

Modelagem de um anemômetro para utilização em um túnel de vento por meios experimentais

Alex Lemes Guedes, Paula Leticia Souza de Moura, Diogo Marujo

Resumo: A função de transferência é um modelo matemático que descreve as características dinâmicas de um dado sistema de modo a expressar a equação diferencial que relaciona a saída do sistema com a variável de entrada. Quando esta função não é conhecida, é possível caracterizá-la experimentalmente, aplicando entradas conhecidas e observando a saída do sistema. Esse trabalho dedicou-se a encontrar a função de transferência de um sensor capaz de medir a velocidade do vento, cuja construção é baseada em um *cooler*. Foram realizadas medidas do sensor em tempo real a partir de ensaios para alguns valores fixos de velocidade do vento em um túnel de vento. Esses dados foram posteriormente utilizados para obter três funções de transferência distintas no software MATLAB, a partir das quais foi possível relacioná-las com seus respectivos valores de acionamento do túnel. Dessa forma foi encontrada uma função de transferência única que representa o comportamento do sensor para todas as entradas. Esta função pode ser utilizada para calibração do sensor e posteriormente será utilizada para controle do próprio túnel de vento.

Palavras chave: Função de Transferência; sensor; túnel de vento, modelagem matemática

Anemometer modeling for use in a wind tunnel by experimental means

Abstract: A transfer function is a mathematical model that describes the dynamic characteristics of a system in order to express the differential equation that relates the system output to the input variable. If this function is not known, it can be experimentally characterized by applying known inputs and observing system output. This paper is dedicated to find the transfer function of a sensor capable of measuring wind speed, whose construction is based on a cooler. Real-time sensor measurements were taken from tests for some fixed wind speed values in a wind tunnel. These data were later used to obtain three distinct transfer functions in the MATLAB software, from which it was possible to relate them to their respective tunnel drive values. Thus a unique transfer function was found that represents the sensor behavior for all inputs. This function can be used for sensor calibration and will later be used to control the wind tunnel itself.

Key-words: Transfer Function, sensor; wind tunnel, mathematical modeling

1. Introdução

O Túnel de vento é um sistema muito utilizado em testes aerodinâmicos para estudar o como o fluxo de vento se comporta em torno de um objeto sem a necessidade de movimentação desse objeto, uma vez que apenas o vento se move na seção de teste do túnel, sendo considerado uma das mais importantes ferramentas em análises aerodinâmicas. Sua construção é composta por: (i) um sistema propulsor, responsável por gerar o fluxo de ar utilizando ventiladores que devem superar as perdas de carga geradas em cada componente do túnel (ii) A câmara de estabilização, onde são instaladas colmeias e outros dispositivos com intuito de melhorar a qualidade de escoamento; (iii) seção de testes, que é a região do túnel onde os objetos em estudo serão colocados e terão o escoamento do fluxo analisado ao longo da sua extensão; por fim, (iv) o difusor, cuja função é desacelerar o fluxo de ar proveniente da seção de testes (LUIZ CARMINATTI; RODRIGO KONRATH, 2017).

O túnel de vento é considerado uma das mais importantes ferramentas nas pesquisas de fenômenos aerodinâmicos em objetos expostos a escoamentos (SOUZA JUNIOR; FERREIRA; LETA, 2012). Suas primeiras aplicações incluíam o estudo aerodinâmico de aeronaves e carros com propósito de melhorar o desempenho e diminuir o consumo de combustível. Atualmente, suas aplicações se estendem desde o estudo aerodinâmico de construções, aerodinâmica veicular até aplicações na agricultura, como o estudo de dispersão de poluentes, por exemplo. O emprego de túneis de vento para analisar os fenômenos aerodinâmicos ocorre a fim de obter segurança, confiabilidade, eficiência e a redução de custos de projetos. (IPT, 2019).

Um túnel de vento é um dispositivo desenvolvido para produzir um fluxo de vento controlado a fim de estudar os efeitos da movimentação do ar em torno de um objeto de interesse, tal como um aerofólio. O projeto de controle para estabilizar a velocidade do vento no túnel envolve a aferição adequada dessa velocidade (CARVALHO, A; ABILIO, C; SANTANA, L., 2013). Neste contexto, surge a necessidade de encontrar a função de transferência do sensor, uma vez que seu comportamento influencia diretamente na função de transferência de malha fechada do sistema descrita por:

$$FTMF(s) = \frac{FTRD(s)}{1 + FTMA(s)} = \frac{GC(s).GP(s)}{1 + GC(s).GP(s).H(s)} \quad (1)$$

Sendo as funções de transferência $FTMF(s)$ para a malha fechada, $FTRD(s)$ para o ramo direto, $GC(s)$ para o controlador, $GP(s)$ para a planta e $H(s)$ para o sensor. Portanto, percebe-se que $H(s)$ é necessária para o desenvolvimento de um controle eficiente para o túnel de vento. Foi utilizado nesse estudo o túnel de vento desenvolvido no Laboratório de Automação e Desenvolvimento (LAD), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Medianeira, como mostra a Figura 1.



Figura 1 – Túnel de vento

O sistema de controle do túnel tem seu funcionamento mostrado no diagrama de blocos (Figura 2) no qual percebe-se que os dados do sensor são utilizados para realimentar o controlador e manter a velocidade do escoamento no túnel estável.



Figura 2 – Fluxograma do controle do túnel de vento

Neste sentido, este trabalho tem como objetivo encontrar a função de transferência de um sensor capaz de medir a velocidade do vento, cuja construção é baseada em um cooler. A coleta dos dados do sensor obtidos em tempo real foi feita a partir de ensaios para alguns valores fixos de velocidade do vento no túnel. Esses dados foram posteriormente utilizados para obter três funções de transferência distintas no software MATLAB. A partir dessas funções, foi possível relacioná-las com seus respectivos valores de PWM para encontrar uma função de transferência única que representa o comportamento do sensor para todas as entradas.

2. Fundamentação Teórica

A seguir são apresentados os conceitos básicos utilizados neste trabalho.

2.1 Funções de Transferência

A função de transferência de um sistema representado por uma equação diferencial linear invariante no tempo é definida como a relação entre a transformada de Laplace da saída e a transformada de Laplace da entrada, considerando todas as condições iniciais nulas (OGATA, 2010). Matematicamente, a função de transferência é definida em (2)

$$H(S) = \frac{L[\text{saída}]}{L[\text{entrada}]}\bigg|_{c.i.=0} \quad (2)$$

Para determinar a função de transferência pelo método de modelagem matemática é necessário conhecer todos os elementos do sistema. Caso isso não seja possível, a função ainda pode ser determinada por processos experimentais, aplicando entradas conhecidas e estudando as respostas que o sistema entrega (OGATA, 2010). Conhecer a função de transferência é útil na caracterização do comportamento dinâmico do sistema analisado e também na elaboração de um projeto de controle para esse sistema ou para um sistema maior que depende deste, para o qual a função de transferência foi encontrada.

2.2 Resposta ao degrau unitário do sistema de primeira ordem

Considerando um sistema de primeira ordem representado no diagrama de blocos da Figura 3 e seu diagrama simplificado (Figura 4), A relação Saída pela entrada em função da frequência será dada por:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ts + 1} \quad (3)$$

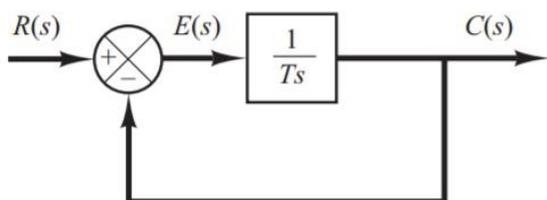


Figura 3 – Diagrama de blocos de um sistema de primeira ordem
Fonte: Ogata (2010)

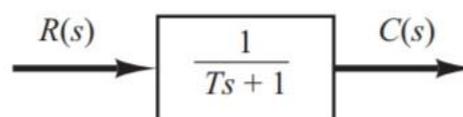


Figura 4 – Diagrama de blocos simplificado de um sistema de primeira ordem
Fonte: Ogata (2010)

Para obter a resposta ao degrau unitário, cuja Transformada de Laplace é $1/s$, podemos substituí-la em $R(s)$ (Eq. 3), que resulta em:

$$C(s) = \frac{1}{Ts + 1s} \left(\frac{1}{s} \right) \quad (4)$$

Expandindo a Eq. 4 em frações parciais, obtemos:

$$C(s) = \frac{1}{s} - \frac{T}{Ts + 1} = \frac{1}{s} - \frac{T}{s + (1/T)} \quad (5)$$

Fazendo a transformada de Laplace inversa da Eq. 5, temos:

$$c(t) = 1 - e^{-t/T} \quad (6)$$

Sendo a Eq. 6 válida para $t \geq 0$. Essa equação mostra que inicialmente $c(t)$ será igual a zero e posteriormente se tornará unitária. Além disso, quanto menor a constante de tempo T , mais rápida será a resposta do sistema (OGATA, 2010). Derivando a Eq. 6 obtemos a inclinação da linha tangente em $t=0$:

$$\left. \frac{dc(t)}{dt} \right|_{t=0} = \left. \frac{1}{T} e^{-t/T} \right|_{t=0} = \frac{1}{T} \quad (7)$$

A curva exponencial de resposta $c(t)$ dada pela Eq. 6 é mostrada na Figura 5 em uma constante de tempo, a curva da resposta exponencial vai de 0% a 63,2% do valor final. O regime permanente é alcançado matematicamente apenas depois de um tempo infinito (OGATA, 2010).

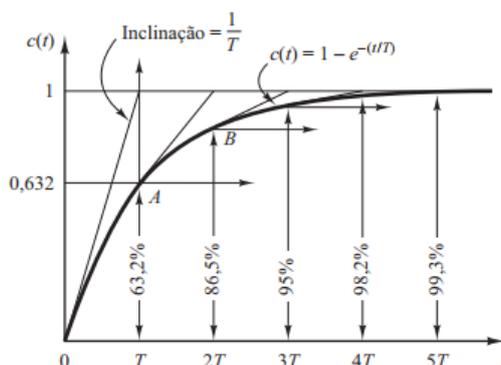


Figura 5 – Resposta ao degrau unitário
Fonte: Ogata (2010)

2.3 PWM

PWM (Pulse Width Modulation) consiste em pulsar um sinal digital modulando o ciclo de trabalho de uma onda quadrada. Pode ser aplicado no controle de motores, iluminação para variar tensão e a frequência do sinal. Microcontroladores podem gerar PWM codificando digitalmente níveis de sinal analógico e são amplamente utilizados por poderem trabalhar com entradas e saídas digitais. Nesse estudo, foram utilizados nos experimentos valores fixos de PWM para controlar a velocidade dos ventiladores no túnel de vento.

3. Materiais e Métodos

3.1 Obtenção dos dados do sensor e experimento

Para cada ensaio utilizou-se um valor fixo de PWM como entrada. Foram feitos três ensaios para cada valor estipulado de PWM, fixados em 50%, 70% e 90%. Em cada ensaio, a aquisição de dados foi feita em tempo real no software Terminal. utilizados três valores fixos de PWM como entradas: 50%, 70% e 90%. Para que o sensor (Figura 6) fornecesse em sua aferição uma resposta à um degrau, um anteparo foi colocado sobre ele e foi retirado rapidamente no começo de cada uma das leituras. Posteriormente, foram feitas três médias com os dados colhidos para os três valores de PWM. Essas médias foram utilizadas para traçar a resposta ao degrau para cada uma das entradas como pode ser visto na figura 7.

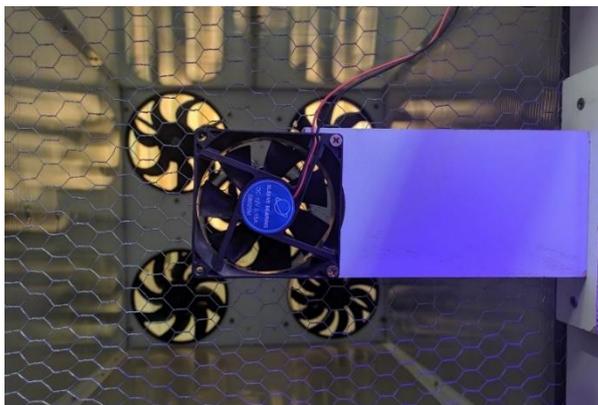


Figura 6 – Sensor

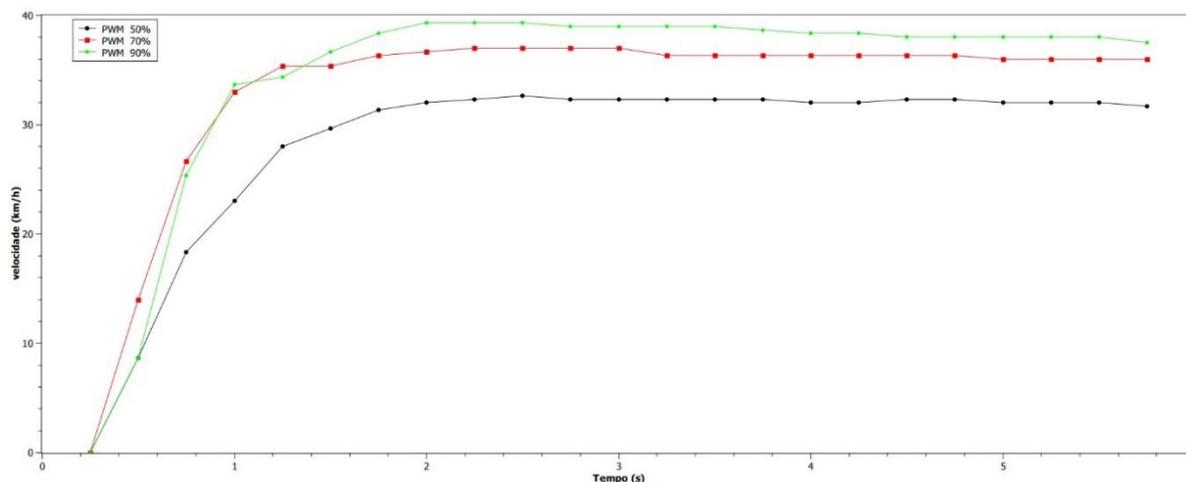


Figura 7 - Resposta ao degrau para valores fixos de PWM

3.1 Função transferência pelo MATLAB

Para validar a função transferência obtida experimentalmente, utilizou-se a função `ident` do MATLAB. Essa função requer os dados de entrada e de saída da função de transferência desejada, como também o número de polos e zeros. (MATHWORKS, 2019)

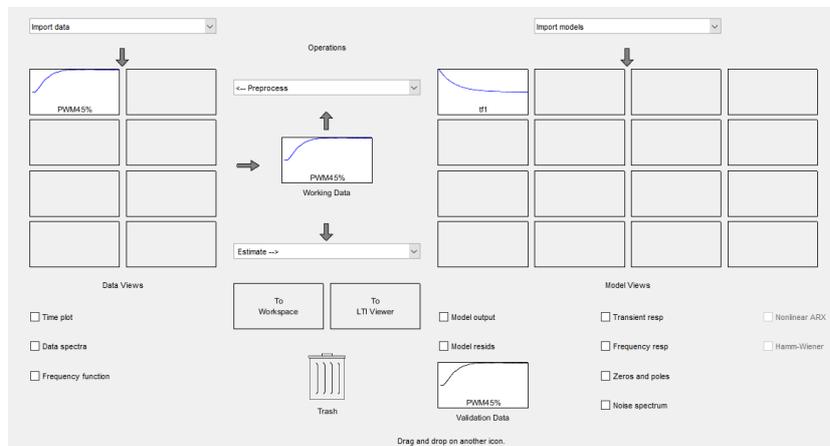


Figura 8 - Interface de parametrização da função `ident` no MATLAB

4. Resultados e Discussões

Nesta seção são apresentadas as respostas ao degrau para valores fixos de PWM. As funções de transferência obtidas no MATLAB para valores fixados de PWM de 50% (Eq. 8), 70% (Eq. 9) e 90% (Eq. 10) são mostradas respectivamente na sequência:

$$H_1(s) = \frac{3,585}{s^2 + 4,056s + 5,578} \quad (8)$$

$$H_2(s) = \frac{13,44}{s^2 + 10,09s + 25,83} \quad (9)$$

$$H_3(s) = \frac{45,73}{s^2 + 37,46s + 106,8} \quad (10)$$

A estimativa de ajuste para cada um dos casos é mostrada nas Figuras 9, 10 e 11. Para o PWM de 30%, o ajuste foi de 94,31%, para um PWM de 50% foi de 96,21% e para o PWM de 90% obteve-se 95,99% de ajuste.

As constantes presentes nas funções de transferência encontradas dependem da variável independente de PWM aplicada em cada caso. Portanto, para encontrar uma função única que represente com boa aproximação o comportamento do sensor para todos os valores de entrada é necessário estabelecer uma relação entre as variáveis independentes aplicadas (PWM) e as constantes presentes em $H_1(s)$, $H_2(s)$ e $H_3(s)$ (Equações 8, 9 e 10). As relações aproximadas encontradas via ajuste exponencial das curvas em Excel são:

$$Y_1(t) = 0,2357e^{0,0556t} \quad (11)$$

$$Y_2(t) = 0,1419e^{0,0738t} \quad (12)$$

$$Y_3(t) = 0,1511e^{0,0636t} \quad (13)$$

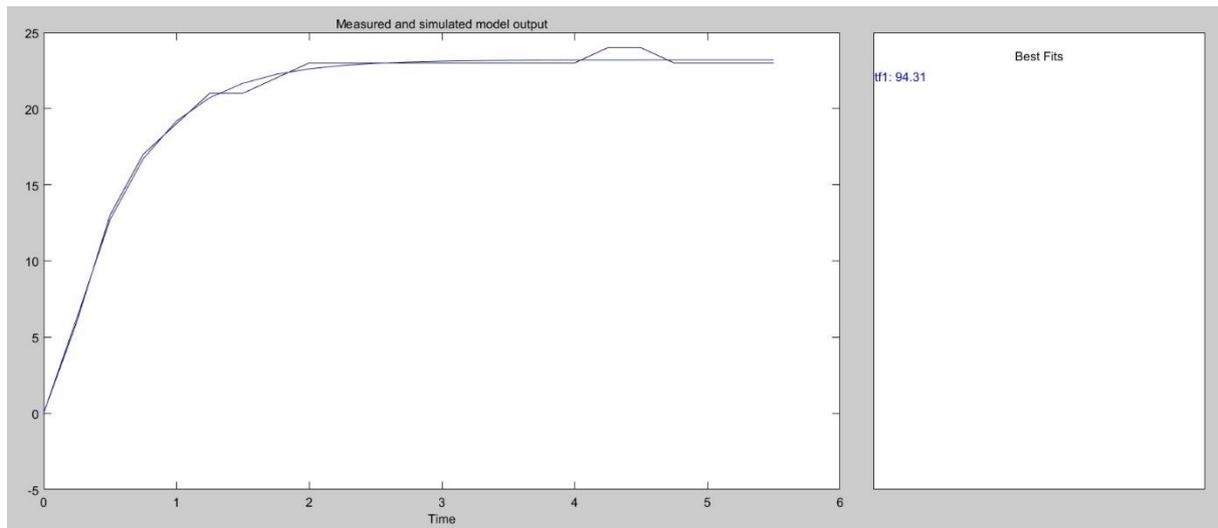


Figura 9 - Comparação entre a função real e a obtida pelo MATLAB para um PWM de 30%

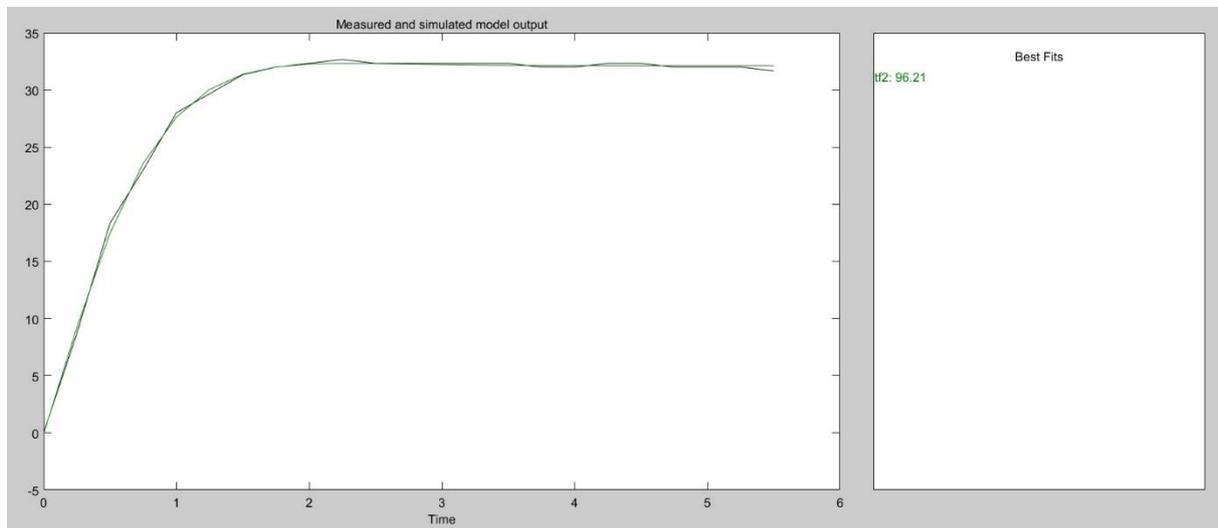


Figura 10 - Comparação entre a função real e a obtida pelo MATLAB para um PWM de 50%

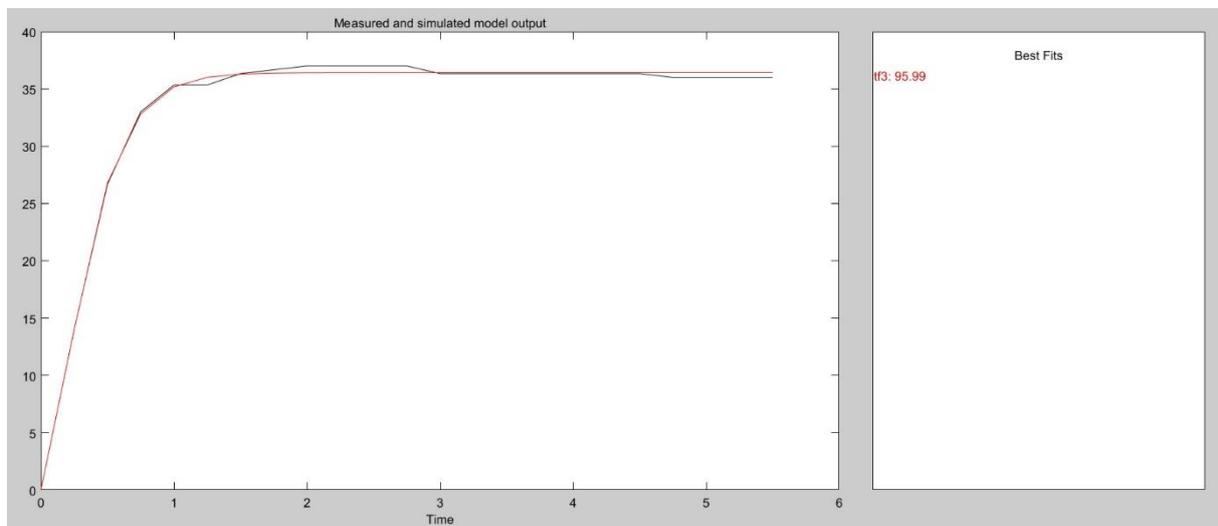


Figura 11 - Comparação entre a função real e a obtida pelo MATLAB para um PWM de 90%

Nas Figuras 12, 13 e 14 são apresentadas as curvas referentes Ajuste da relação entre a variável independente PWM e as constantes das equações (8), (9) e (10), respectivamente.

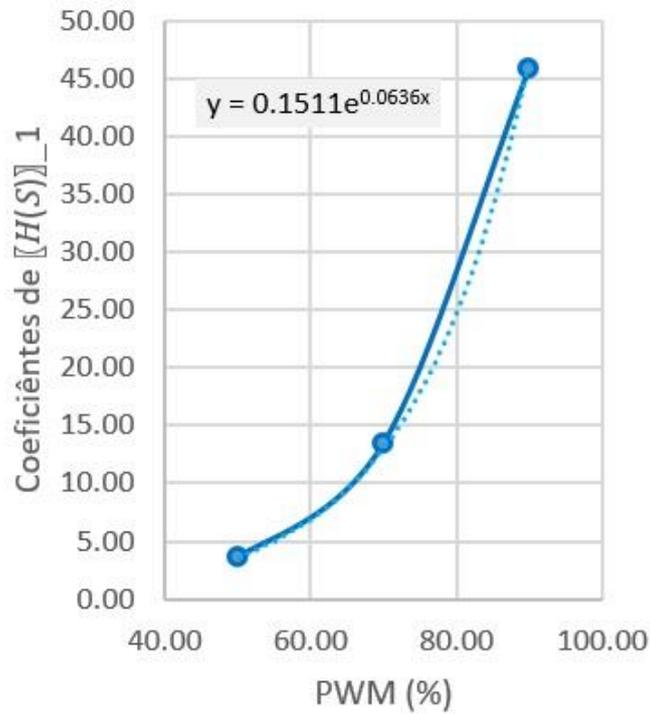


Figura 12 – Ajuste da relação entre a variável independente PWM e as constantes da Eq. 8

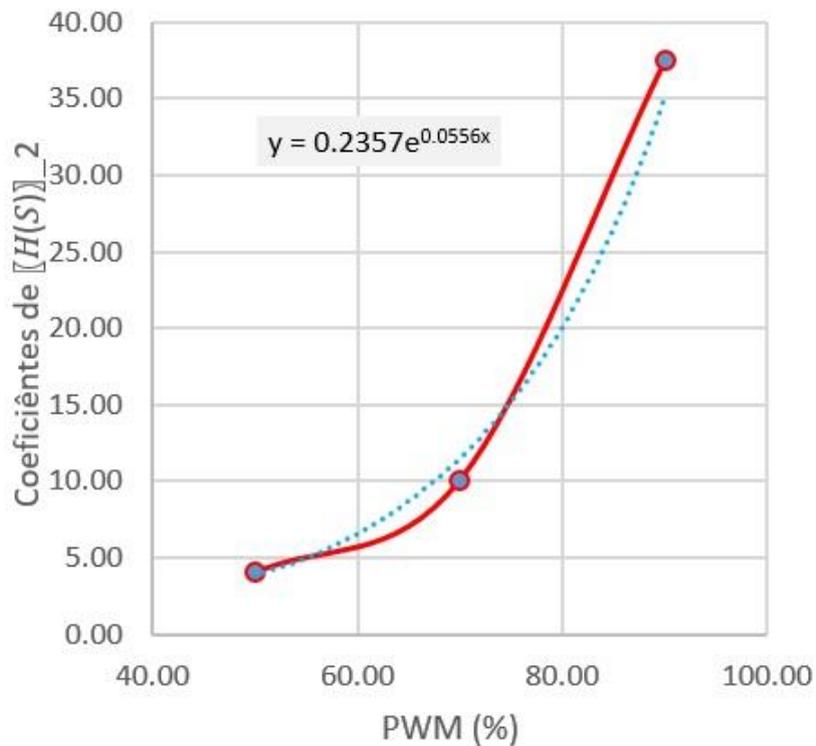


Figura 13 – Ajuste da relação entre a variável independente PWM e as constantes da Eq. 9

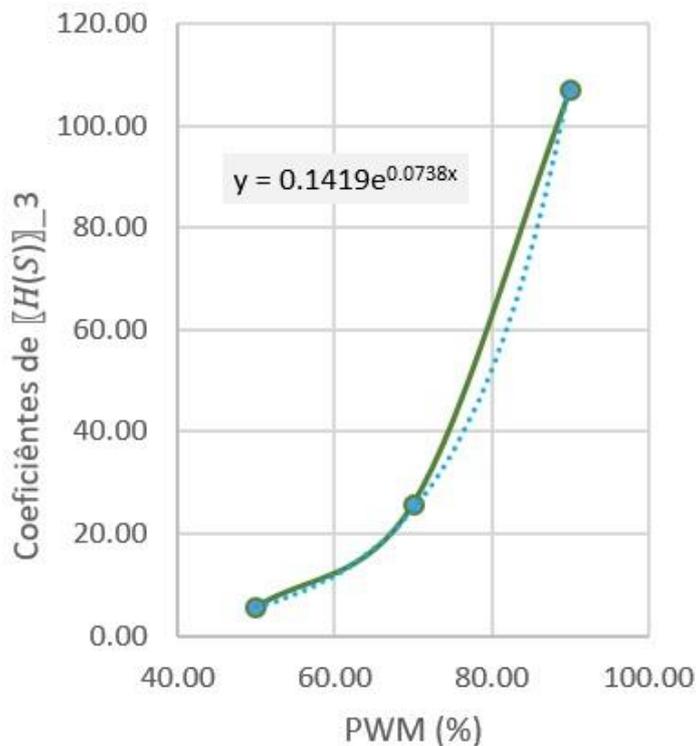


Figura 14 – Ajuste da relação entre a variável independente PWM e as constantes da Eq. 10

Os coeficientes das equações (11), (12) e (13) são, portanto, os coeficientes correspondentes na função de transferência unificada do sensor, uma vez que relacionam a variável independente da entrada (PWM) com os coeficientes encontrados nas funções de transferência de cada entrada. Dessa forma, a função de transferência que representa aproximadamente o comportamento do sensor será dada por:

$$H(s) = \frac{0,01511e^{0,00636t}}{s^2 + s(0,9893e^{0,0556t}) + 0,01419e^{0,0738t}} \quad (14)$$

Para as mesmas entradas de PWM, a resposta ao degrau da função de transferência (Eq. 14) é a mostrada na Figura 5, mostrando coerência com os dados experimentais (Figura 7).

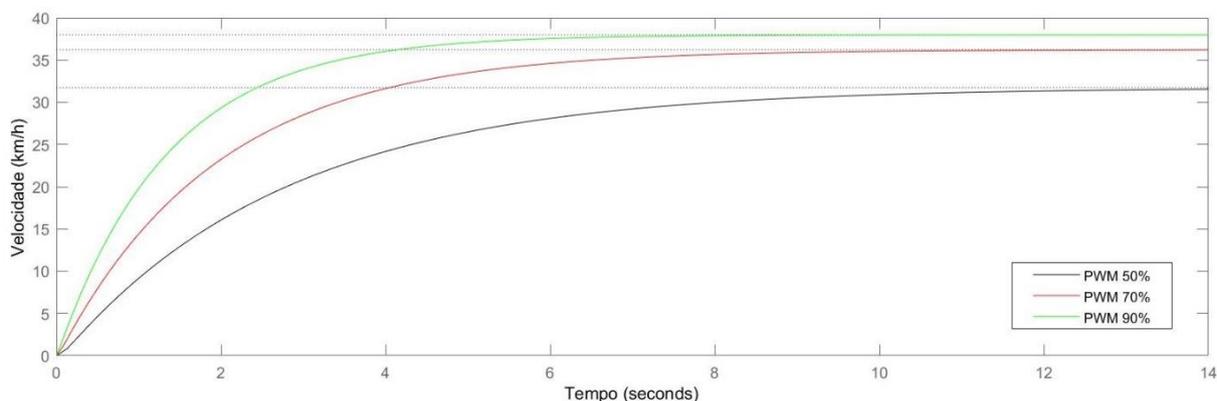


Figura 5 – Resposta ao degrau da função de transferência do sensor os valores fixados de PWM

5. Conclusões

Obter analiticamente um modelo fiel ao sistema analisado pode se tornar difícil na prática, podendo gerar uma equação diferencial de ordem muito elevada devido ao número de variáveis que interferem no sistema. Logo, encontrar um modelo aproximado do sistema empiricamente, utilizando softwares matemáticos é fundamental na caracterização de sistemas de interesse.

Analisando-se os resultados obtidos, a função de transferência encontrada mostrou-se adequada para caracterizar o comportamento do sensor, pois para os diferentes valores de entrada de PWM estabelecidos, a resposta ao degrau foi similar a obtida nos ensaios.

Referências

CARMINATTI, L; KONRATH, R. *Desenvolvimento de um túnel de vento subsônico com foco no ensino didático.* Disponível em: < <https://uceff.edu.br/anais/index.php/engmec/article/view/229> > Acesso em: 30 jun. 2019.

CARVALHO, A; ABILIO, C; SANTANA, L. *Sistema de fluxo de ar controlado em um túnel de vento Modelagem do sistema físico.* Disponível em: <https://www.academia.edu/20021589/Sistema_de_fluxo_de_ar_controlado_em_um_t%C3%BAnel_de_vento> Acesso em: 30 de julho de 2019.

IPT. *Ensaio aerodinâmicos de edificações, pontes, plataformas de petróleo, geradores eólicos, ventilação urbana e aerodinâmica dos esportes.* Disponível em: <http://www.ipt.br/centros_tecnologicos/CTMetro/laboratorios_e_sessoes/42-tunel_de_vento.htm> Acesso em: 30 jun. 2019.

MathWorks *System Identification Toolbox.* Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/ident/index.html;jsessionid=c63790a871f8e9a8481c2778feef>> Acesso em: 30 jun. 2019.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno.** 5. ed. São Paulo: Ed. Prentice Hall, 2014

SOUZA JUNIOR, D. P.; FERREIRA, G.G.F.; LETA, F. R. *Desenvolvimento de um túnel de vento compacto para simulações didáticas de projeto de engenharia mecânica..* Disponível em: <<http://www.petmec.uff.br/sites/default/files/downloads/CONEM2012-1824-tunel%20de%20vento.PDF>> Acesso em: 30 de julho de 2019.