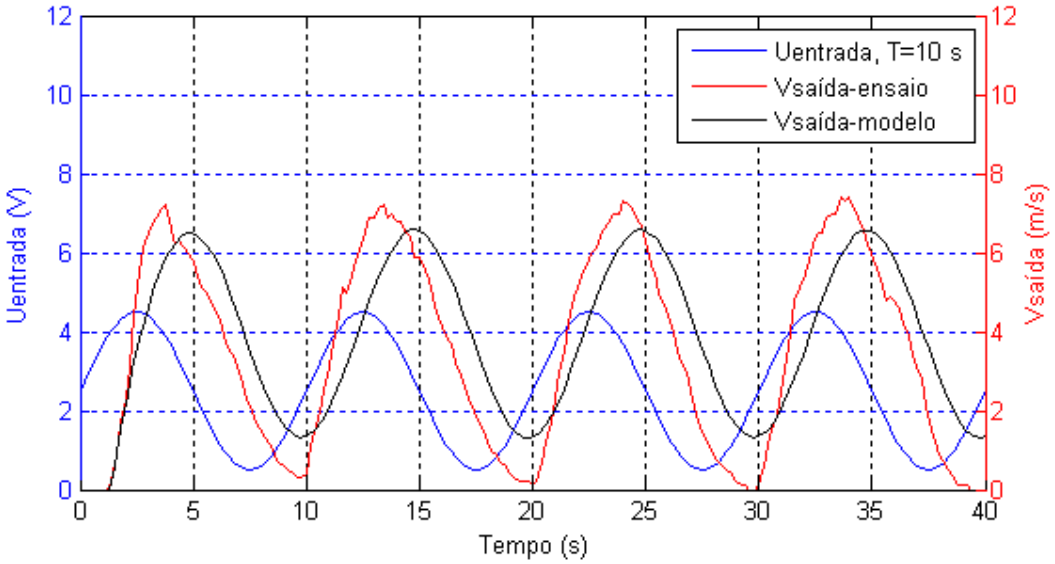


Figura 128: Sinal senoidal de período 2 e 10 s, D=1,0 m

- Comparação do sinal senoidal – Distância 1,5 m

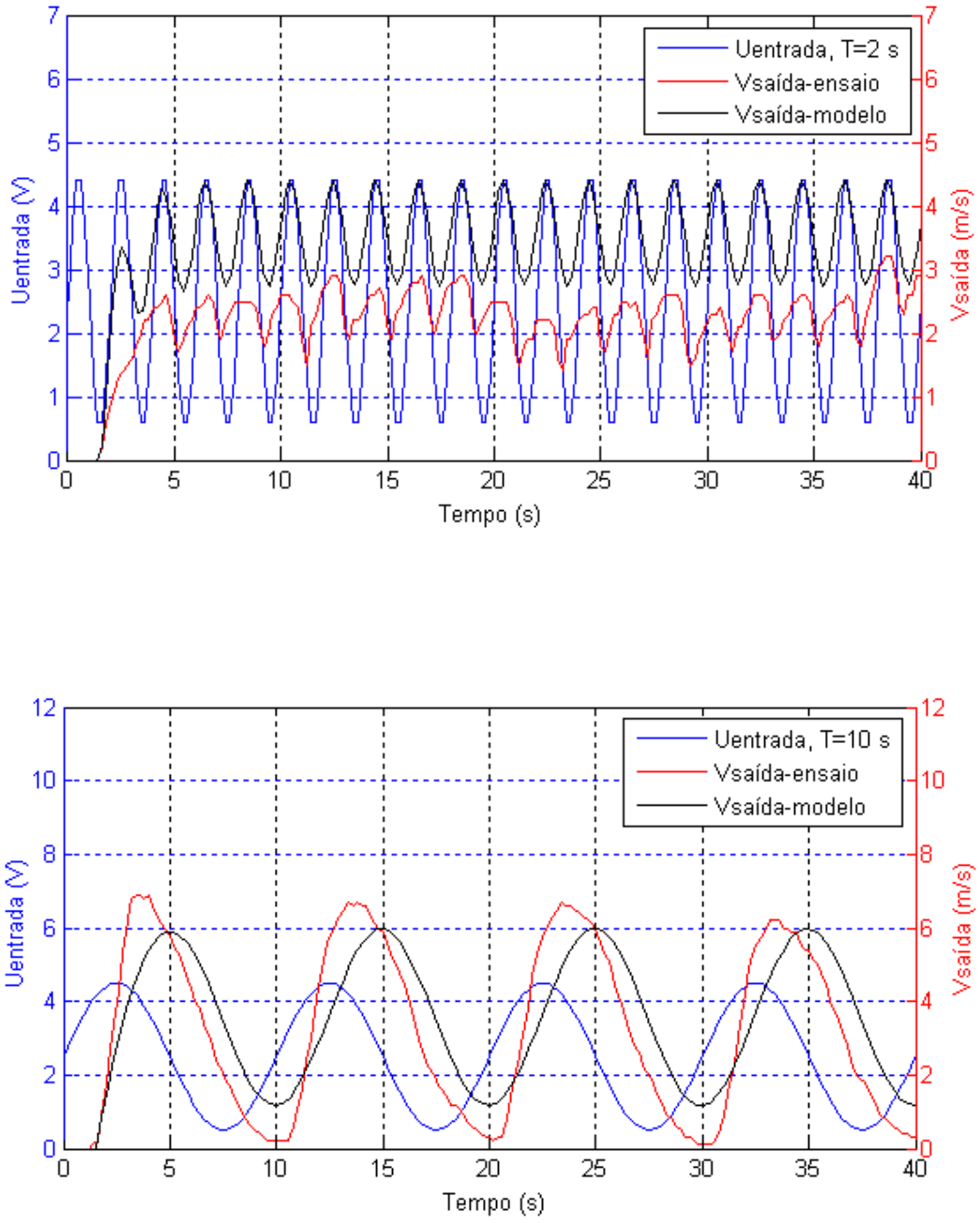


Figura 129: Sinal senoidal de período 2 e 10 s, D=1,5 m

- Comparação do sinal senoidal – Distância 2,0 m

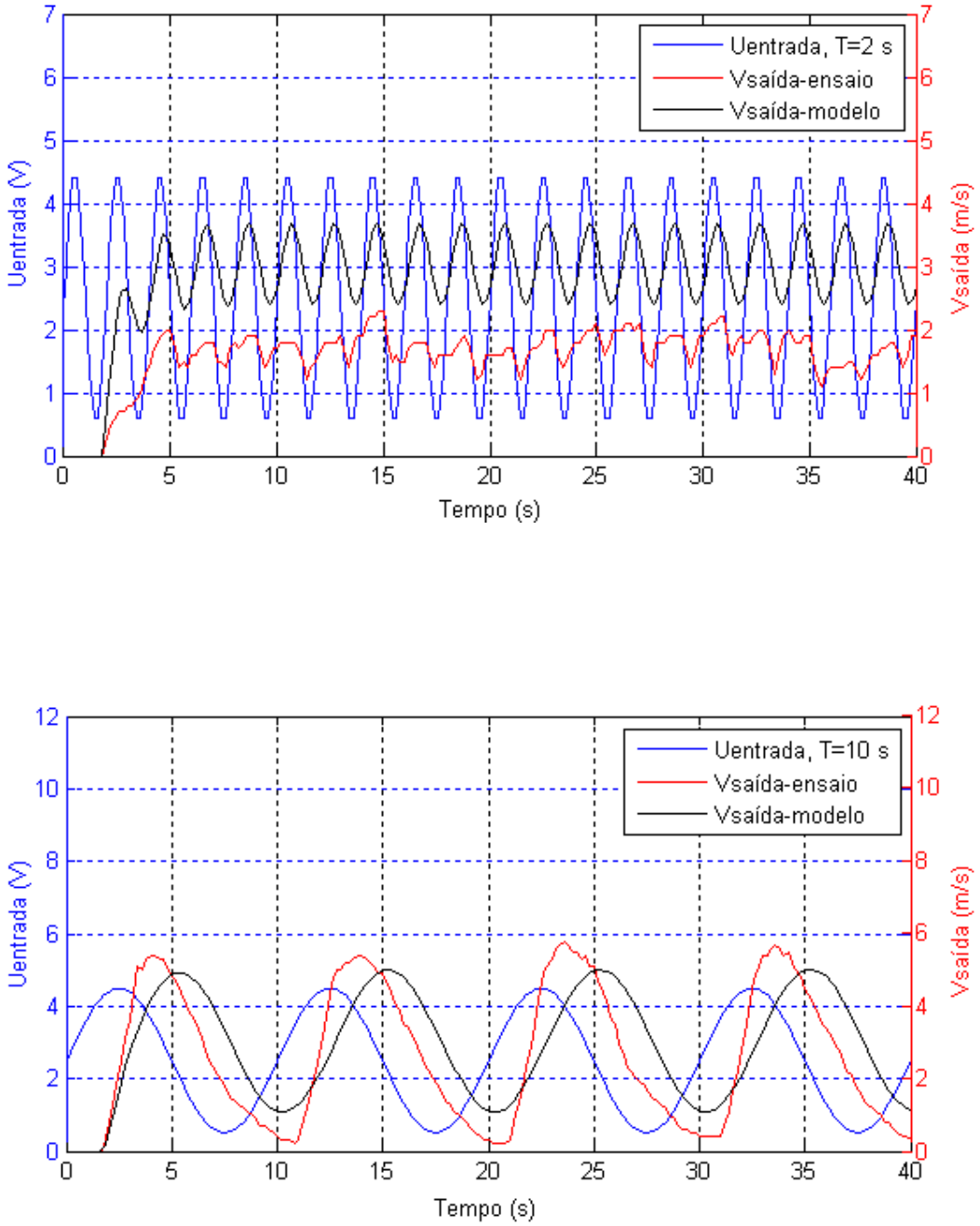


Figura 130: Sinal senoidal de período 2 e 10 s, D=2,0 m

Aplicou-se sinal do tipo dente de serra para se observar o comportamento da saída, mostradas nas curvas a seguir:

- Comparação do sinal dente de serra – Distância 5,0 cm

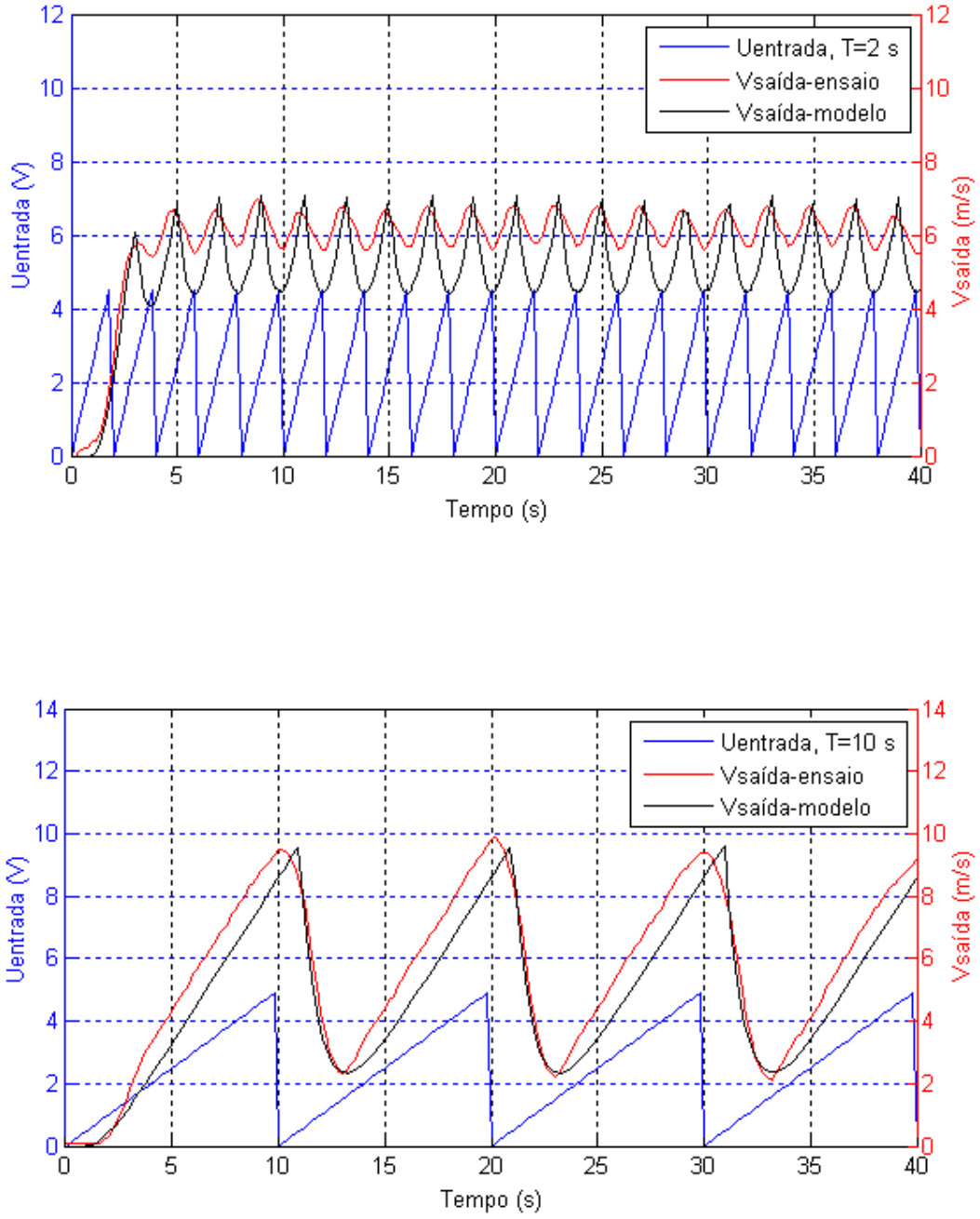
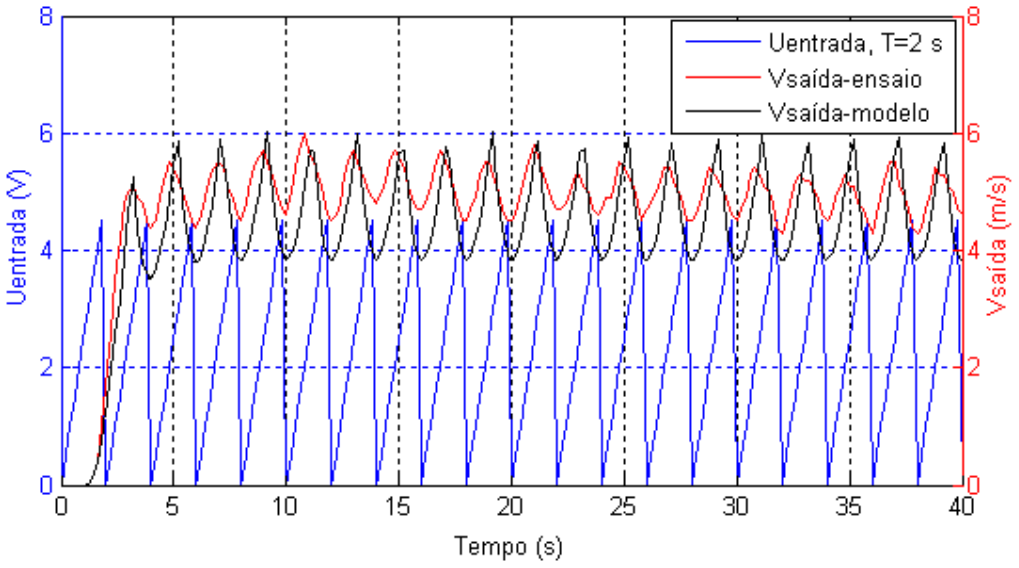


Figura 131: Sinal dente de serra de período 2 e 10 s, D=5 cm

- Comparação do sinal dente de serra – Distância 0,5 m



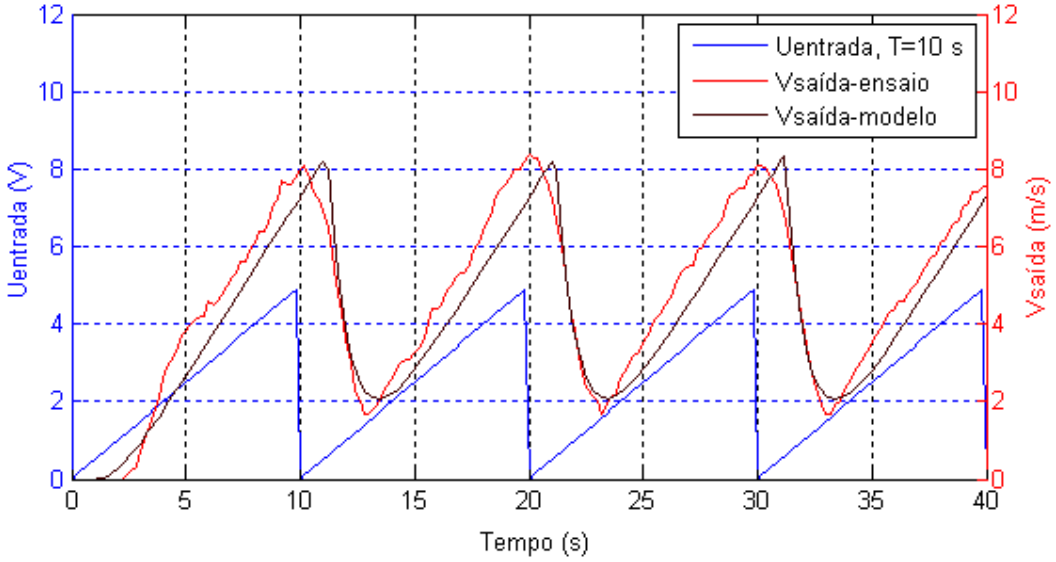
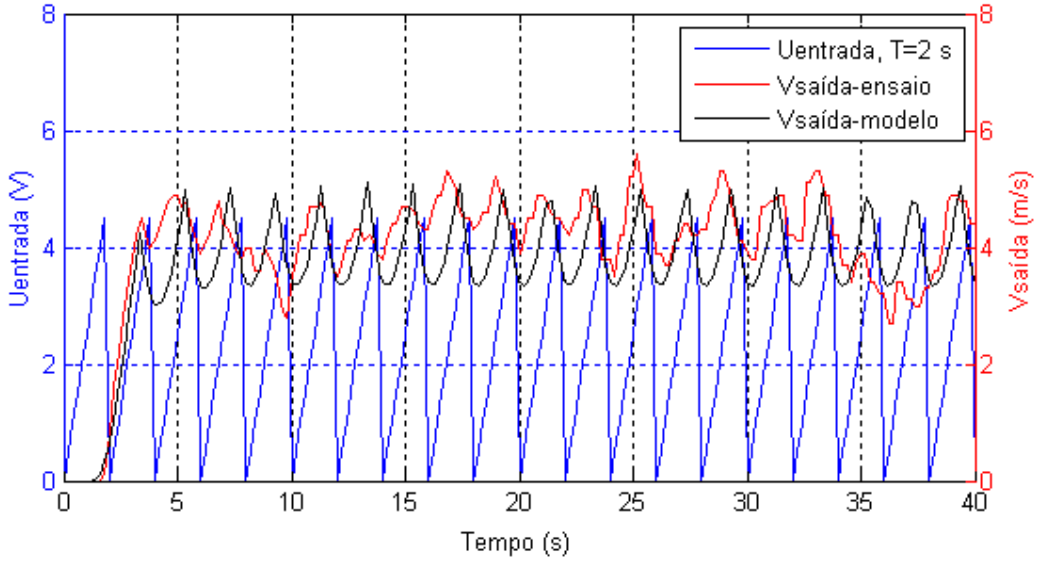


Figura 132: Sinal dente de serra de período 2 e 10 s, D=0,5 m

- Comparação do sinal dente de serra – Distância 1,0 m



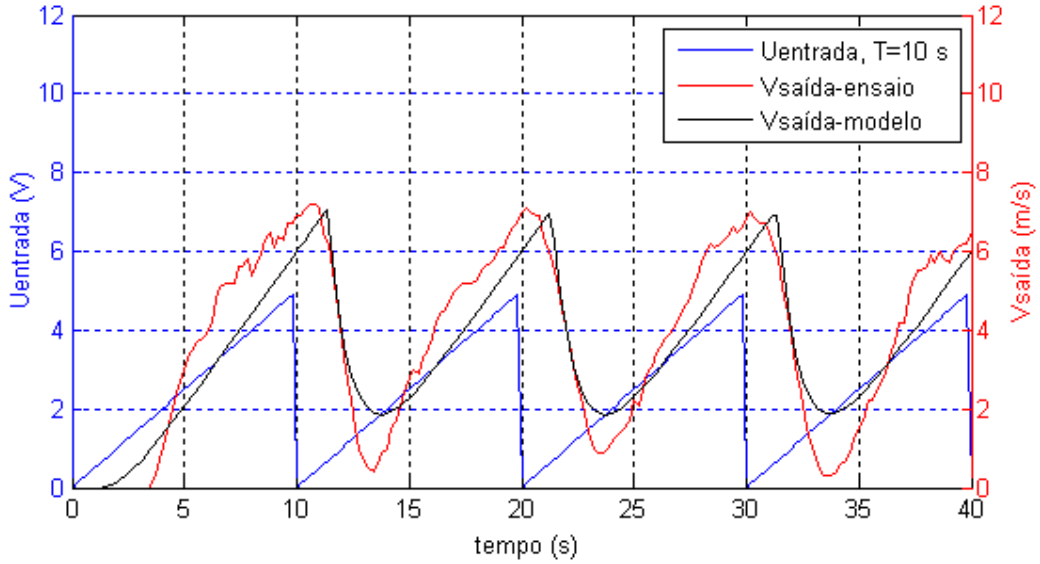
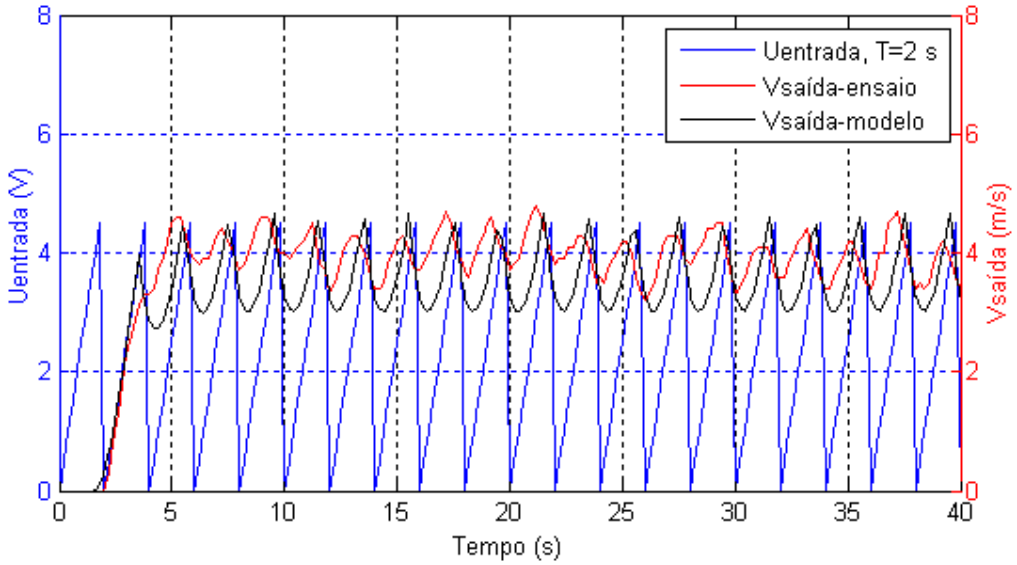


Figura 133: Sinal dente de serra de período 2 e 10 s, D=1,0 m

- Comparação do sinal dente de serra – Distância 1,5 m



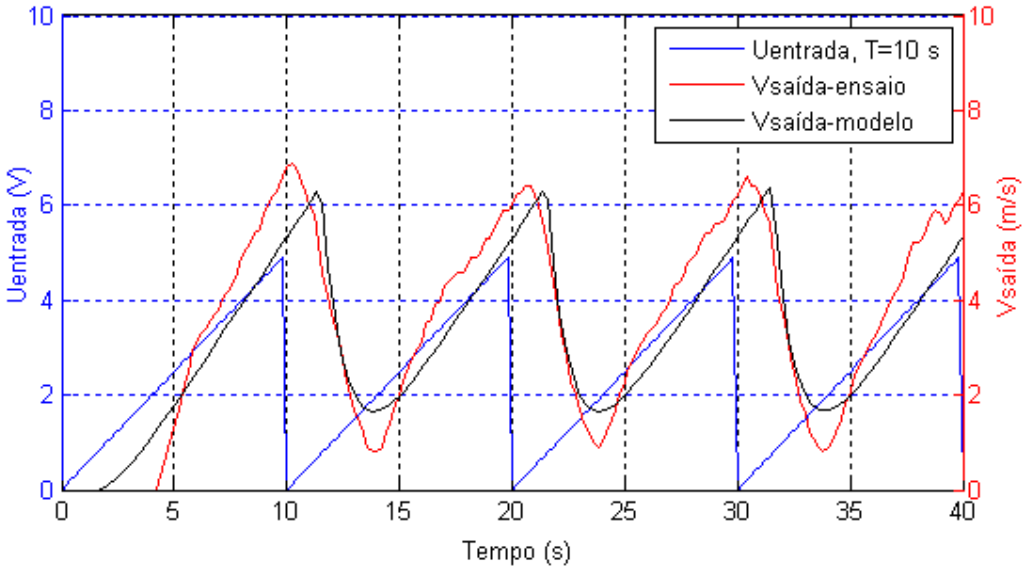
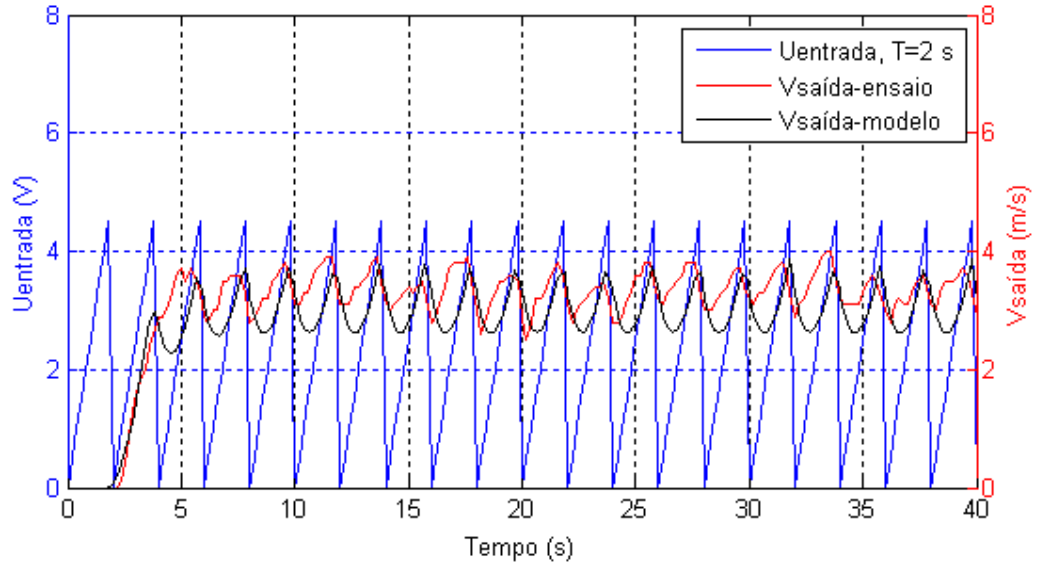


Figura 134: Sinal dente de serra de período 2 e 10 s, D=1,5 m

- Comparação do sinal dente de serra – Distância 2,0 m



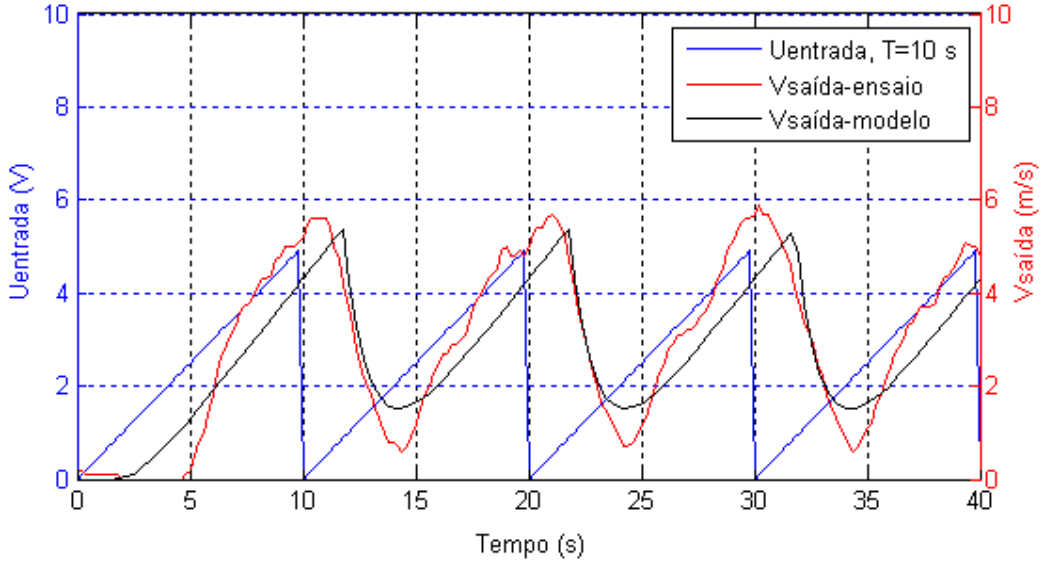
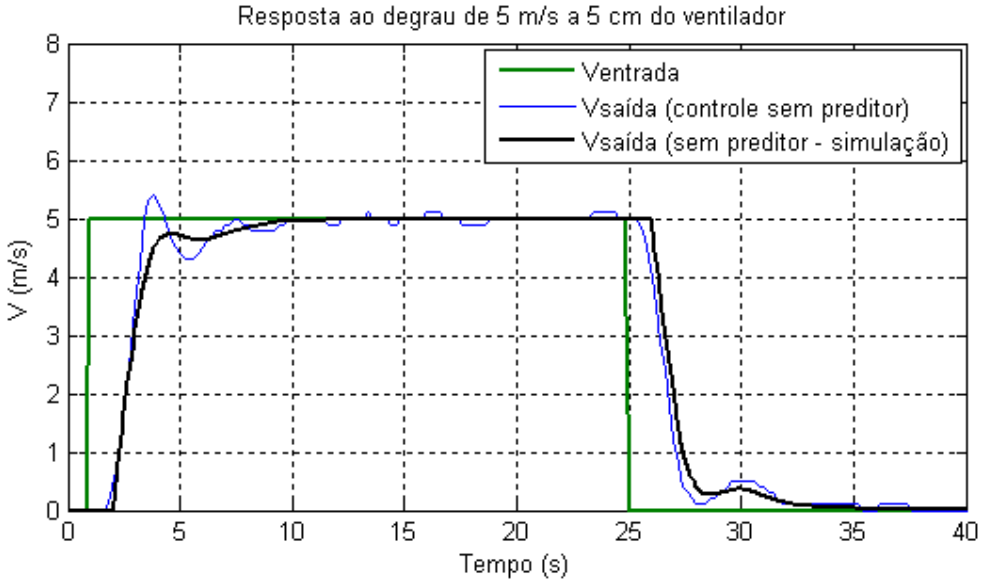


Figura 135: Sinal dente de serra de período 2 e 10 s, D=2,0 m

ANEXO 4 – CONTROLE DO SISTEMA X CONTROLE DO MODELO SEM O USO DO PREDITOR DE SMITH

Observou-se o comportamento da saída do sistema de controle montado no laboratório pela aplicação de vários sinais do tipo degrau no *set-point*, comparando-os com os resultados obtidos por simulação, conforme curvas mostradas a seguir:

- Comparação do sinal degrau – Distância 5,0 cm



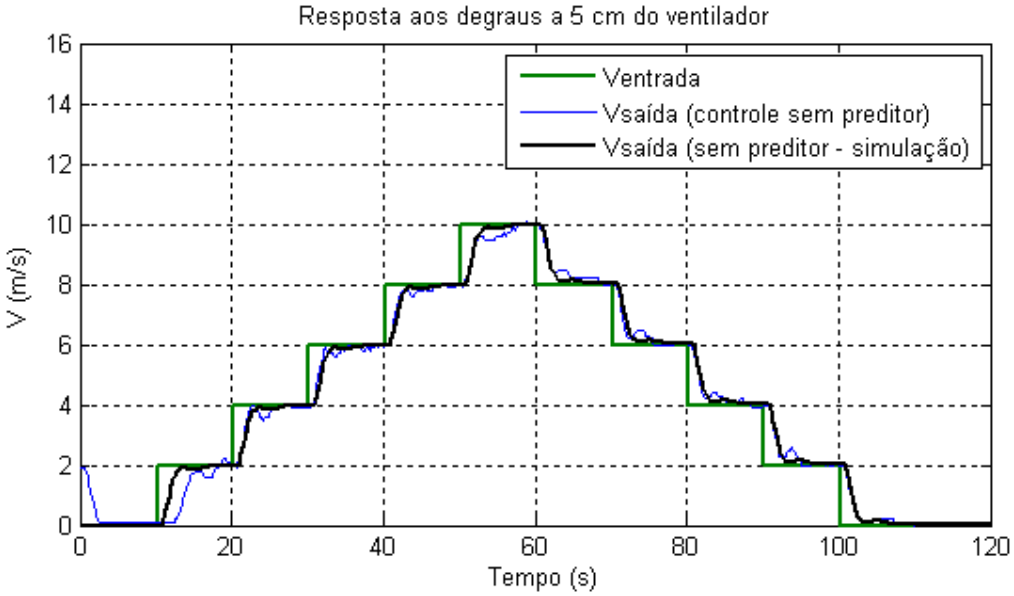
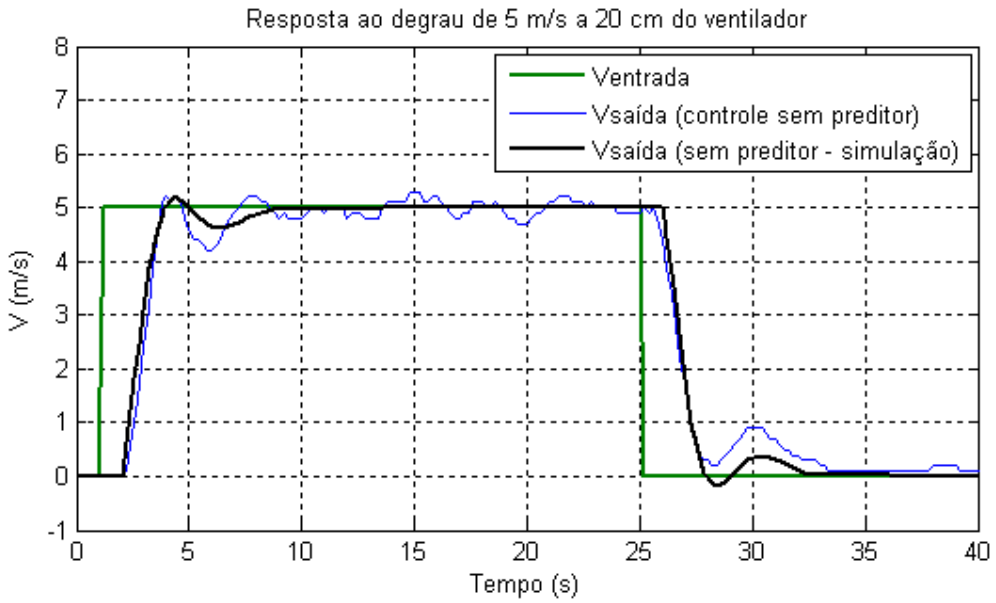


Figura 136: Sinais tipo degrau até 10 V, D=5,0 cm

- Comparação do sinal degrau – Distância 20,0 cm



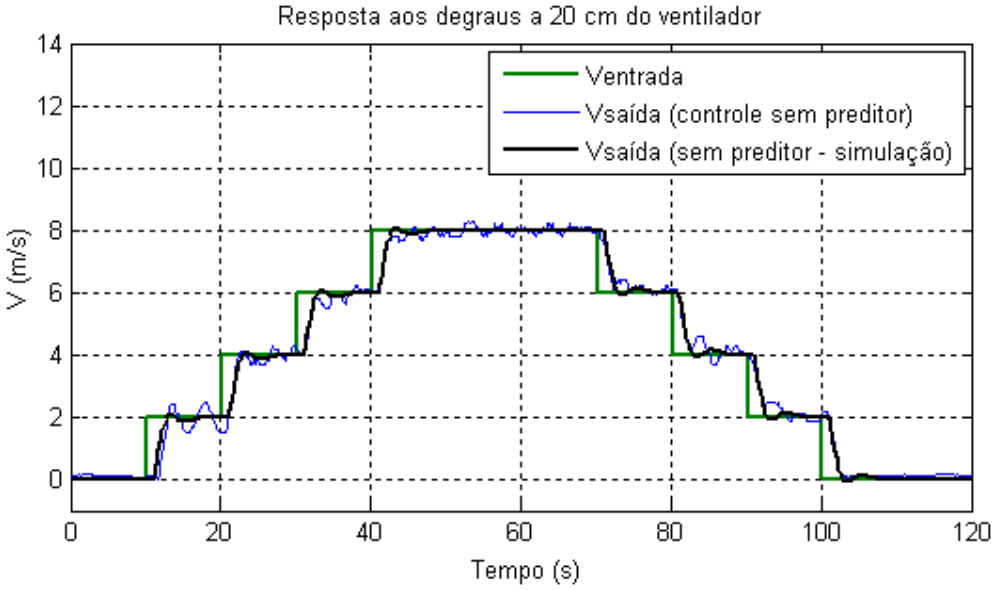
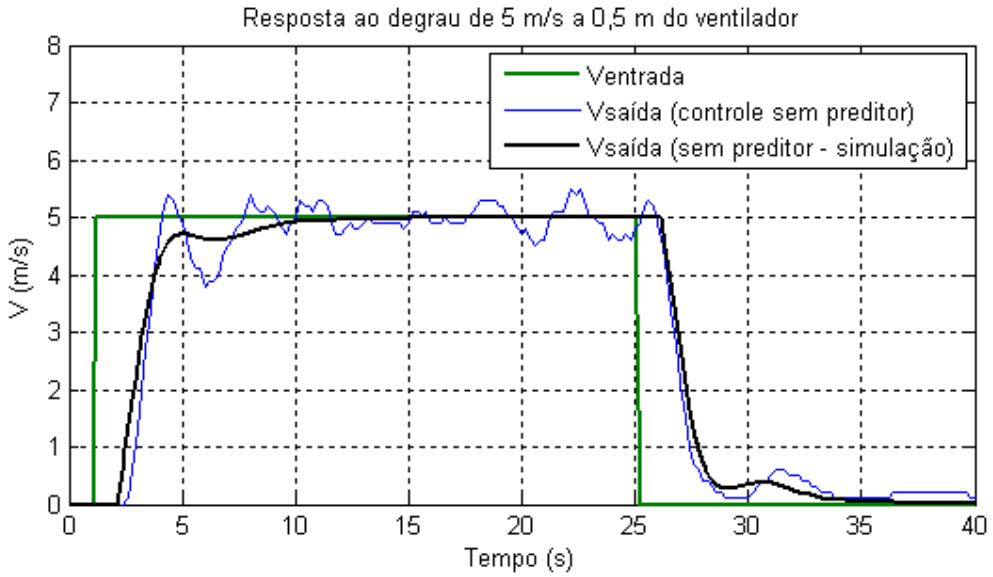


Figura 137: Sinais tipo degrau até 8 V, D=20,0 cm

- Comparação do sinal degrau – Distância 0,5 m



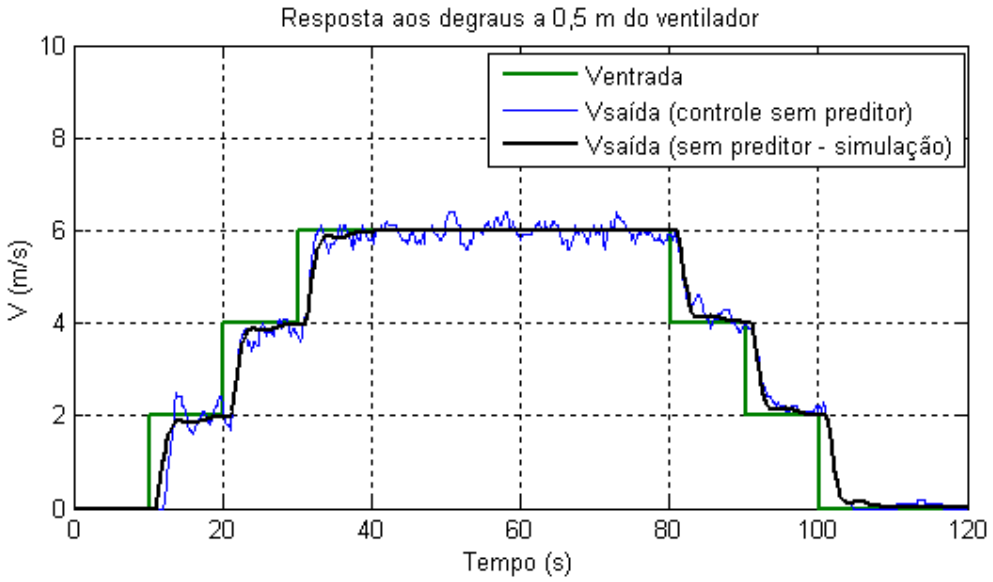
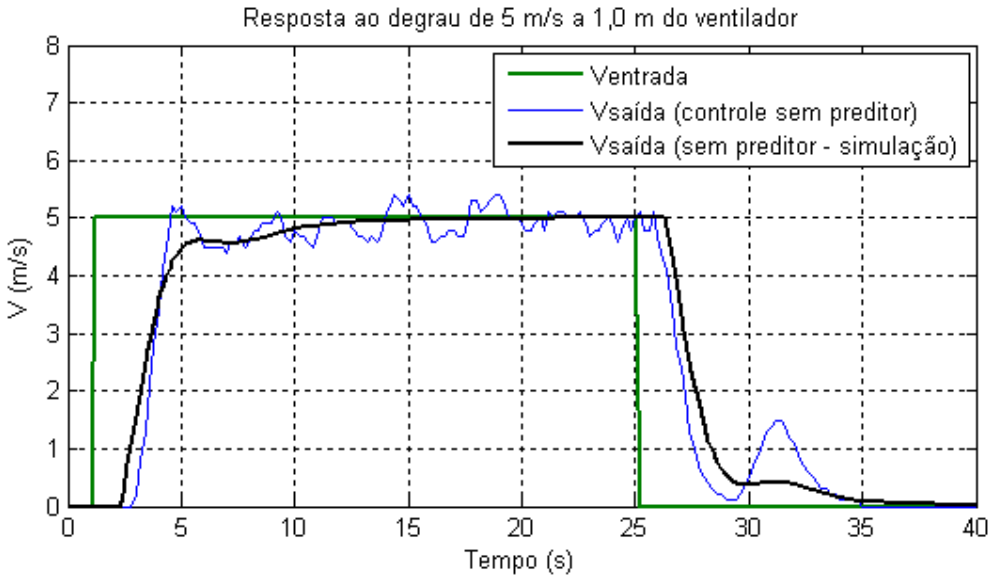


Figura 138: Sinais tipo degrau até 6 V, D=0,5 m

- Comparação do sinal degrau – Distância 1,0 m



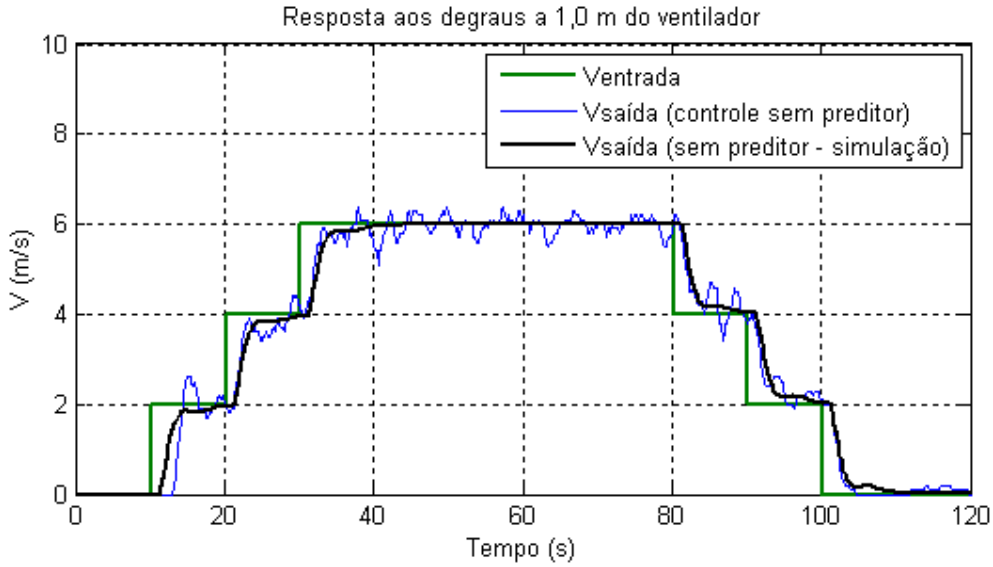
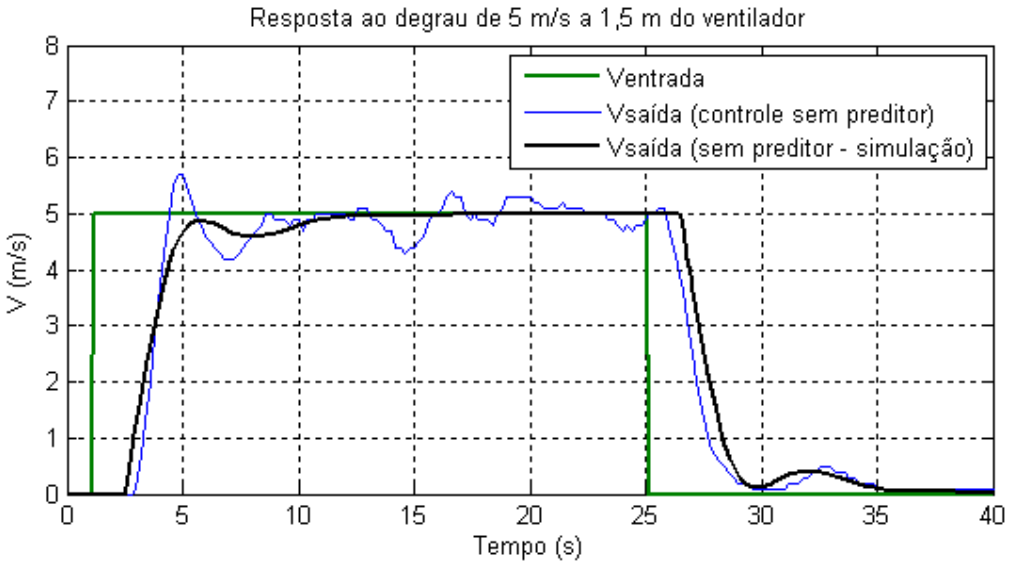


Figura 139: Sinais tipo degrau até 6 V, D=1,0 m

- Comparação do sinal degrau – Distância 1,5 m



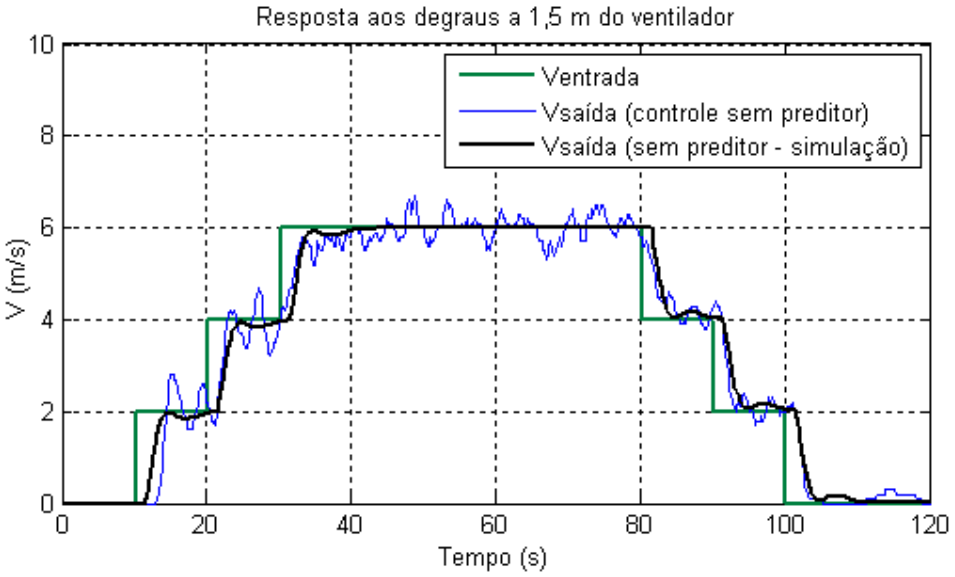
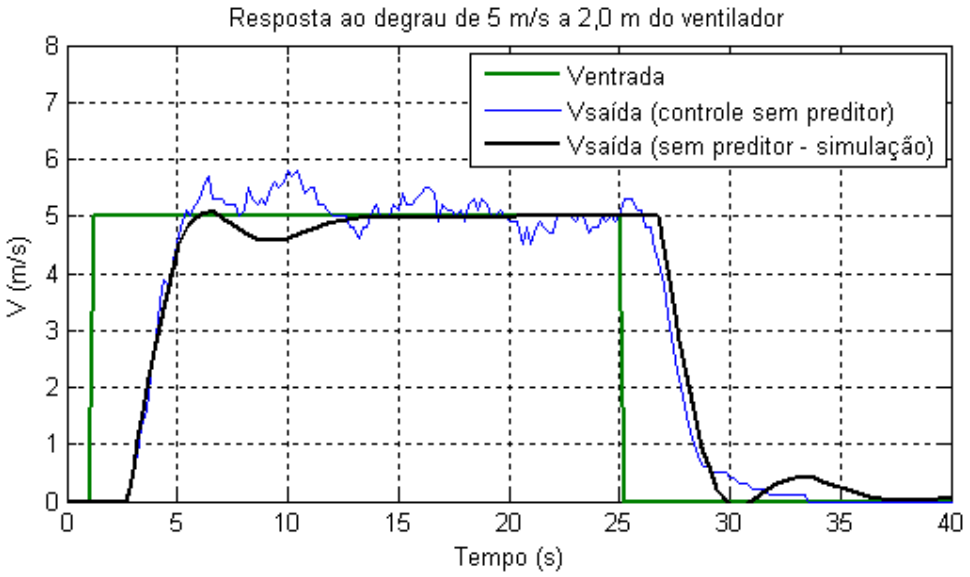


Figura 140: Sinais tipo degrau até 6 V, D=1,5 m

- Comparação do sinal degrau – Distância 2,0 m



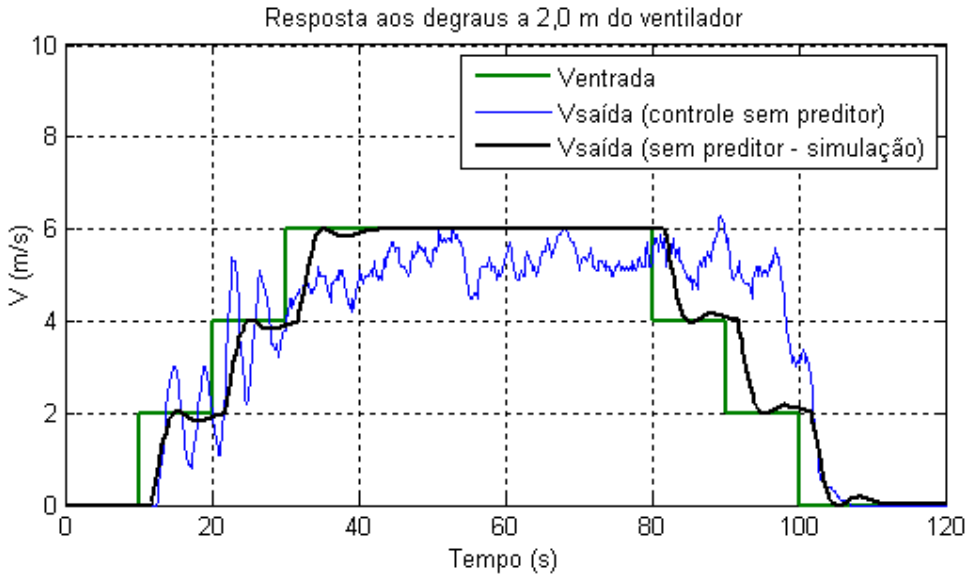
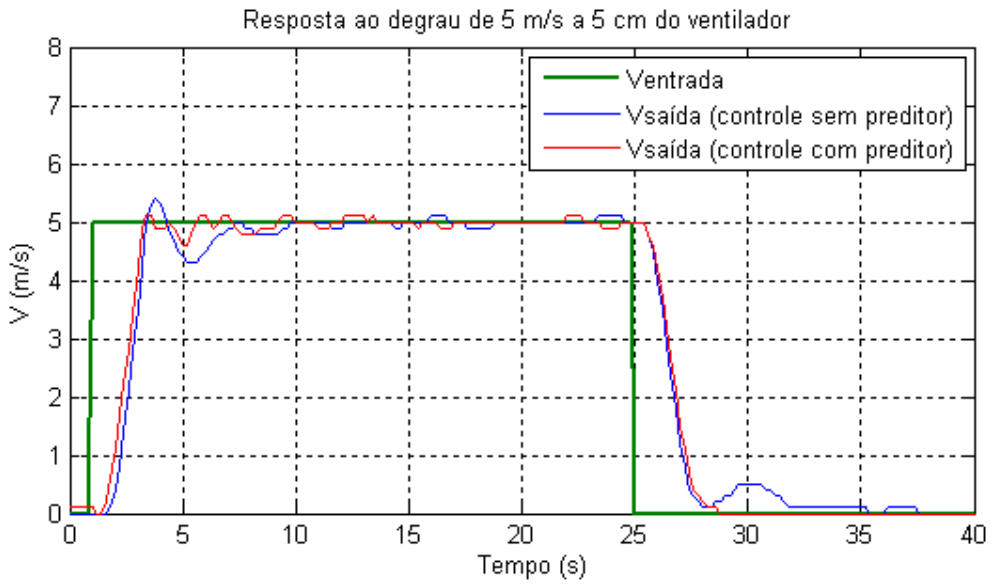


Figura 141: Sinais tipo degrau até 6 V, D=2,0 m

ANEXO 5 – CONTROLE SEM O USO DO PREDITOR DE SMITH X CONTROLE COM O USO DO PREDITOR DE SMITH

Aplicaram-se no *set-point* da malha de controle vários sinais do tipo degrau e do tipo *chirp*, observando-se o comportamento da saída. Em seguida aplicou-se a série temporal de Ochi e Shin para se observar o resultado do vento gerado. As curvas obtidas são mostradas a seguir:

- Comparação do sinal degrau – Distância 5,0 cm



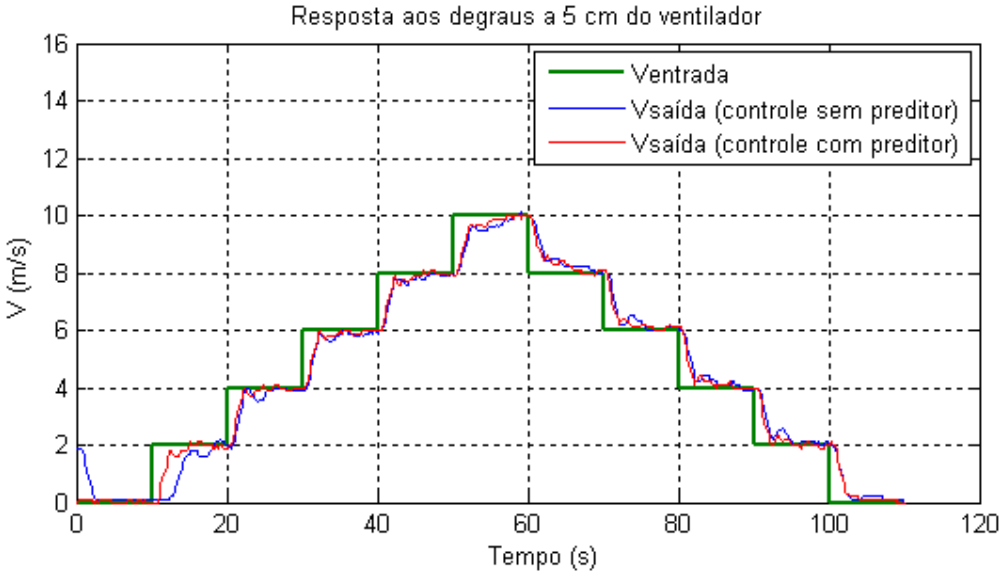
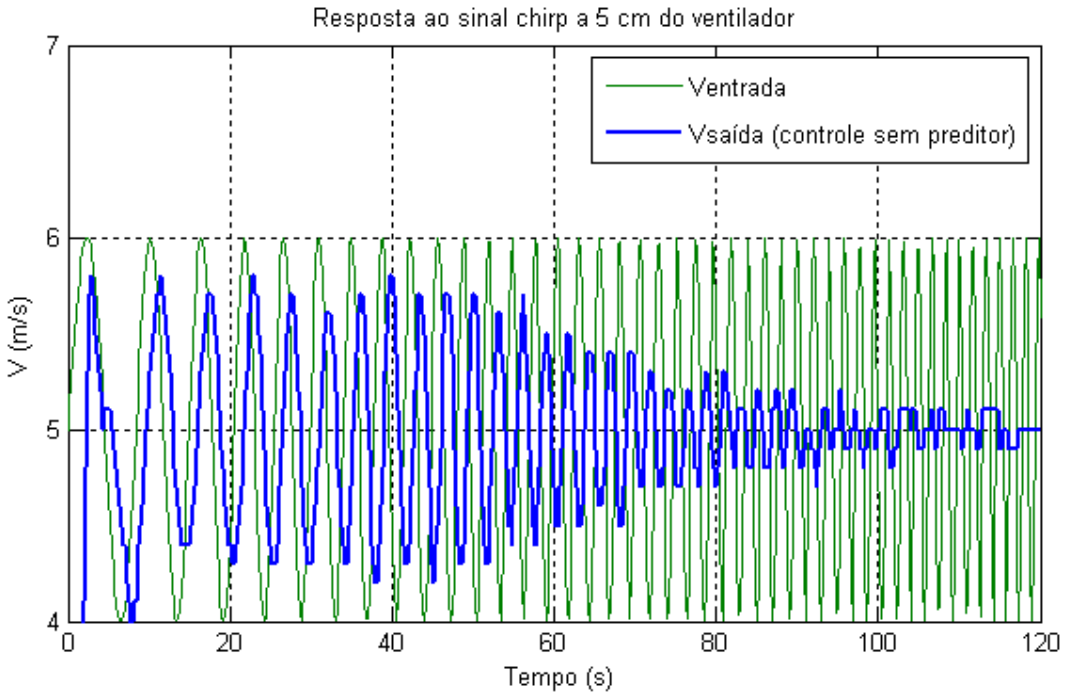


Figura 142: Sinais tipo degrau até 10 V, D=5,0 cm

- Comparação do sinal *chirp* – Distância 5,0 cm



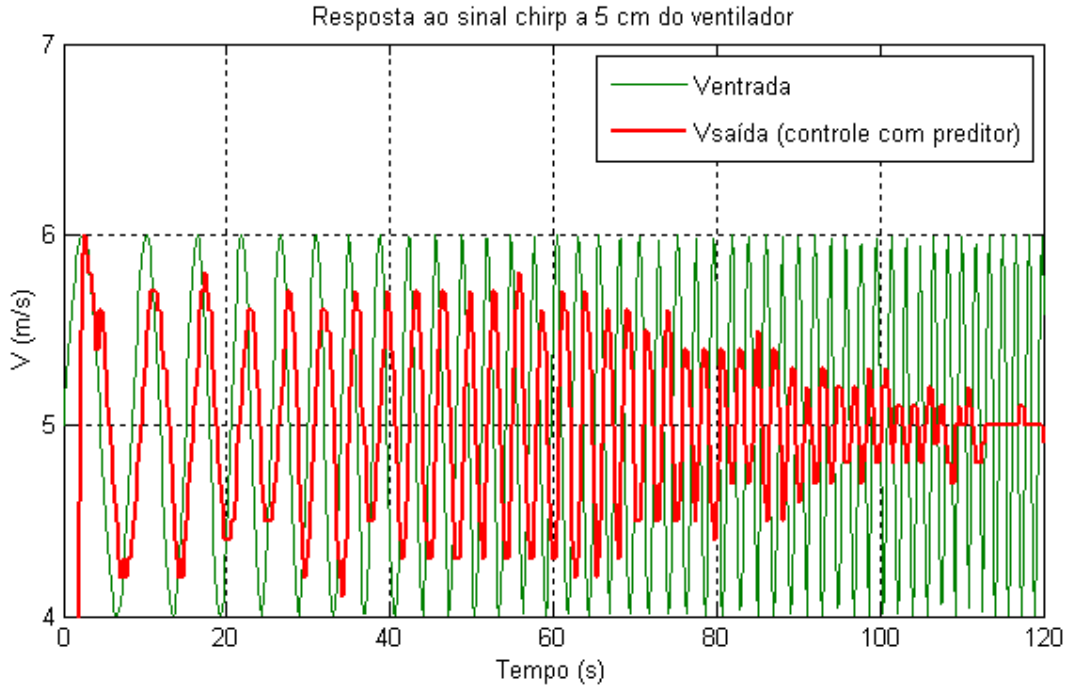


Figura 143: Sinais tipo *chirp*, D=5,0 cm

- Comparação da série temporal Ochi & Shin – Distância 5,0 cm

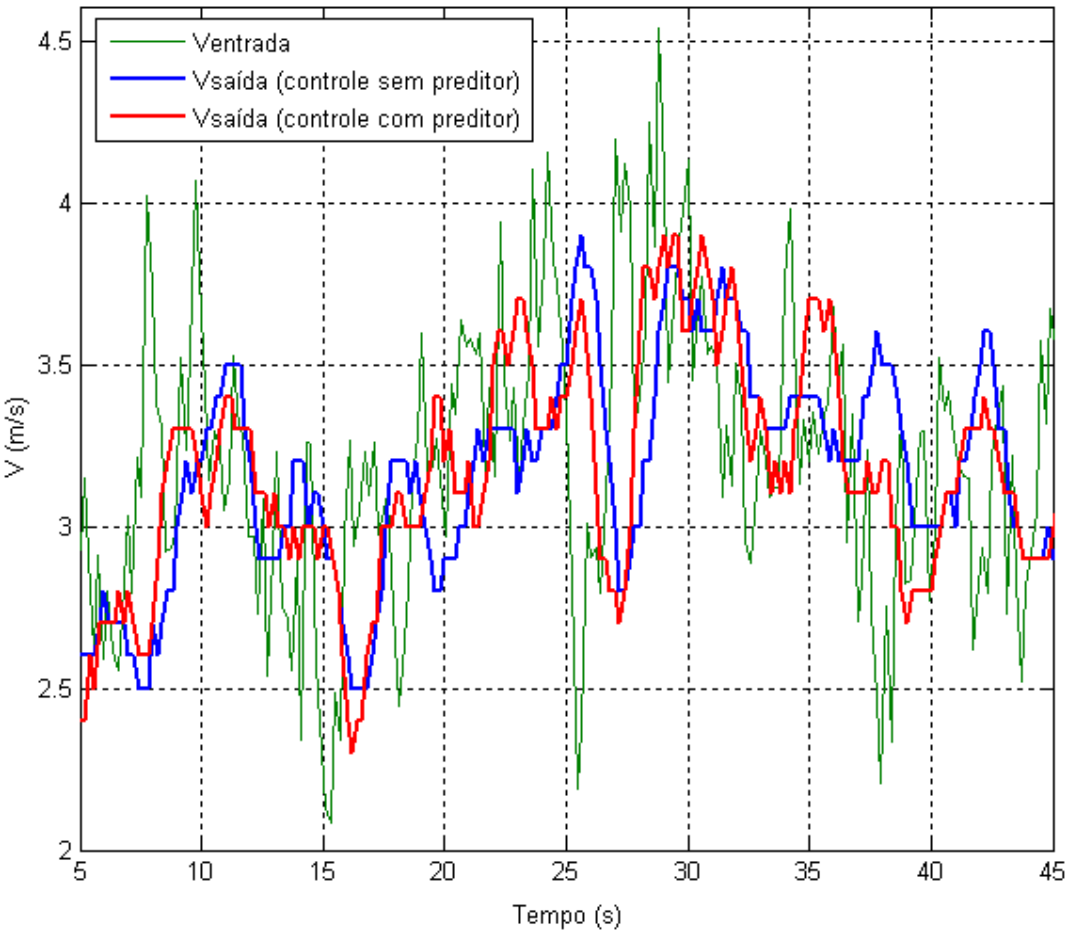
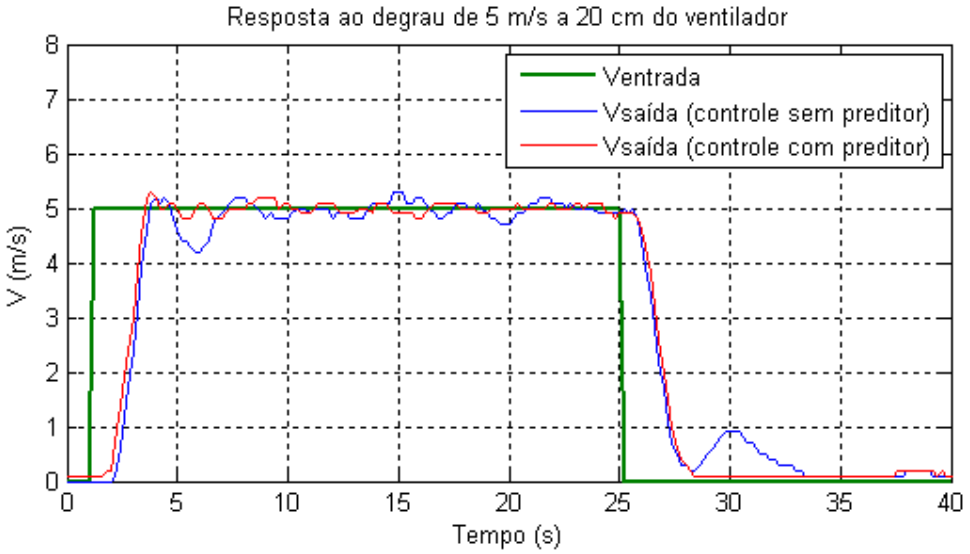


Figura 144: Série de Ochi & Shin, D=5,0 cm

- Comparação do sinal degrau – Distância 20,0 cm



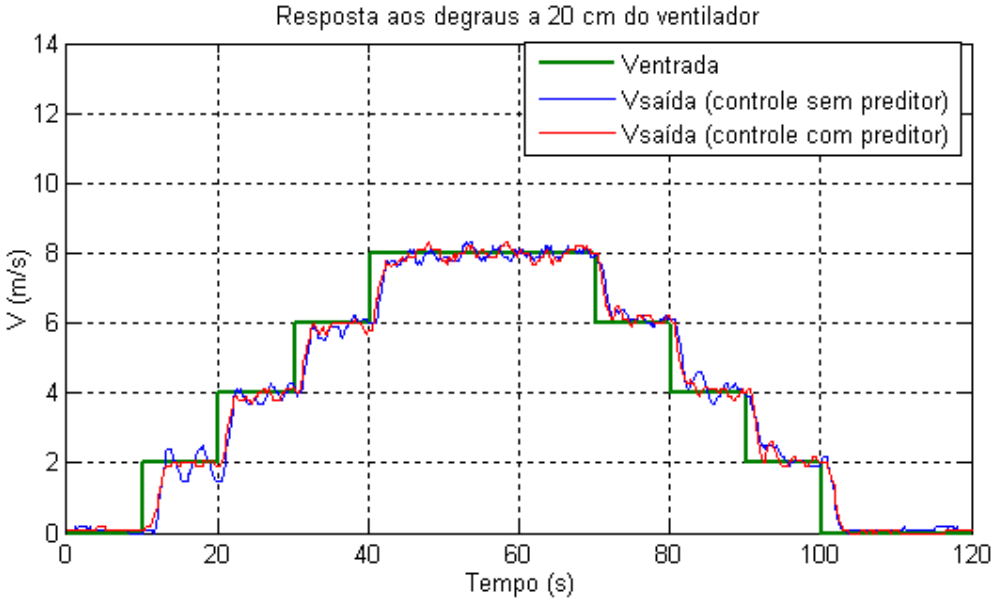
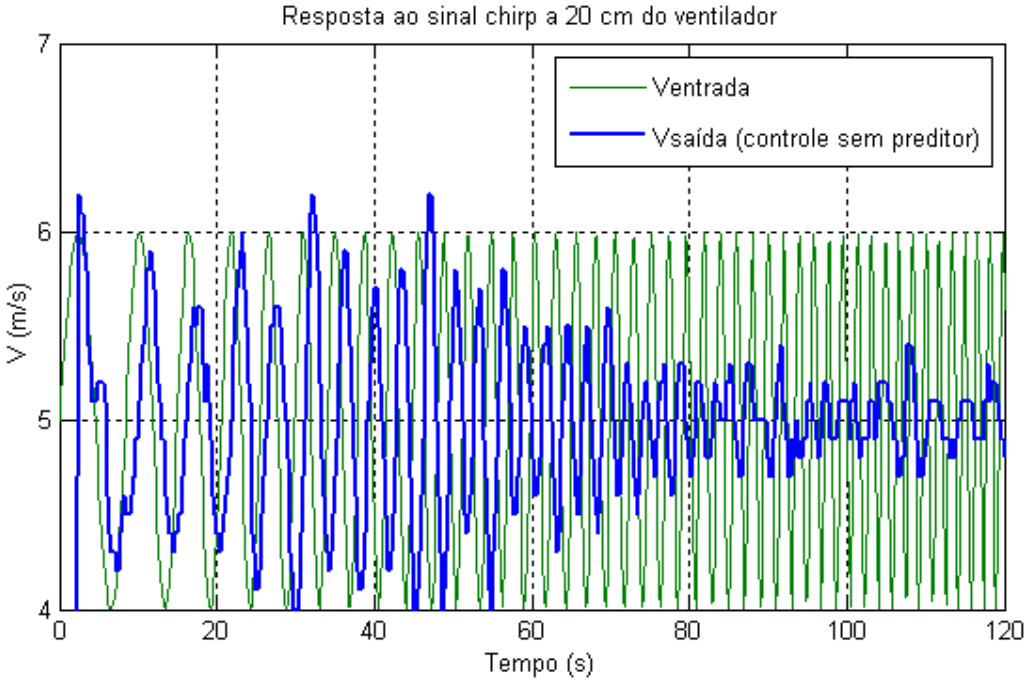


Figura 145: Sinais tipo degrau até 8 V, D=20,0 cm

- Comparação do sinal *chirp* – Distância 20,0 cm



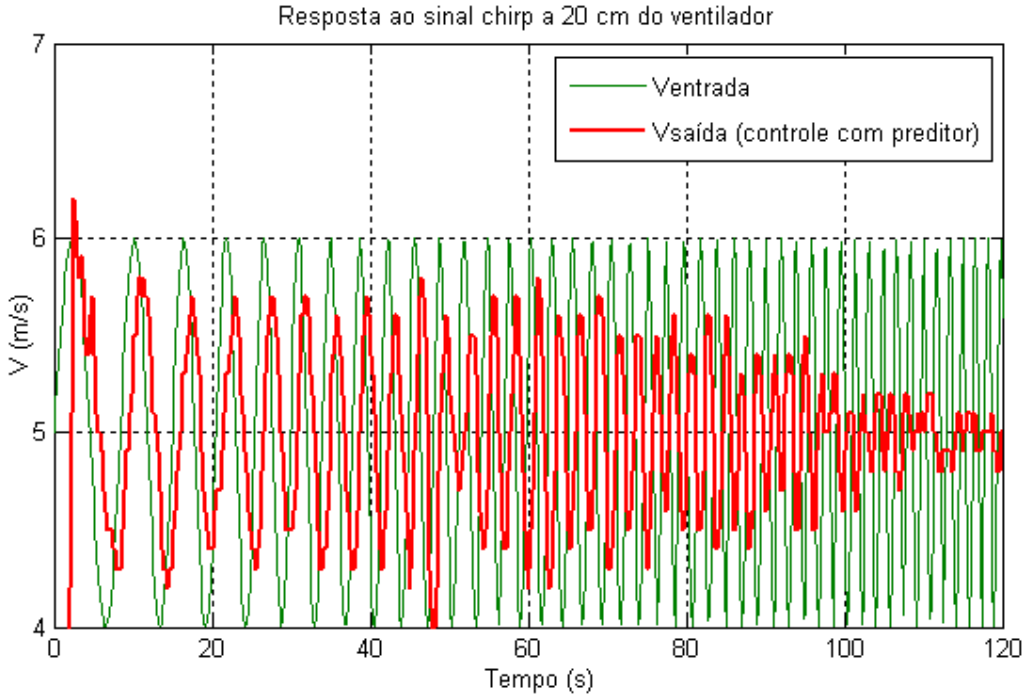


Figura 146: Sinais tipo *chirp*, D=20,0 cm

- Comparação da série temporal Ochi & Shin – Distância 20,0 cm

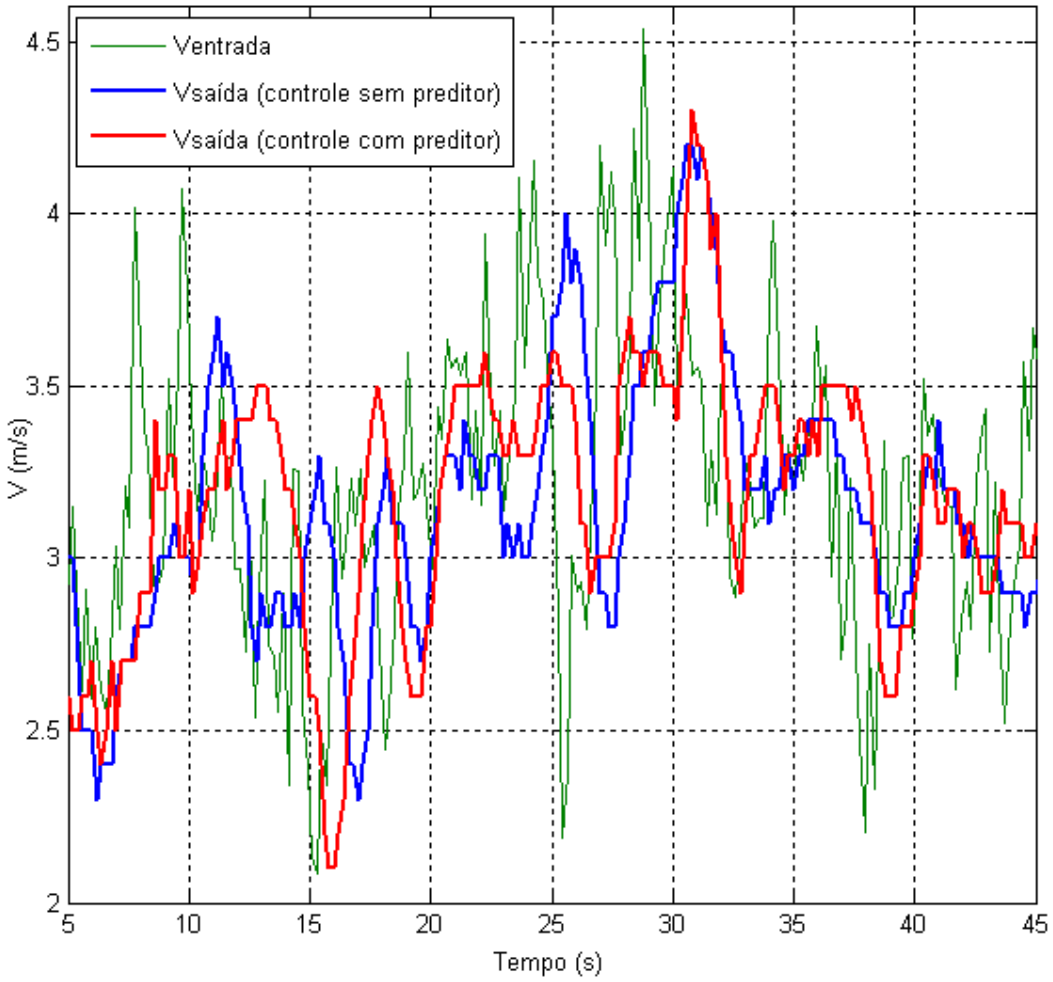
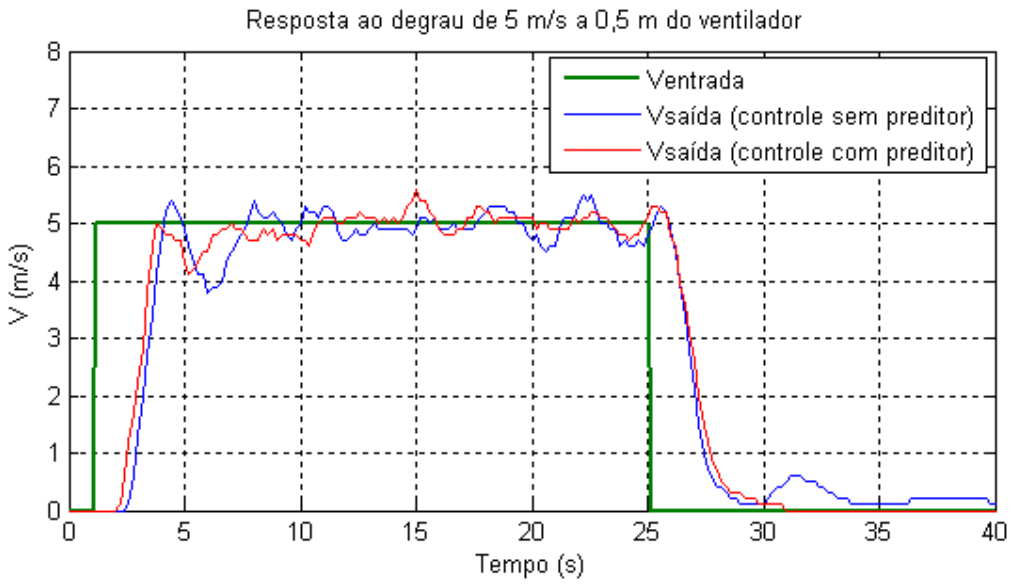


Figura 147: Série de Ochi & Shin, D=20,0 cm

- Comparação do sinal degrau – Distância 0,5 m



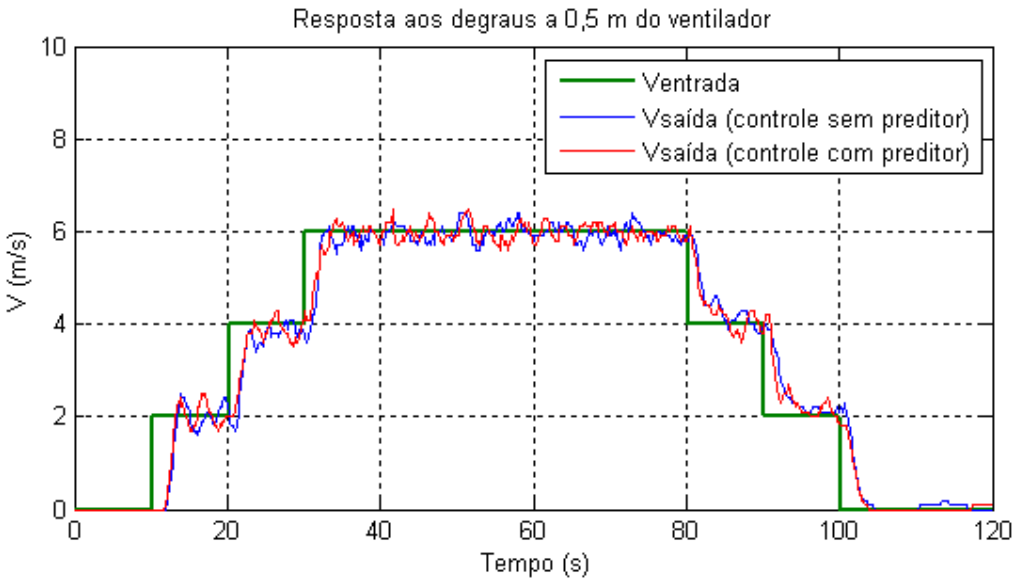
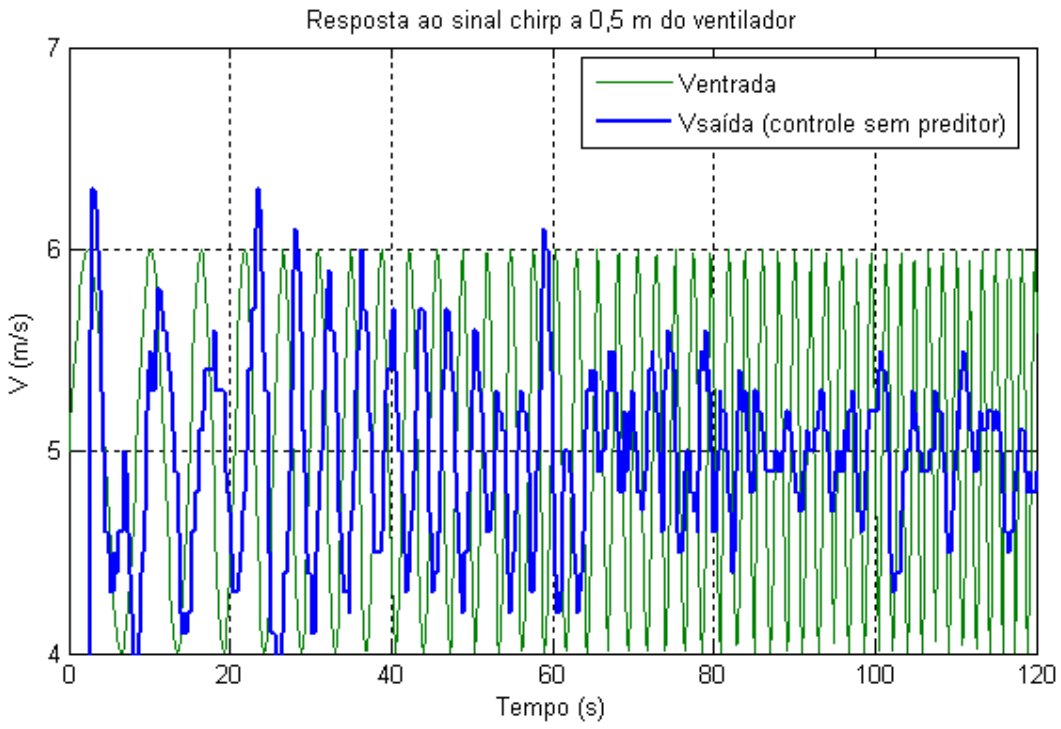


Figura 148: Sinais tipo degrau até 6 V, D=0,5 m

- Comparação do sinal *chirp* – Distância 0,5 m



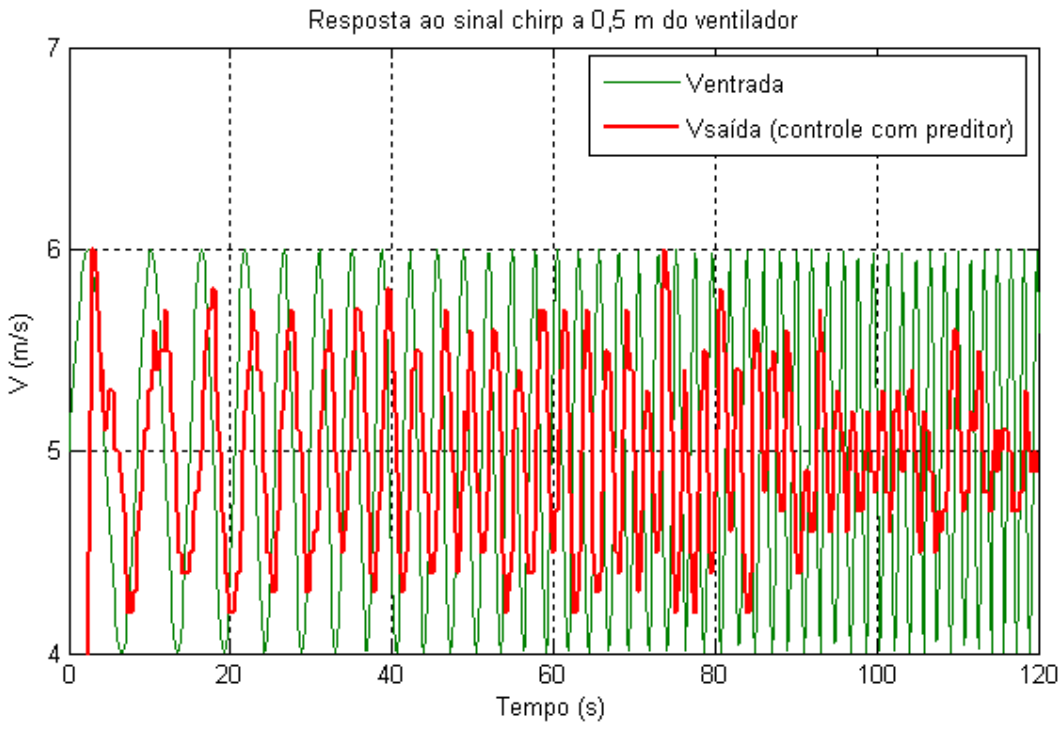


Figura 149: Sinais tipo *chirp*, D=0,5 m

- Comparação da série temporal Ochi & Shin – Distância 0,5 m

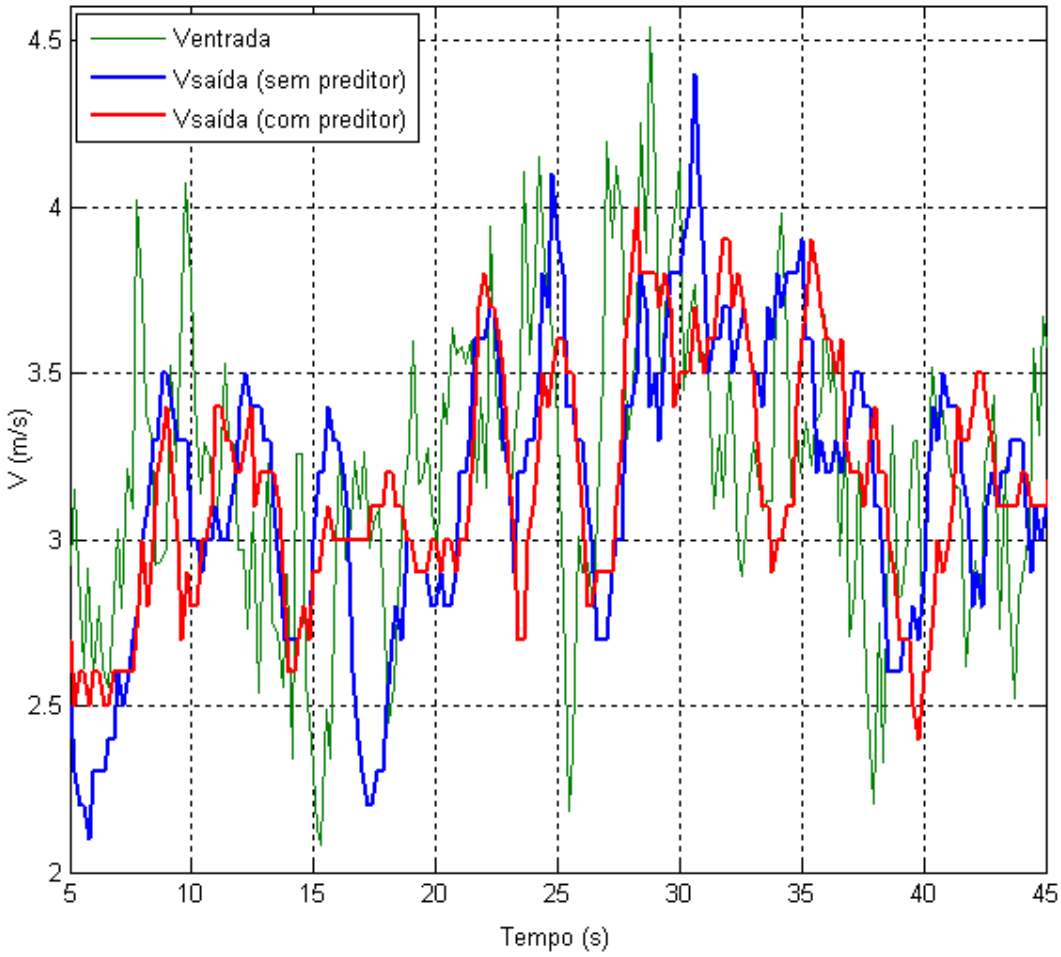
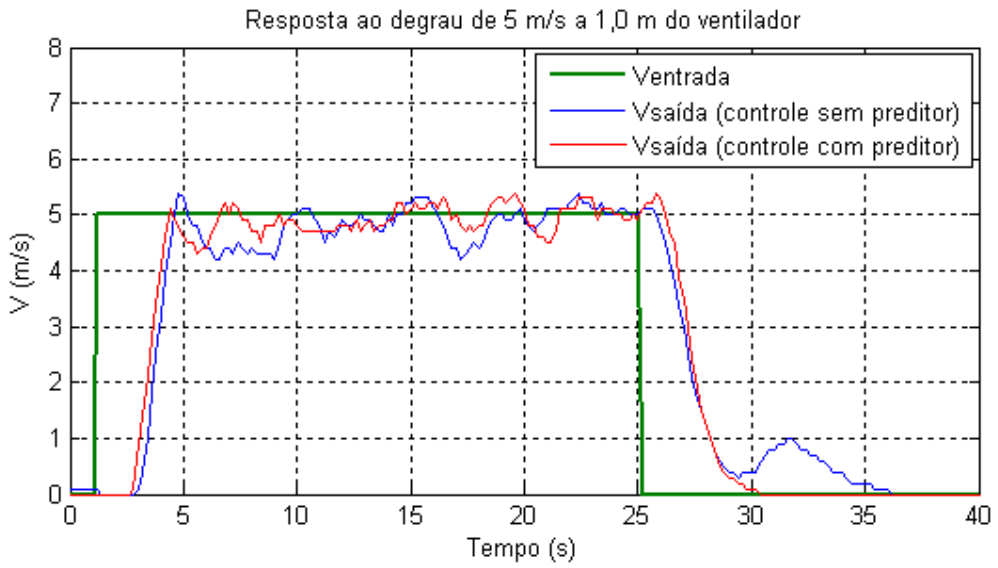


Figura 150: Série de Ochi & Shin, D=0,5 m

- Comparação do sinal degrau – Distância 1,0 m



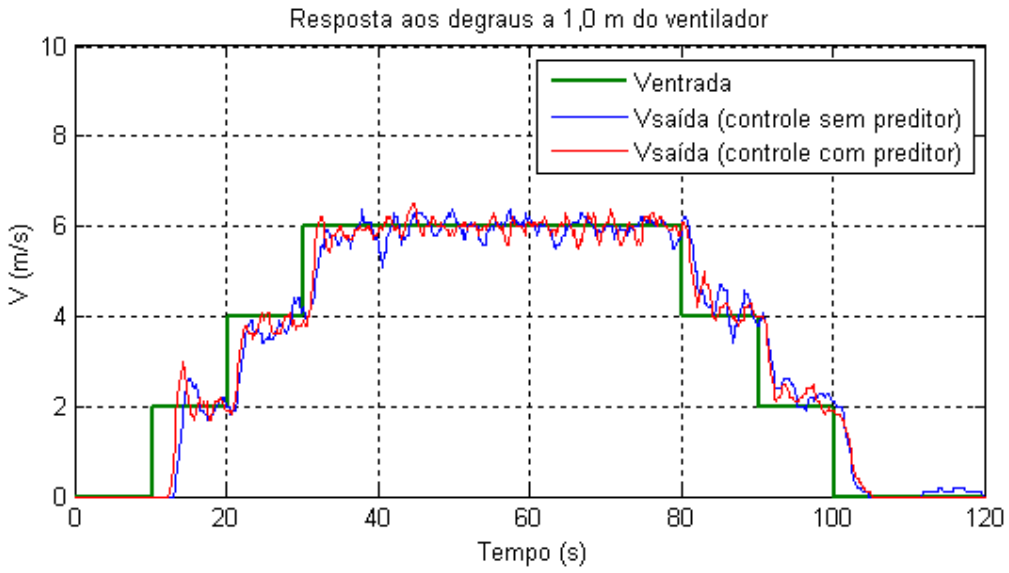
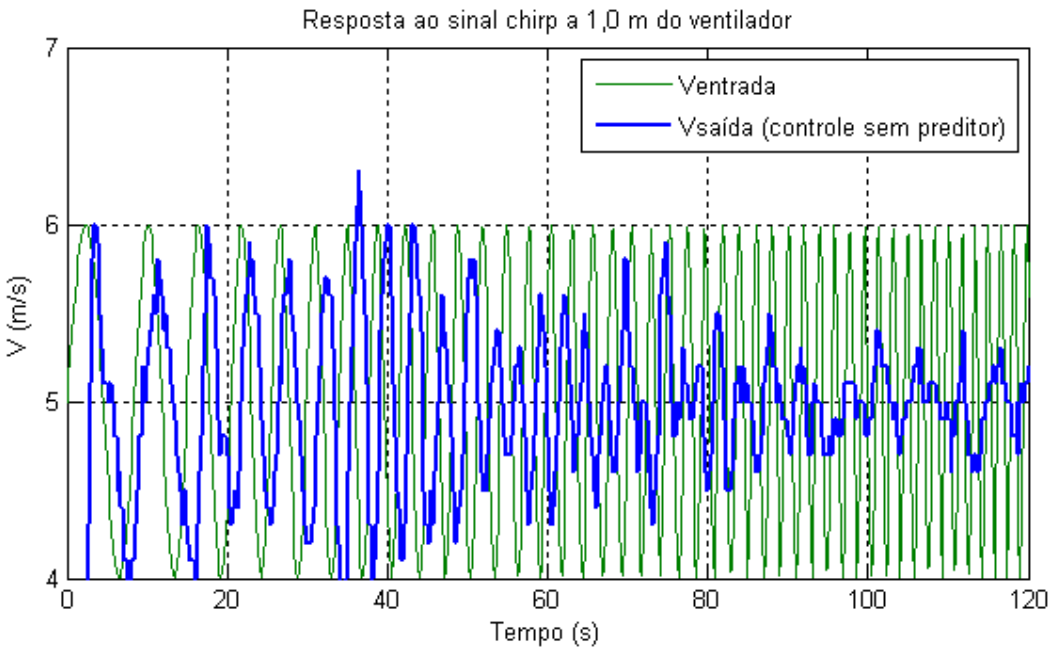


Figura 151: Sinais tipo degrau até 6 V, D=1,0 m

- Comparação do sinal *chirp* – Distância 1,0 m



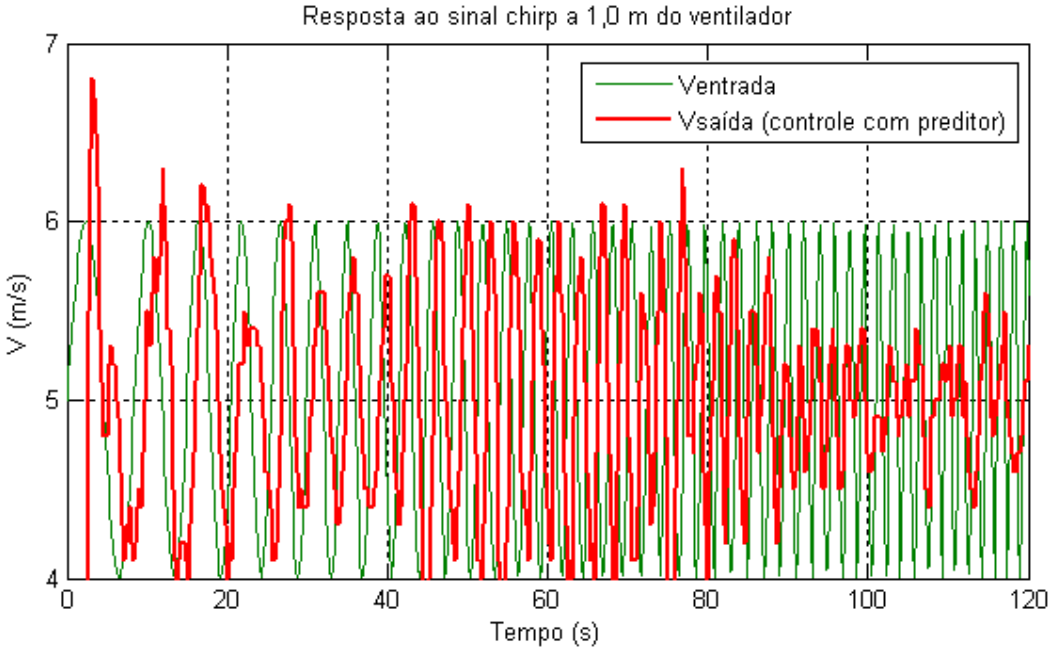


Figura 152: Sinais tipo *chirp*, D=1,0 m.

- Comparação da série temporal Ochi & Shin – Distância 1,0 m

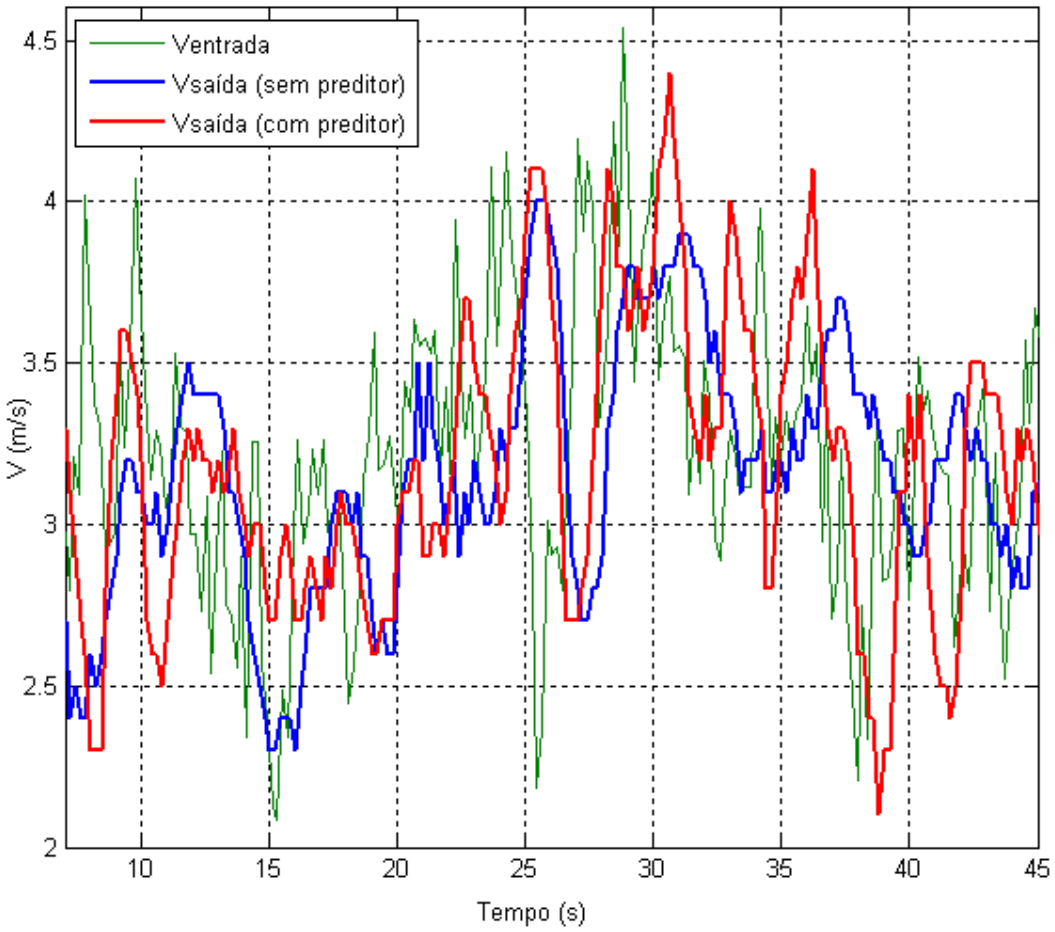
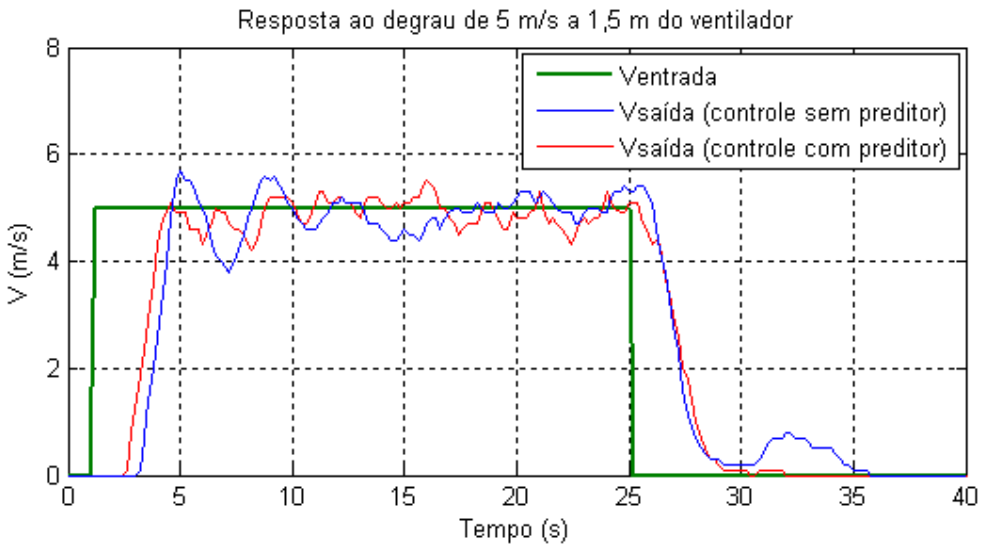


Figura 153: Série de Ochi & Shin, D=1,0 m

- Comparação do sinal degrau – Distância 1,5 m



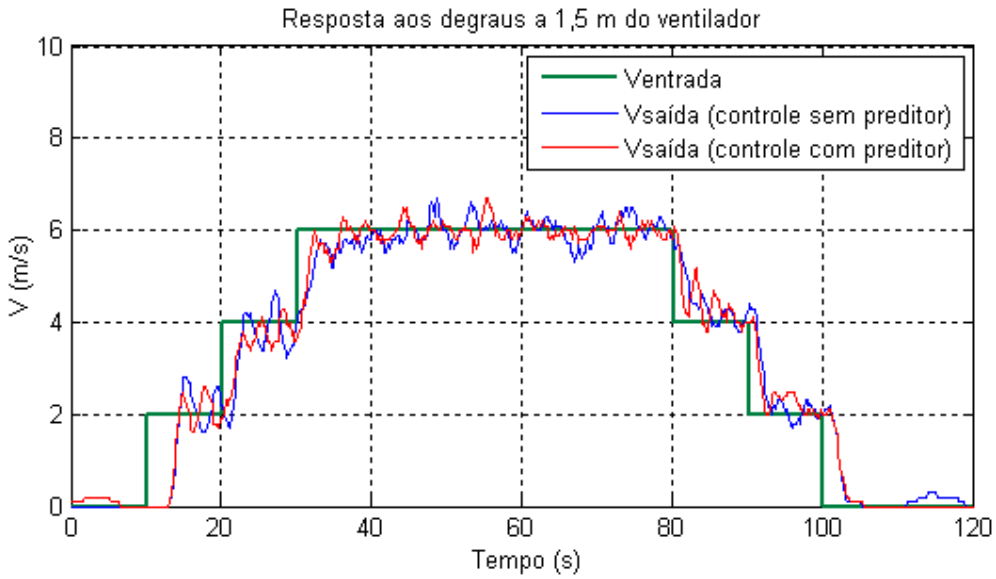
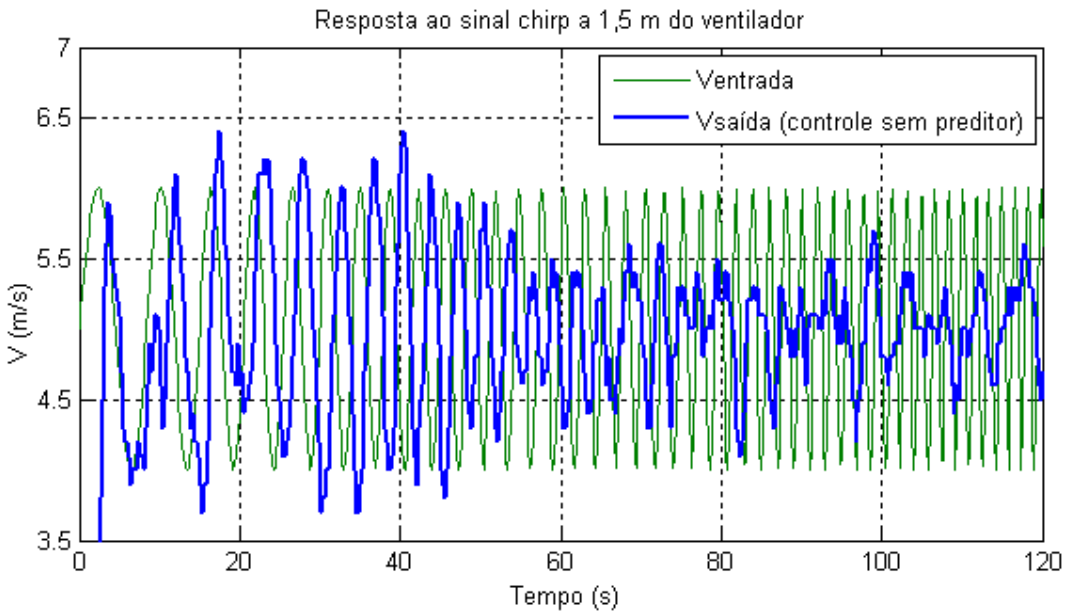


Figura 154: Sinais tipo degrau até 6 V, D=1,5 m

- Comparação do sinal *chirp* – Distância 1,5 m



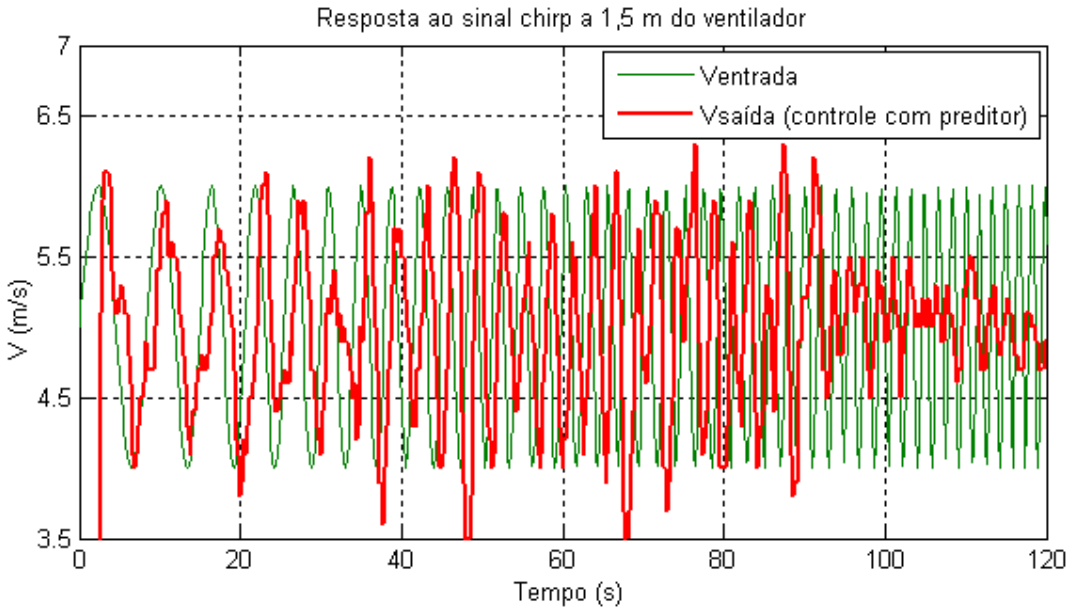


Figura 155: Sinais tipo *chirp*, D=1,5 m

- Comparação da série temporal Ochi & Shin – Distância 1,5 m

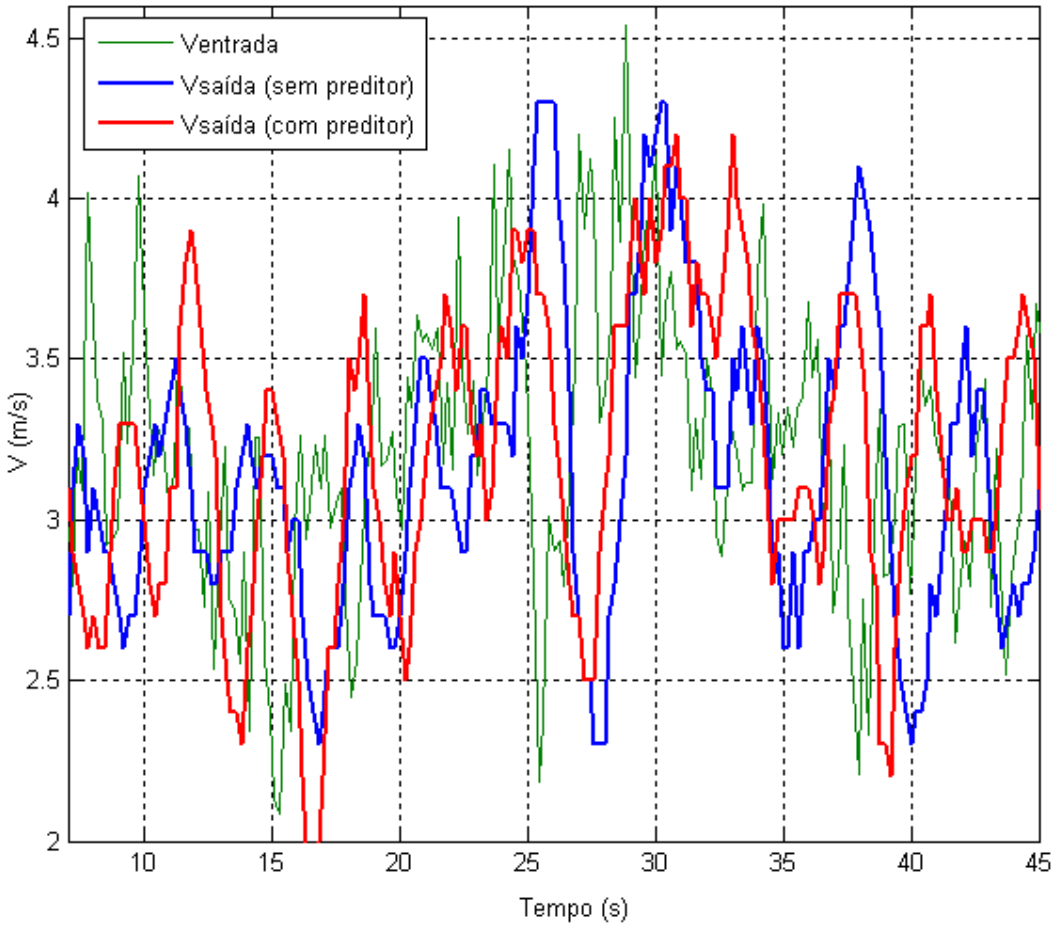
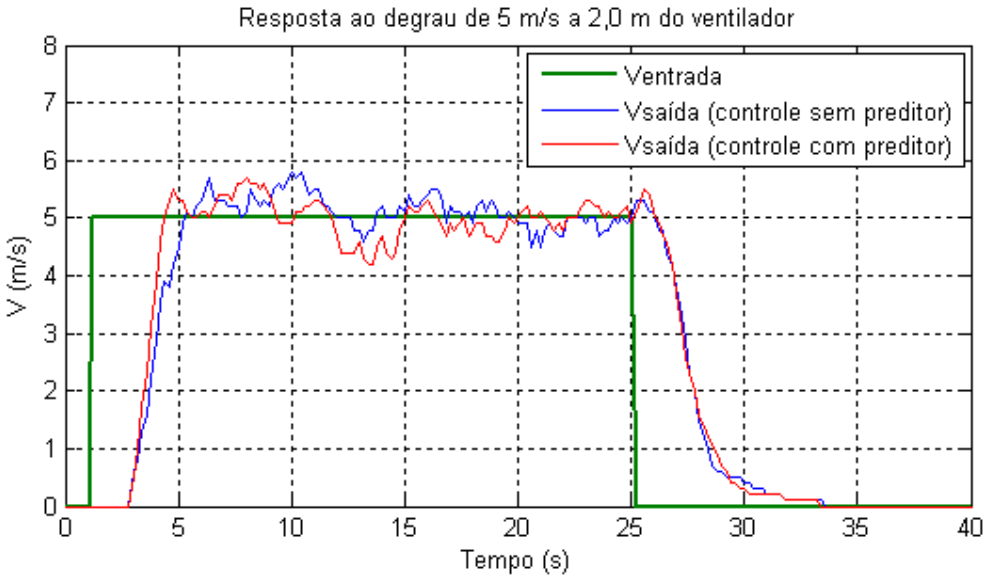


Figura 156: Série de Ochi & Shin, D=1,5 m

- Comparação do sinal degrau – Distância 2,0 m



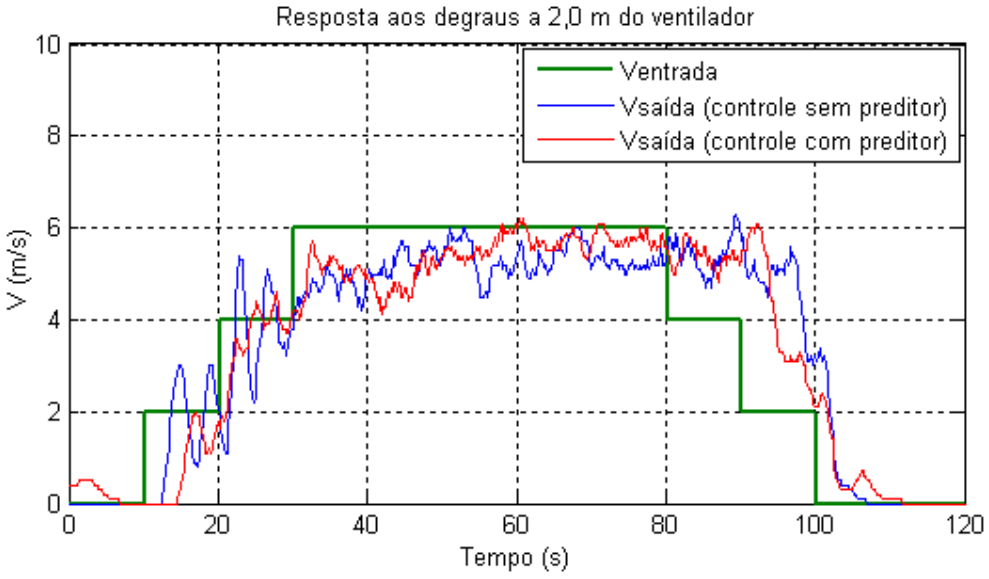
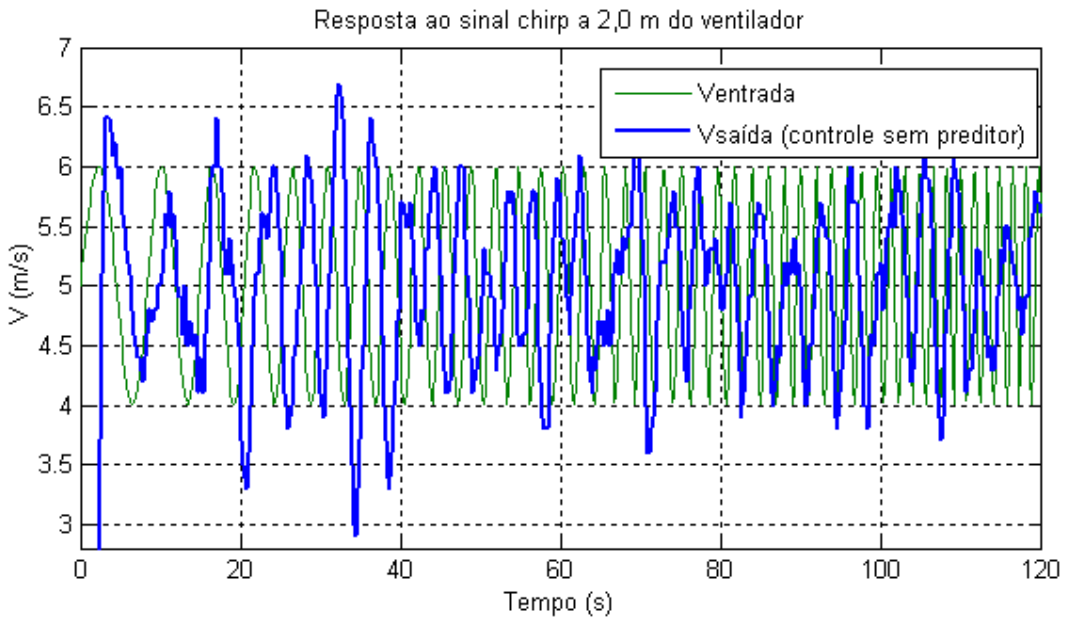


Figura 157: Sinais tipo degrau até 6 V, D=2,0 m

- Comparação do sinal *chirp* – Distância 2,0 m



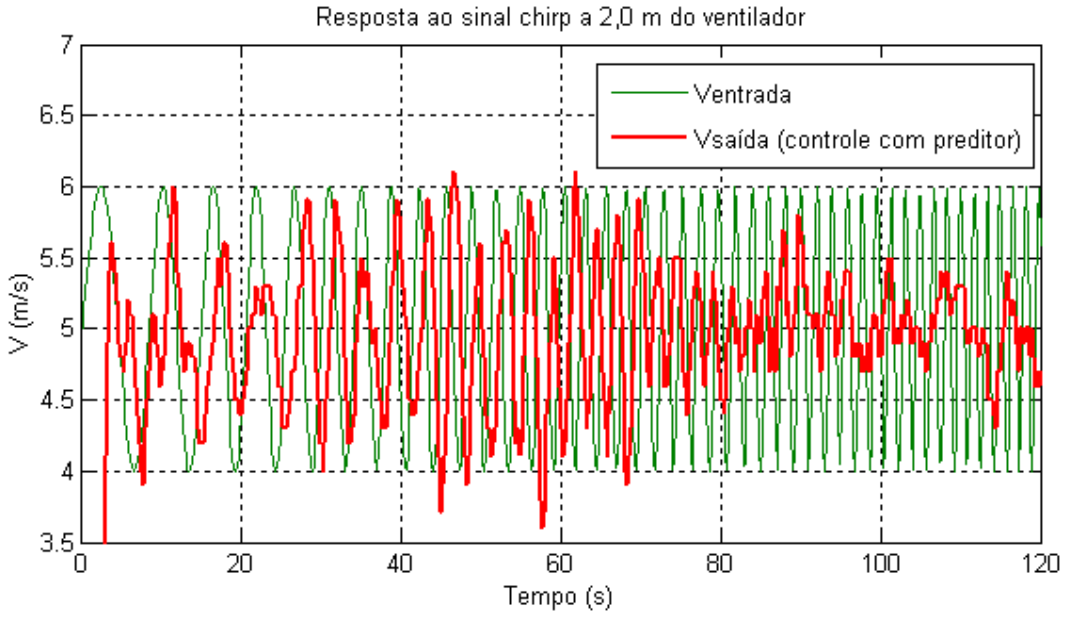


Figura 158: Sinais tipo *chirp*, D=2,0 m

- Comparação da série temporal Ochi & Shin – Distância 2,0 m

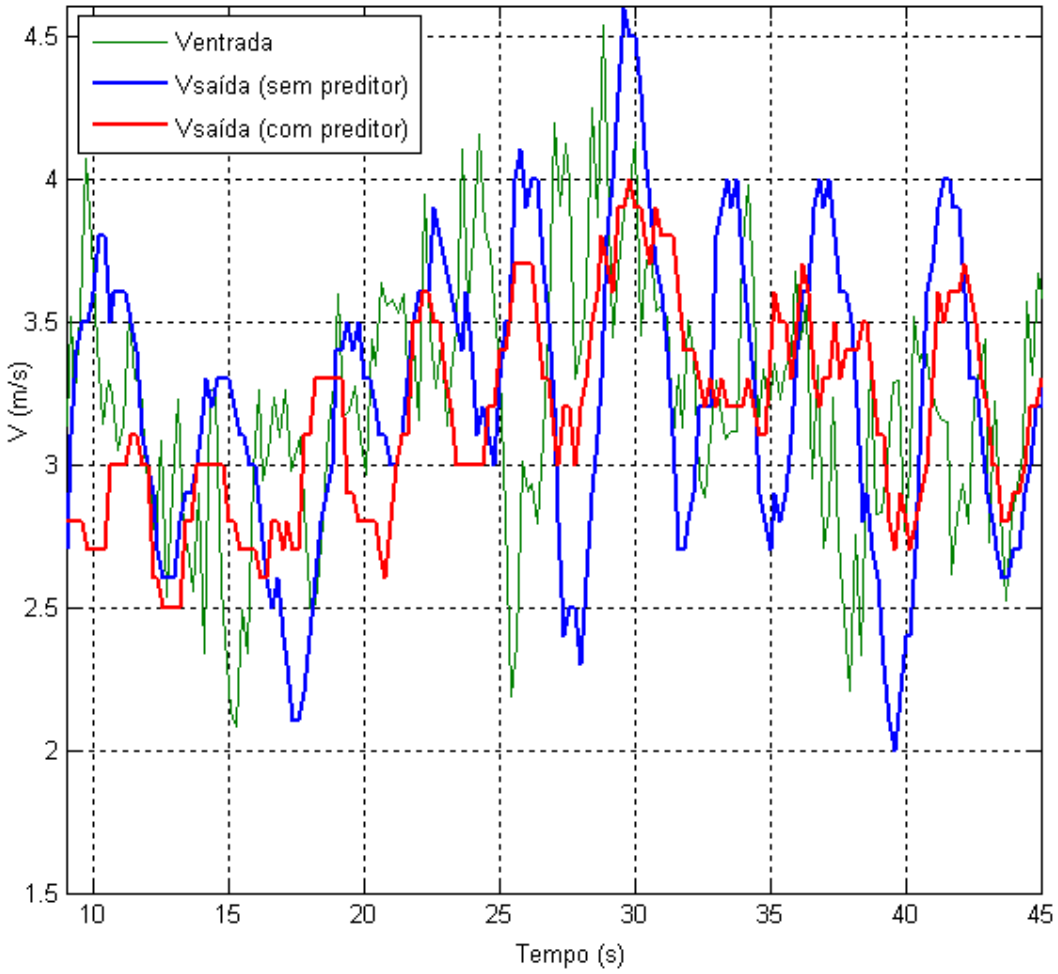


Figura 159: Série de Ochi & Shin, D=2,0 m