

# CONTROLE PID ADAPTATIVO DE TEMPERATURA EM UM TÚNEL PSICROMÉTRICO

*Data da submissão: 03/10/2023*

*Data de aceite: 01/12/2023*

### **José Antonio Riul**

Universidade Federal da Paraíba,  
Centro de Tecnologia, Departamento de  
Engenharia Mecânica  
João Pessoa – Paraíba  
<http://lattes.cnpq.br/1577115832986997>

### **Paulo Henrique de Miranda Montenegro**

Universidade Federal da Paraíba,  
Centro de Tecnologia, Departamento de  
Engenharia Mecânica  
João Pessoa – Paraíba  
<http://lattes.cnpq.br/6068304104229234>

**RESUMO:** Este trabalho tem como objetivo o projeto de um controlador adaptativo para controle de temperatura em um túnel psicrométrico. O controle é realizado através de simulação, usando um modelo do túnel obtido com dados reais do sistema, através de estimação de parâmetros com o algoritmo dos mínimos quadrados recursivo. É projetado um controlador PID adaptativo de Dahlin para o controle de temperatura do túnel. Nesse projeto os parâmetros do túnel são estimados pelo algoritmo dos mínimos quadrados recursivo, usando como dados a variável de controle e a saída obtida do modelo do túnel. A partir

dos parâmetros estimados, obtém-se os parâmetros do controlador PID de Dahlin. O controlador é implementado através de um programa computacional e são mostrados como resultados as curvas da resposta do sistema sob ação do controlador adaptativo projetado e do erro entre a referência e a resposta do sistema.

**PALAVRAS-CHAVE:** Identificação de Sistemas, Controle Adaptativo, Túnel psicrométrico.

### ADAPTIVE TEMPERATURE PID CONTROL IN A PSYCHROMETRIC TUNNEL

**ABSTRACT:** This work aims to design an adaptive controller for temperature control in a psychrometric tunnel. The control is performed through simulation, using a tunnel model obtained with real data from the system, through parameter estimation with the recursive least squares algorithm. A Dahlin adaptive PID controller is designed for tunnel temperature control. In this project, the tunnel parameters are estimated by the recursive least squares algorithm, using the control variable and the output obtained from the tunnel model as data. From the estimated parameters, the parameters of

the Dahlin PID controller are obtained. The controller is implemented through a computer program and the results are shown as the output curves of the system under the action of the designed adaptive controller and the error between the reference and the system output.

**KEYWORDS:** Identification Systems, Adaptive Control, Psychrometric tunnel.

## 1 | INTRODUÇÃO

O objetivo do presente trabalho é o projeto de um controlador adaptativo de temperatura em um túnel psicrométrico. O equipamento é composto de um sistema de ventilação e de um sistema de refrigeração, que permite a adição ou retirada de calor de um fluxo variável de ar em deslocamento forçado no seu interior, possibilitando simular diversas condições atmosféricas de temperatura e de umidade. Um modelo do túnel obtido com dados reais captados do sistema em malha aberta, usando como entrada ou excitação a variação da velocidade da turbina, que gera a variação do fluxo de ar no túnel e como saída ou resposta a temperatura medida no conduto do túnel é usado para representar o sistema. O modelo foi obtido através de estimação de parâmetros com o algoritmo dos mínimos quadrados recursivo conforme Aguirre (2000).

A ação de controle adaptativo conforme Astrom & Wittenmark (1995), será realizada por um controlador auto-ajustável PID de Dahlin. (BEHAR E IRANZO, 2003) “Os controladores da família PID constituem cerca de 90% dos instalados atualmente na indústria”. No projeto do controlador os parâmetros do túnel são estimados pelo algoritmo dos mínimos quadrados recursivo, usando como dados a variável de controle e a saída obtida do modelo do túnel. Com os parâmetros estimados para o túnel, obtém-se os parâmetros do controlador PID de Dahlin e conseqüentemente a variável de controle. Com a variável de controle definida, um programa computacional é elaborado e simulações são realizadas, mostrando curvas da resposta do sistema sob ação do controlador adaptativo projetado e do erro entre a referência e a resposta do sistema.

## 2 | DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O túnel psicrométrico conforme Montenegro et al. (2006), como mostrado na Figura 1, é composto de um sistema de ventilação e de um sistema de refrigeração, é utilizado como protótipo para realização de controle de temperatura e de umidade. O projeto do equipamento é similar a de um túnel de vento de baixa velocidade. Foi construído em metal com seção transversal quadrada de 254 mm<sup>2</sup> de área, possui janelas removíveis que permitem acesso ao seu interior para adição de instrumentos, além dos já existentes. O equipamento também pode ser classificado como um túnel psicrométrico devido sua capacidade de simular diversos níveis de temperatura, de umidade e de velocidade do ar. Por conveniência o fabricante dividiu o equipamento em duas partes principais: a primeira é denominada sistema de ar e é composta pela turbina, pelos aquecedores de ar, pelos

umidificadores por vapor e pelos medidores de fluxo de ar. A segunda parte é denominada de sistema refrigerante e é composta por um compressor-condensador, um umidificador, e pelos controles e instrumentação.

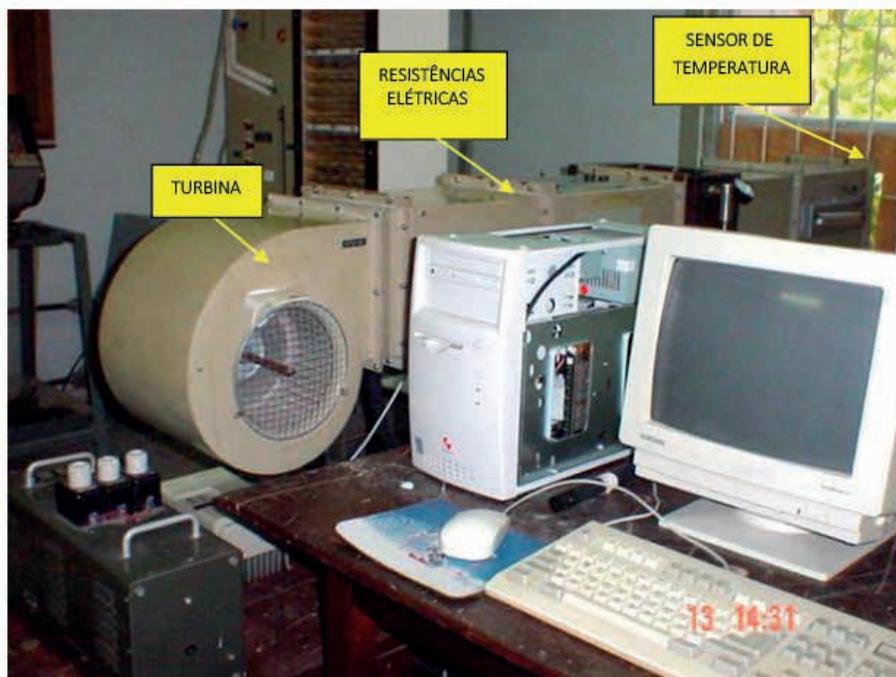


Figura 1. Túnel Psicrométrico.

Para realização do controle de temperatura, o túnel foi adaptado, sendo a turbina acionada por um motor de corrente contínua comandado por um computador. A turbina tem a função de gerar um fluxo variável de ar na temperatura ambiente e desloca-lo no interior do duto forçando sua passagem através dos dois conjuntos de resistências elétricas de 2 kw e 1 kw, originais do equipamento e que funcionam de maneira independente. Faz parte também do sistema um transdutor de temperatura instalado na extremidade de saída do duto. No sistema de ventilação, a turbina com velocidade variável é usada para fornecer um fluxo de ar objetivando alcançar a temperatura desejada. Um computador, uma placa de entrada e saída de dados e o programa computacional LabVIEW, são utilizados para coleta de dados oriundos do transdutor de temperatura, processamento, cálculo da variável de controle e envio da mesma para a turbina.

### 3 I CONTROLADOR AUTO-AJUSTÁVEL (STR)

O controlador auto-ajustável (STR) é um tipo de controlador adaptativo, que automatiza as tarefas de modelagem matemática, projeto e implementação da lei de

controle. O STR é explícito quando as tarefas de modelagem matemática, projeto e implementação da lei de controle são realizadas a partir dos parâmetros estimados da planta. No STR, os parâmetros estimados do sistema são determinados e atualizados, à cada período de amostragem, através do MQR. O diagrama de blocos de um STR explícito é apresentado na Figura 2. No diagrama de blocos destacam-se duas malhas fechadas. A malha inferior composta pelo sistema e pela realimentação de saída, e a superior composta pelo estimador de parâmetros, pelo projeto da lei de controle e pelo controlador ajustável. No STR os parâmetros estimados são considerados como se fossem os parâmetros reais do sistema. Esta abordagem é baseada no princípio da equivalência à certeza, conforme Hemerly (1996).

Controladores como: Proporcional Integral Derivativo (PID), Proporcional Integral (PI), Proporcional Derivativo (PD), de Variância Mínima (MV), de Variância Mínima Generalizado (GMV), Linear Quadrático Gaussiano (LQG) e Controlador Preditivo Generalizado (GPC), podem ser utilizados para o projeto da lei de controle.

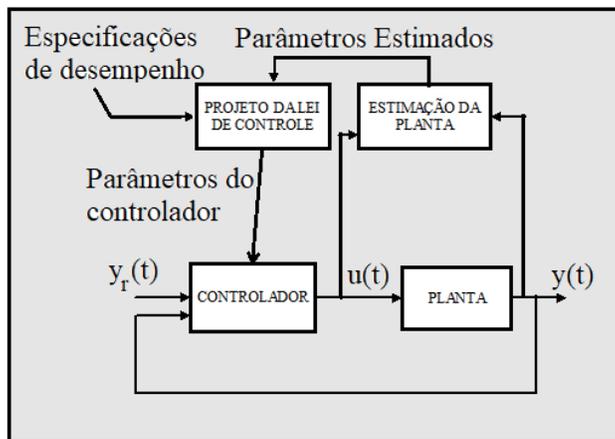


Figura 2. Diagrama de blocos do STR explícito.

A estimação dos parâmetros do sistema é a essência do STR. (AGUIRRE, 2000, LJUNG, 1987, HEMERLY, 1996, RÚBIO E SANCHÉZ, 1996 e COELHO E COELHO, 2004) “Dentre os algoritmos aplicáveis à esta tarefa cita-se o dos mínimos quadrados recursivo (MQR) com fator de esquecimento”. Os algoritmos recursivos usam as estimativas do vetor  $\theta(t)$ , previstas a partir dos instantes anteriores ao instante de tempo  $t$ , para obtenção das estimativas  $\theta(t+1)$ , conforme indica a Equação 1.

$$\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + \Delta\hat{\theta}(t+1) \quad (1)$$

Um modelo paramétrico quando utilizado para projeto de controladores não representa uma descrição complexa do sistema, mas deve descrever com grande precisão as características dinâmicas essenciais para o projeto do controlador. Diversos modelos

paramétricos podem ser utilizados para representar os sistemas, entre eles, o linear do tipo ARMAX, dado pela Equação 2.

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-d}B(z^{-1})u(t-1) + C(z^{-1})e(t) \quad (2)$$

onde:

$$z^{-1}y(t) = y(t-1) \quad (2.a)$$

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_{n_a}z^{-n_a} \quad (2.b)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_{n_b}z^{-n_b} \quad (2.c)$$

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1z^{-1} + c_2z^{-2} + \dots + c_{n_c}z^{-n_c} \quad (2.d)$$

$z^{-1}$ - operador atraso;

$u(t)$  e  $y(t)$ - são respectivamente o sinal de controle e a saída do sistema;

$A(z^{-1})$ ; denominador da função de transferência do sistema;

$B(z^{-1})$ ; numerador da função de transferência do sistema;

$C(z^{-1})$ ; numerador da função de transferência do filtro auto regressivo;

$e(t)$  - ruído branco de média nula;

$d$  - atraso de transporte do sistema;

$n_a, n_b, n_c$  - ordem dos polinômios A, B e C.

Com  $C(z^{-1})=1$ , o modelo ARMAX, resulta no modelo ARX, que pode ser escrito conforme o modelo de regressão linear mostrado na Equação 3.

$$y(t) = \phi^T(t-1)\theta + e(t) \quad (3)$$

onde:

$$\phi^T(t-1) = [-y(t-1), -y(t-2), \dots, -y(t-n_a), u(t-1), u(t-2), \dots, u(t-1-n_b)] \quad (3.a)$$

$$\theta^T = [a_1, a_2, \dots, a_{n_a}, b_0, b_1, \dots, b_{n_b}] \quad (3.b)$$

A estimação recursiva do vetor de parâmetros  $\theta^T$  é regida pelas Equações 4, 5 e 6.

$$\theta(t) = \theta(t-1) + K(t) [y(t) - \phi^T(t)\theta(t-1)] \quad (4)$$

$$K(t) = P(t-1)\phi(t) [I - \phi^T(t)P(t-1)\theta(t)]^{-1} \quad (5)$$

$$P(t) = \frac{P(t-1)}{\lambda e} [I - K(t)\phi^T(t)] \quad (6)$$

onde :

K(t)- ganho do estimador;

P(t)- matriz de covariância dos parâmetros estimados;

$\lambda e$  - fator de esquecimento;

I- matriz identidade.

No projeto do controlador PID de Dahlin, adota-se o o modelo ARX , obtido a partir da Equação 2, e mostrado na Equação 7.

$$y(t) = y_u(t) + n(t) = \frac{z^{-d}B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(t-1) + \frac{1}{A(z^{-1})} e(t) \quad (7)$$

onde:

$y_u(t)$  – modelo do sistema;

$n(t)$  – modelo da perturbação.

#### 4 I CONTROLADOR PID DE DAHLIN

A Equação 8 mostra a (COELHO E COELHO, 2004) “representação da ação de controle do controlador PID”.

$$G_c(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{1}{G_p(z)} \frac{[y(t)/y_r(t)]}{[1-y(t)/y_r(t)]} \quad (8)$$

onde:  $G_p(z)$  é a função de transferência do sistema,  $G_c(z)$  é a função de transferência do controlador,  $y(t)$  é a saída do sistema,  $y_r(t)$  é a referência,  $U(z)$  é a variável de controle e  $E(z)$  é o erro de saída do sistema.

A proposta de projeto do controlador Dahlin conforme Coelho et al. (2019) , considera que o sistema em malha fechada, se comporta como de primeira ordem e com atraso de transporte, conforme Equação 9.

$$G_c(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{1}{G_p(z)} \frac{[(1-p_1)z^{-(d+1)}]}{[1-p_1z^{-1} - (1-p_1)z^{-(d+1)}]} \quad (9)$$

onde:  $d$  é o atraso de transporte.

O túnel é representado pela função de transferência discreta de segunda ordem dada pela Equação 10.

$$G_p(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{z^{-(d+1)}(b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2})}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2}} \quad (10)$$

Substituindo Equação 10 na Equação 9, obtém-se a Equação 11 do controlador.

$$G_c(z) = \frac{(1+a_1z^{-1}+a_2z^{-2})}{(b_0+b_1z^{-1}+b_2z^{-2})} \frac{(1-p_1)}{[1-p_1z^{-1}-(1-p_1)z^{-(d+1)}]} \quad (11)$$

Dahlin considera o controlador PID na forma ideal conforme Equação 12.

$$G_c(z) = k_c \left[ \frac{(1+T_s/T_i+T_d/T_s) - (1+2T_d/T_s)z^{-1} + (T_d/T_s)z^{-2}}{(1-z^{-1})} \right] \quad (12)$$

Na Equação 11 e na Equação 12, tem-se os parâmetros conforme Equações 13 à 17.

$$k_c = -\bar{k}(a_1 + 2a_2) \quad (13)$$

$$\bar{k} = \frac{(1-p_1)}{(b_0+b_1+b_2)[1+d(1-p_1)]} \quad (14)$$

$$p_1 = e^{\frac{-T_s}{\tau_{MF}}} \quad (15)$$

$$T_i = \frac{-(a_1 + 2a_2)T_s}{(1+a_1+2a_2)} \quad (16)$$

$$T_d = \frac{-a_2T_s}{(a_1+2a_2)} \quad (17)$$

onde:

$T_s$  - tempo de amostragem;

$\tau_{MF}$  - constante de tempo desejada em malha fechada.

A Equação 12 representa o controlador PID na forma discreta, e a equação a diferenças que descreve o comportamento da variável de controle do sistema  $u(t)$  é dada pela Equação 18.

$$u(t) = q_0e(t) + q_1e(t-1) + q_2e(t-2) \quad (18)$$

onde:

$$q_0 = k_c(1+T_s/T_i+T_d/T_s) \quad (19)$$

$$q_1 = -k_c(1+2T_d/T_s) \quad (20)$$

$$q_2 = k_c (T_d / T_s) \quad (21)$$

## 5 | RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados a seguir foram obtidos através de simulação usando um programa computacional gerado no Matlab, usando: a Equação 22 que é o modelo do túnel em malha aberta, que representa o sistema real, o algoritmo MQR para estimar os parâmetros necessários à obtenção da variável de controle, a Equação 18 para implementação da variável de controle e as referências. Como especificações de desempenho usou-se: sobresinal máximo de 20 % e erro em regime permanente de 2 %.

$$y(t) = 0,64*y(t-1) + 0,30*y(t-2) + 0,02*u(t-3) + 0,01*u(t-4) \quad (22)$$

A Figura 3 mostra a resposta simulada da temperatura do túnel, sob ação do controlador adaptativo PID de Dahlin projetado, para uma referência degrau de 80 °C com tempo de amostragem  $T_s = 0,2$  segundo. O programa é iniciado com valores nulos para os parâmetros estimados do túnel nas 7 amostras iniciais, que corresponde a 1,4 segundo. Nesse intervalo de tempo um controlador convencional proporcional é usado para que o controlador adaptativo comece a atuar com valores dos parâmetros estimados diferentes de zero. A temperatura do túnel no início do processo era de 25 °C e com 15 seg o regime permanente é alcançado com 0,5 °C de erro, que corresponde a um valor menor que 2 % e sem sobresinal. A resposta estimada apresenta erro em relação à simulada apenas no início do processo.

A Figura 4 mostra o erro entre a referência degrau de 80 °C e a resposta simulada. Após 15 segundos do início do processo, o erro é praticamente nulo.

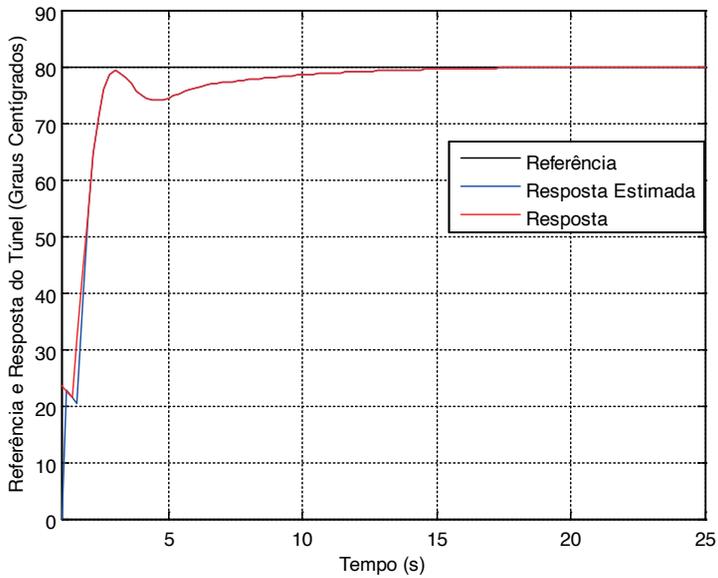


Figura 3. Resposta do túnel sob ação do controlador PID para a referência degrau.

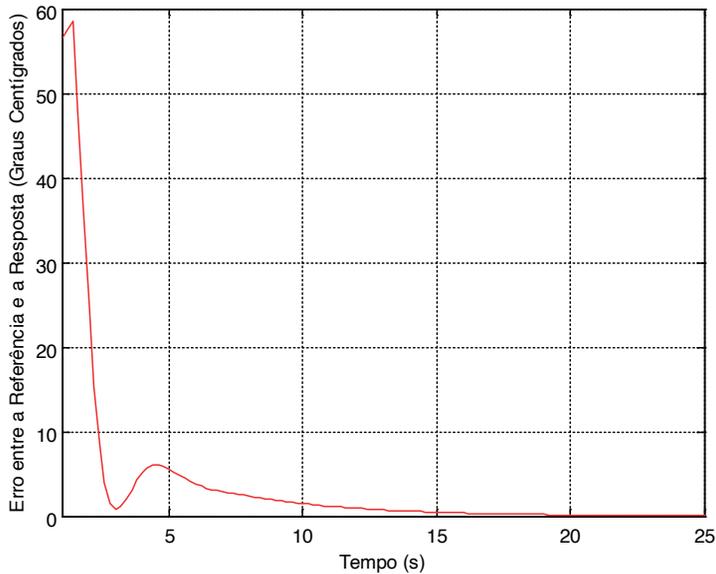


Figura 4. Erro da resposta do túnel sob ação do controlador PID.

A Figura 5 mostra os parâmetros estimados do túnel e observa-se que seus valores se aproximam daqueles do modelo do túnel rapidamente.

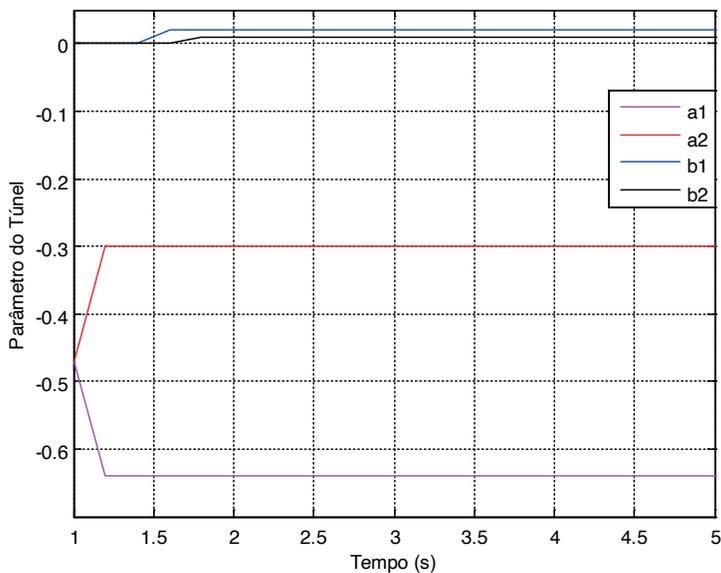


Figura 5. Parâmetros estimados do túnel sob ação do controlador PID.

A Figura 6 mostra as respostas simulada e estimada da temperatura do túnel, sob ação do controlador adaptativo PID de Dahlin projetado, para uma referência sequência de degraus variando-se o intervalo de tempo e a amplitude dos degraus.

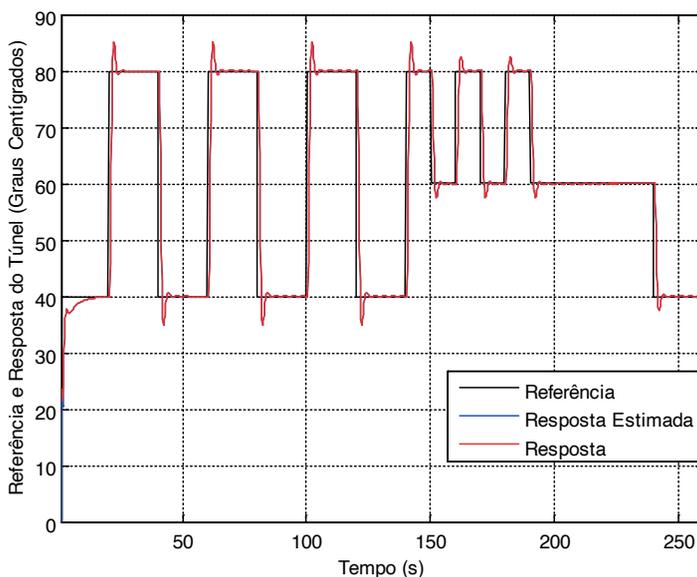


Figura 6. Resposta do túnel sob ação do controlador PID para a referência sequência de degraus.

Observa-se sobressinais máximos de 6,5 % em  $t = 62,2, 102,2$  e  $142,2$  segundos e regime permanente com erro menor que 2 % após 1 segundo de cada tempo anteriormente citado. A Figura 7 mostra o erro da resposta do túnel sob ação do controlador PID para a referência sequência de degraus. Para essa referência nota-se picos nos valores do erro que ocorrem nas variações dos valores da referência de  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  para  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  instantaneamente, enquanto que a resposta do túnel não ocorre dessa forma, como mostra a Figura 6.

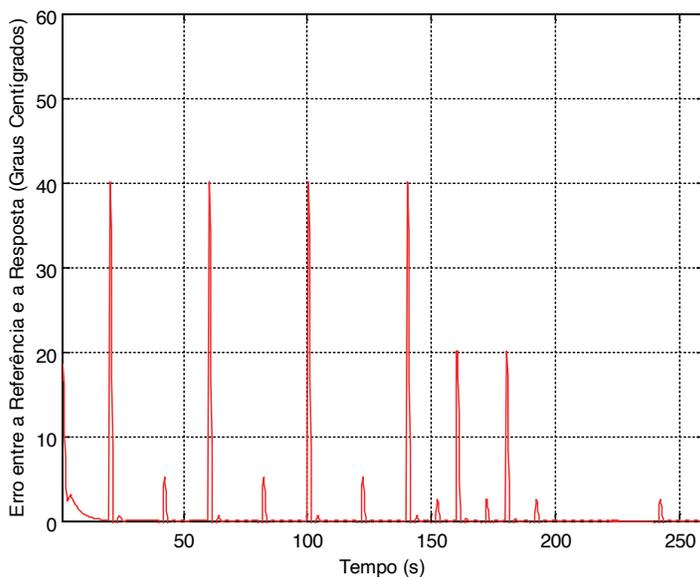


Figura 7. Erro da resposta do túnel sob ação do controlador PID para a referência sequência de degraus.

## 6 | CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o projeto e implementação do controlador PID adaptativo de Dahlin, para um túnel psicrométrico. Foram mostrados resultados de simulações, utilizando um modelo do túnel. A resposta do túnel sob ação do controlador para a referência degrau, não apresentou sobressinal e o regime permanente foi atingido em 15 segundos com erro menor que 2 %. Na simulação usando referência uma sequência de degraus observou-se sobressinais máximos de 6,5 % em 3 patamares e o regime permanente foi atingido 1 segundo após cada sobressinal, com erro menor que 2 %. Diante dos resultados obtidos conclui-se que o controlador PID adaptativo de Dahlin é satisfatório para aplicações no túnel psicrométrico.

## REFERÊNCIAS

AGUIRRE, L. A. **Introdução à identificação de sistemas: Técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais**. UFMG, 2ª Edição, Belo Horizonte, MG, 2000.

ASTROM, K. J. & WITTENMARK, B. **Adaptive Control**. Editora Addison Wesley, 2ª edição, London, 1995.

BEHAR, A. A. e IRANZO, M.M. **Identificación y Control Adaptativo**. Ed. Prentice Hall 1ª edição, Madri, 2003.

COELHO, A.A.R., COELHO, L.S. **Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares**. Editora da Universidade Federal de Santa Catarina, 1ª edição, Florianópolis, 2004.

COELHO, A.A.R., JERONYMO, D.C., ARAÚJO, R.B. **Sistemas Dinâmicos Controle Clássico e Preditivo Discreto Lineares**. Editora da Universidade Federal de Santa Catarina, 1ª edição, Florianópolis, 2019.

HEMERLY, E. M. **Controle por Computador de Sistemas Dinâmicos**. Ed. Edgard Blucher, Ltda, S. Paulo, Brasil, 1996.

LJUNG, L. **System Identification: Theory for the User**. Ed. Prentice – Hall Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, 1987.

MONTENEGRO, P.H.M.; RIUL, J.A.; OLIVEIRA, B.S.; SILVA, S.A. Controladores Adaptativos de Temperatura em um Túnel Psicrométrico. **SBA. Sociedade Brasileira de Automática**, v. 17, p.257 - 264, 2006.

RÚBIO, F.R & SÁNCHEZ, M. J. L. **Control Adaptativo y Robusto**. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla, Espanha, 1996.