

Projeto de um Controlador PI Robusto Aplicado a um Sistema Térmico

Vanessa de Souza de Oliveira, Márcia Lissandra Machado Prado

Departamento de Tecnologia, Universidade Estadual de Feira de Santana, BA,
(*vanessasouzaoliveira1@gmail.com, marcia.lissandra@gmail.com*)

Abstract: This paper presents the design of a robust PI controller for a building automation thermal system. The objective of this work is to designing a controller that, when introduced in the system, keeps it stable and with desirable characteristics even with small variations in the parameters of the plant. The robust controller design was successfully carried out and through simulations, a behavior that meets the design specifications is observed, even with variations in plant parameters and the control signal remained at adequate values

Resumo: Este artigo apresenta o projeto de um controlador PI robusto para um sistema térmico de automação predial. O objetivo deste trabalho é projetar um controlador que ao ser introduzido no sistema o mantenha estável e com características desejáveis mesmo com pequenas variações nos parâmetros da planta. O projeto do controlador robusto foi realizado com sucesso, e através de simulações observa-se um comportamento que atende às especificações de projeto mesmo com variações de parâmetros da planta e o sinal de controle se manteve em valores adequados.

Keywords: Control Theory; Thermal System; PI Controller; Robust Control; Modal Interval Analysis.

Palavras-chaves: Teoria de Controle; Sistema Térmico; Controle PI; Controle Robusto; Análise Intervalar Modal.

1. INTRODUÇÃO

A temperatura é uma das grandezas mais medidas e controladas em todo o mundo, tanto na climatização de ambientes, tais como residências, prédios e hospitais, quanto em indústrias como fornos, estufas e reatores. Seu valor muitas vezes determina a qualidade de um produto, a eficiência de um processo ou bem estar de um ambiente (Sousa, 2001). Por isso se torna tão importante medir e controlar essa grandeza.

Os sistemas térmicos são aqueles que envolvem a transferência de calor entre substâncias por meio de três diferentes formas: condução, convecção e radiação (Ogata, 2010). Estes sistemas podem ser empregados na melhoria do conforto térmico em ambientes prediais e, neste caso, uma dificuldade encontrada é a grande quantidade de parâmetros que definem o comportamento térmico dos materiais do prédio e sua interação com o ar na sala e as variáveis climáticas externas, tornando a abordagem bastante complexa para uma aplicação prática (Oliveira, 2010).

Além da grande quantidade de parâmetros, na prática, nestes sistemas a saída não começará a responder a uma entrada antes de transcorrer o atraso (Prado, 2000). Normalmente, estes atrasos são pequenos, podendo ser desprezados. No entanto, alguns se mostram significativos, da

ordem de minutos, acarretando divergências na representação do sistema caso não sejam considerados (Prado, 2000).

Em teoria de controle, diversos tipos de controladores são disponibilizados, tais como controladores proporcionais, derivativos e integrais e por realimentação de estados (Ogata, 2010). Além de um sistema de controle com um desempenho mais adequado, pode-se obter o controlador robusto, em que mesmo que o sistema varie seus parâmetros ou sofra perturbações, o sistema de controle responda de maneira satisfatória (Prado, 2006).

Neste artigo é apresentado o projeto de um controlador proporcional e integral (PI) robusto para um sistema térmico de automação predial através da análise intervalar modal, descrita em Prado (2006) para o controle de um sistema térmico predial.

Este artigo está subdividido da seguinte forma: Seção 2: Está descrita a fundamentação teórica em relação ao controlador PI e análise intervalar modal; Seção 3: É apresentado o sistema térmico estudado e o projeto do controlador PI robusto para esse sistema; Seção 4: São apresentados os resultados obtidos; Seção 5: São apresentadas as conclusões e considerações finais deste trabalho.

2. CONTROLE ROBUSTO PI E ANÁLISE INTERVALAR MODAL

Nesta seção serão descritos alguns conceitos utilizados no trabalho em relação ao controlador proporcional e integral (PI) e ao uso dos intervalos modais.

* Agradecemos a CNPq pelo suporte financeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

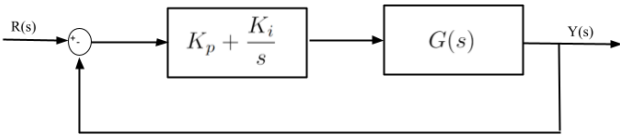


Figura 1. Diagrama de blocos do sistema com controlador PI

2.1 Controlador PI

O controlador consiste em um bloco após um ponto de soma, onde os sinais de entrada e saída são comparados, resultando em um sinal de erro que é entrada para dispositivos de controle que determinam a ação de controle na entrada da planta (Bezerra, 2007).

O controlador pode ser entendido como um dispositivo que realiza determinadas operações matemáticas sobre o sinal de erro $e(t)$, a fim de gerar um sinal $u(t)$ a ser aplicado à planta com o intuito de atender a um determinado objetivo. Estas operações matemáticas constituem o que se chama de ações de controle (Bezerra, 2007).

O sinal de controle do controlador PI (proporcional e integral) é gerado pela soma de dois termos (ações de controle), proporcional e integral (Vieira and Wyant, 2007), como mostra a equação (1).

$$G_{PI}(t) = K_p e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \quad (1)$$

O primeiro termo da equação (1) representa a ação de controle proporcional que é utilizada nos casos em que é requerida uma ação mais suave. A constante K_p é denominada de ganho proporcional e nesse tipo de controle, a saída (sinal de controle) é proporcional à entrada (sinal de erro). E o controlador consiste em um amplificador com ganho ajustável (Bezerra, 2007).

O segundo termo da equação (1) representa a ação de controle integral, em que o valor de saída do controlador é modificado de forma proporcional à integral do sinal de erro atuante $e(t)$ (Ogata, 2010). A constante T_i é o tempo integral e a ação de controle integral leva em conta a soma de todos os erros. Desse modo, essa ação garante que não haja erro em regime. Mas, apesar de acabar com erro de regime, a ação integral diminui a estabilidade do sistema tendendo a gerar sobressinal (Vieira and Wyant, 2007).

O diagrama de blocos de um sistema com controlador PI é representado na Figura 1. Sendo $R(s)$ o valor de entrada (referência) e $Y(s)$ a saída controlada do sistema.

Multiplicando a função de transferência da planta $G(s)$ e do controlador $C(s)$ (equação (2)), têm-se a função de transferência do sistema em malha aberta representada na equação (3).

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (2)$$

$$G_1(s) = G(s)C(s) \quad (3)$$

A partir da equação (4), pode-se obter a função de transferência em malha fechada do sistema.

$$T(s) = \frac{G_1(s)}{1 + G_1(s)} \quad (4)$$

Como o controlador integral insere um pólo no sistema, ao fazer a alocação de pólos é necessário multiplicar o polinômio característico por um ou mais pólos que não interfiram na estabilidade, nem deixem o sistema mais lento.

2.2 Análise Intervalar Modal

Um intervalo modal é definido como um par formado por um intervalo clássico $[x]'$ e um quantificador $Q[x]$ (Prado, 2006):

$$[x] := ([x]', Q[x])$$

O intervalo clássico é um conjunto de valores numéricos x que se encontram entre a e b e opera com intervalos em vez de números (M. A. Sainz and L. J. J. V. a. Remei Calm, 2014).

$$I(\mathbb{R}) = \{[a, b] | a, b \in \mathbb{R}, a \leq b\}$$

Os quantificadores são operadores que indicam a modalidade de um intervalo. A modalidade de um intervalo pode ser (Prado, 2006):

- Existencial, existe um $x \in [x]'$, com $Q[x] = E$
- Universal, para todo $x \in [x]'$, com $Q[x] = U$

Os predicados são condições que podem ser relacionadas a um intervalo. Utiliza-se uma notação especial para relacionar os quantificadores aos predicados (Prado, 2006):

- $E(x, [a]')P(x)$ significa: Existe um $x \in [a]'$ tal que o predicado $P(x)$ é satisfeito.
- $U(x, [a]')P(x)$ significa: Para todo $x \in [a]'$ o predicado $P(x)$ é satisfeito.

O conjunto dos intervalos modais é representado por:

$$I^*(\mathbb{R}) := \{([x]', E, U) | [x]' \in I(\mathbb{R})\}$$

As coordenadas modais de um intervalo modal são seu intervalo clássico e sua modalidade (Prado, 2006).

Dado $[a] = ([a]', Q[a]) \in I^*(\mathbb{R})$, então:

$$\begin{aligned} \text{ext}([a]', Q[a]) &:= [a]' \\ \text{mod}([a]', Q[a]) &:= Q[a] \end{aligned}$$

As coordenadas canônicas dos intervalos modais são intervalos definidos por (Prado, 2006):

$$\text{inf}([a]) = \begin{cases} \min(\text{ext}([a])) & \text{se } \text{mod}([a]) = E \\ \max(\text{ext}([a])) & \text{se } \text{mod}([a]) = U \end{cases}$$

$$\text{sup}([a]) = \begin{cases} \max(\text{ext}([a])) & \text{se } \text{mod}([a]) = E \\ \min(\text{ext}([a])) & \text{se } \text{mod}([a]) = U \end{cases}$$

A notação canônica de intervalos modais é introduzida pela definição (Prado, 2006):

$$[a] = \begin{cases} ([\underline{a}, \bar{a}]', E) & \text{se } \underline{a} \leq \bar{a} \\ ([\bar{a}, \underline{a}]', U) & \text{se } \underline{a} \geq \bar{a} \end{cases}$$

Os intervalos modais podem ser classificados como intervalos próprios, impróprios ou pontuais como definem as equações (5), (6) e (7) respectivamente.

$$Ie(\mathbb{R}) = \{[a] \in I^*(\mathbb{R}) | \underline{a} \leq \bar{a}\} \quad (5)$$

$$Iu(\mathbb{R}) = \{[a] \in I^*(\mathbb{R}) | \underline{a} \geq \bar{a}\} \quad (6)$$

$$Ip(\mathbb{R}) = \{[a] \in I^*(\mathbb{R}) | \underline{a} = \bar{a}\} \quad (7)$$

As operações aritméticas intervalares modais são detalhadas em (Prado, 2006).

2.3 Extensões Intervalares Semânticas Modais

Definição 1 Considere a função f contínua de \mathbb{R}^n em \mathbb{R} , $[a] \in I^*(\mathbb{R}^n)$, e (a_p, a_i) , componentes de separação de $[a] = (a_p, [a_i])$, com $[a_p]$ um subvetor contendo as componentes próprias de $[a]$ e $[a_i]$ um subvetor contendo as componentes impróprias de $[a]$. Definem-se as extensões intervalares semânticas modais f^* e f^{**} pela equações (8) e (9) respectivamente (Prado, 2006).

$$f^*([a]) = \left[\min_{a_p \in [a_p]'} \left\{ \max_{a_i \in [a_i]'} f(a_p, a_i) \right\}, \max_{a_p \in [a_p]'} \left\{ \min_{a_i \in [a_i]'} f(a_p, a_i) \right\} \right] \quad (8)$$

$$f^{**}([a]) = \left[\max_{a_i \in [a_i]'} \left\{ \min_{a_p \in [a_p]'} f(a_p, a_i) \right\}, \min_{a_i \in [a_i]'} \left\{ \max_{a_p \in [a_p]'} f(a_p, a_i) \right\} \right] \quad (9)$$

Uma função f é dita unimodal em um intervalo $[a]$ se for totalmente monótona em todo o intervalo $[a]$, ou seja, se f for totalmente crescente ou decrescente em $[a]$ (Prado, 2006). Quando a função for unimodal, suas extensões são iguais. Além disso, se $[a]$ é um intervalo próprio, f^* é a imagem de f no domínio $[a]'$ (Prado, 2006).

Para utilizar as extensões intervalares semânticas f^* e f^{**} com o objetivo de obter um significado em relação aos resultados, são utilizados os teoremas semânticos.

Teorema 1 (Teorema Semântico para f^*) Se $[a] \in I^*(\mathbb{R}^n)$, f é contínua em $[a]'$ e $F([a]) \in I^*(\mathbb{R})$, então $f^*([a]) \subseteq F([a])$ se e somente se (Prado, 2006):

$$U(a_p, [a_p]')Q(z, F([a]))E(a_i, [a_i]')(z = f(a_p, a_i)) \quad (10)$$

Teorema 2 (Teorema Semântico para f^{**}) Se $[a] \in I^*(\mathbb{R}^n)$, f é contínua em $[a]'$ e $F([a]) \in I^*(\mathbb{R})$, então $f^{**}([a]) \supseteq F([a])$ se e somente se (Prado, 2006):

$$U(a_i, [a_i]')Q(z, Dual(F([a])))E(a_p, [a_p]')(z = f(a_p, a_i)) \quad (11)$$

Os Teoremas 1 e 2 estabelecem condições gerais para extensões $F : I^*(\mathbb{R}^n) \rightarrow I^*(\mathbb{R})$ em termos das semânticas $f^*([a])$ ou $f^{**}([a])$, mas não indicam como elas são calculadas (Prado and Paz, 2008). Os procedimentos para calcular as extensões intervalares serão fornecidos por extensões racionais modais de funções contínuas racionais, sempre

que estas obedeçam certas condições sintáticas que as qualifiquem como cálculos arredondados internos e externos das funções $f^*([a])$ ou $f^{**}([a])$ associadas (Prado, 2006).

2.4 Extensões Racionais Modais

Definição 2 Seja a função f , contínua e racional no domínio $[a]'$. A extensão definida pela sequência de operações indicada pela sintaxe de f é chamada de extensão racional modal, $fR([x])$ (Prado, 2006).

Existem alguns resultados relacionando a extensão intervalar racional modal $fR([a])$ às extensões semânticas f^* e f^{**} , estes que são demonstrados pelos Teoremas 3 e 4.

Teorema 3 Se em $fR([a])$ todos os argumentos forem uniincidentes (Prado, 2006), então,

$$f^*([a]) \subseteq fR([a]) \subseteq f^{**}([a]) \quad (12)$$

Se todos os componentes, além de uniincidentes, também tiverem a mesma modalidade (Prado, 2006):

$$f^*([a]) = fR([a]) = f^{**}([a]) \quad (13)$$

Teorema 4 Seja $[a]$ um vetor intervalar, fR definida no domínio $[a]'$ e totalmente monótona para todos os seus componentes multiincidentes. Seja $[ad]$ o vetor estendido de $[a]$, tal que cada incidência de todo componente multiincidente seja incluído em $[ad]$ como um componente independente, mas transformado em seu dual se o correspondente ponto incidente tiver monotonicidade no sentido contrário ao seu global do correspondente componente de $[a]$ (Prado, 2006). Então:

$$f^*([a]) = fR([ad]) = f^{**}([a]) \quad (14)$$

Definição 3 Uma incidência de uma variável com relação a uma função é considerada isotônica, se sua derivada parcial for positiva. Caso contrário, a incidência é considerada anti-tônica (Prado, 2006).

Se uma função não é totalmente monótona com relação a todas as suas variáveis multiincidentes, outros resultados fornecem significado semântico aos cálculos racionais (Prado, 2006).

3. PROJETO DO CONTROLADOR PI

Nesta seção serão descritos os procedimentos e as metodologias adotadas no projeto do controlador PI robusto para uma planta de um sistema térmico. Inicialmente será apresentado o sistema estudado e posteriormente o projeto do controlador robusto por análise intervalar modal.

3.1 Sistema Térmico

O controle de temperatura pode ser aplicado a sistemas de ar-condicionado e processos de fabricação com aquecimento ou resfriamento de determinada substância (Filho, 2010).

O sistema a ser controlado se refere a um ambiente predial que é representado pela Figura 2. Nela é representada a

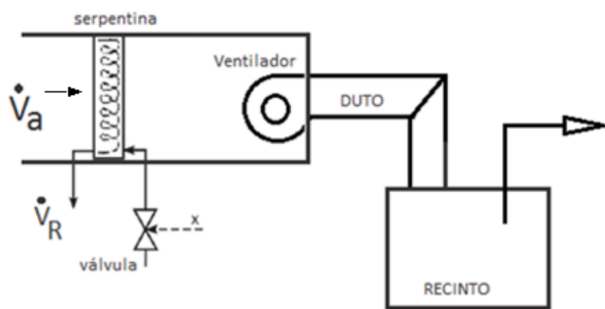


Figura 2. Sistematização do ambiente da identificação

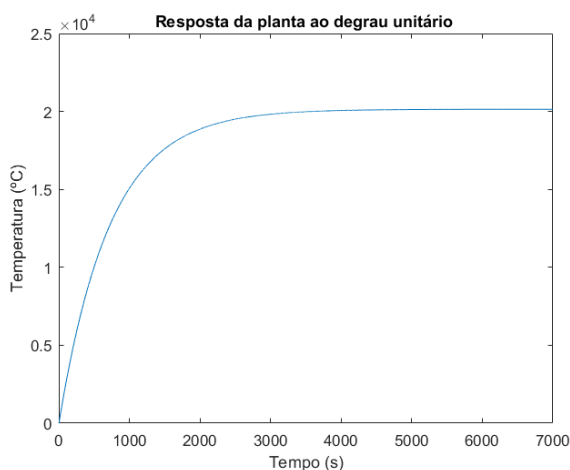


Figura 3. Resposta ao degrau unitário

serpentina, a válvula e o ventilador do ar condicionado, assim como o duto pelo qual o ambiente é refrigerado.

O sistema teve sua identificação feita por Lucena (2017) e tem como função de transferência a equação (15). Para a dedução da função da planta cada um dos equipamentos (válvula, serpentina, duto e recinto) é tratado separadamente e então adicionado linearmente à equação (15). A temperatura do recinto é medida por um sensor e um sinal é recebido pela válvula, que vai alterando o fluxo do ar refrigerante (Lucena, 2017). A variável de entrada da planta corresponde a uma tensão (que vai alterar o fluxo de ar através da válvula) e a variável de saída corresponde a uma temperatura.

$$G(s) = \frac{728,3}{s^4 + 14,23s^3 + 51,4s^2 + 26,25s + 0,03616} \quad (15)$$

Inicialmente foi obtida a resposta da planta ao degrau unitário (Figura 3) para que fossem identificados possíveis problemas em relação ao tempo de estabelecimento, máximo sobressinal e erro de regime.

Observando a resposta ao degrau unitário, percebe-se que existe um erro de regime bastante elevado, pois o sinal chega ao regime em 2×10^4 °C, o que é muito distante do esperado. Assim como o tempo de estabelecimento que é de aproximadamente $3,3 \times 10^3$ segundos.

Então, para melhorar a resposta do sistema em geral, devem ser tomadas medidas que melhorem o erro de

regime e o tempo de estabelecimento, tendo um sobressinal aceitável.

Como o objetivo é fazer com que o sistema responda a uma entrada que atenda ao padrão de conforto térmico de aproximadamente 25°C, foi feito o projeto de um controlador proporcional e integral para corrigir o erro de regime e reduzir o tempo de estabelecimento.

3.2 Controlador PI Robusto

Para realizar o controle da planta, foi utilizado o esquema de controle da Figura 1, em que foi multiplicada a função de transferência da planta, equação (15), e a função do controlador, equação (2), para assim obter a função de transferência do sistema da equação (16).

$$G_1(s) = \frac{728,3(K_p s + K_i)}{s^5 + 14,23s^4 + 51,24s^3 + 26,25s^2 + 0,03616s} \quad (16)$$

A partir do cálculo da função de transferência em malha fechada da equação (4), foi possível obter o polinômio característico do sistema na equação (17).

$$s^5 + 14,23s^4 + 51,4s^3 + 26,25s^2 + [0,03616 + 728,3K_p]s + 728,3K_i = 0 \quad (17)$$

Para o controlador robusto, uma constante da planta foi substituída pela variável A que posteriormente será substituída por um intervalo modal, resultando na equação (18).

$$G(s) = \frac{A}{s^4 + 14,23s^3 + 51,4s^2 + 26,25s + 0,03616} \quad (18)$$

Resolvendo a equação (4), obtém-se a função de transferência em malha fechada do sistema.

Como o controle integral insere um pólo no sistema, a obter a função de transferência em malha fechada obtém-se um sistema de quinta ordem, como pode ser observado na equação (17). Assim, comparando o denominador da função de transferência em malha fechada de quinta ordem com o polinômio característico obtido pelo projeto de obtenção de controladores por alocação de pólos, equação (19), que é de segunda ordem (Ogata, 2010), foi necessária a multiplicação do sistema por mais três pólos para obter uma equivalência matemática. Na equação (19), ξ se refere ao fator de amortecimento e ω_n se refere a frequência natural dos polos conjugados (Ogata, 2010).

$$s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad (19)$$

Resolvendo as equações encontradas, obteve-se as equações (20) e (21) para os ganhos K_p e K_i , considerando p_1 , p_2 e p_3 os pólos multiplicados.

$$K_p = \frac{\omega_n^2 p_1 p_2 + 2\xi\omega_n p_1 p_2 p_3 + \omega_n^2 p_2 p_3 + \omega_n^2 p_1 p_3 - 0,03616}{A} \quad (20)$$

$$K_i = \frac{\omega_n^2 p_1 p_2 p_3}{A} \quad (21)$$

As especificações de coeficiente de amortecimento (ξ) e frequência natural (ω_n) tiveram seus valores pontuais obtidos a partir dos valores de sobressinal máximo (M_P) e tempo de estabelecimento (t_s) substituídos nas equações (22) e (23).

$$M_P = e^{\frac{-\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \quad (22)$$

$$t_s = \frac{4}{\xi\omega_n} \quad (23)$$

No projeto do controlador robusto, os valores pontuais das especificações do sistema, M_p , t_s e a variável A da planta (equação (18)) foram transformados em intervalos modais para simular possíveis incertezas nos parâmetros do sistema.

O valor nominal $A=728,3$ foi variado em 10% e transformado no intervalo $A=[655,47; 801,13]$. Para obter os intervalos das especificações ξ e ω_n , foram utilizados valores de $M_p = 15\%$ e $t_s = 550s$ para definir os limites inferiores e $M_p = 20\%$ e $t_s = 650s$ para os superiores, resultando nos intervalos $[\xi] = [0, 51693; 0, 45595]$ e $[\omega_n] = [0, 01407; 0, 0135]$.

Aplicando-se a semântica intervalar modal, deve ser escolhida a modalidade dos intervalos, sendo ela existencial (E) ou universal (U). Para o intervalo $[A]$, foi adotada a modalidade universal, a fim de garantir que para qualquer valor dentro do intervalo do parâmetro seja possível obter um controlador que atenda às especificações desejadas. Para os intervalos $[\xi]$ e $[\omega_n]$, foi adotada a modalidade existencial, a fim de garantir que pelo menos um valor em cada um dos intervalos resulte em uma resposta desejável.

Aplicando as operações da aritmética intervalar modal descritas por Prado (2006), obtém-se as equações para os ganhos do controlador em (24) e (25).

$$[K_p] = \left[\frac{\omega_n^2 p_1 p_2 + 2\xi\omega_n p_1 p_2 p_3 + \omega_n^2 p_2 p_3 + \omega_n^2 p_1 p_3 - 0,03616}{A}; \frac{\overline{\omega_n^2 p_1 p_2} + 2\overline{\xi}\overline{\omega_n} p_1 p_2 p_3 + \overline{\omega_n^2} p_2 p_3 + \overline{\omega_n^2} p_1 p_3 - 0,03616}{\underline{A}} \right] \quad (24)$$

$$[K_i] = \left[\frac{\omega_n^2 p_1 p_2 p_3}{\underline{A}}; \frac{\overline{\omega_n^2} p_1 p_2 p_3}{\overline{A}} \right] \quad (25)$$

Resolvendo as equações, obtém-se os intervalos dos ganhos $[K_p] = [0, 002152; 0, 002219]$ e $[K_i] = [0, 000029653; 0, 000033365]$. Como ambos os intervalos são próprios, suas modalidades são existenciais. Formalizando as respectivas representações semânticas têm-se:

$$K_p = \frac{U(A, [A]')E(\xi, [\xi]')E(\omega_n, [\omega_n]')E(K_p, [K_p]')}{A} \quad (26)$$

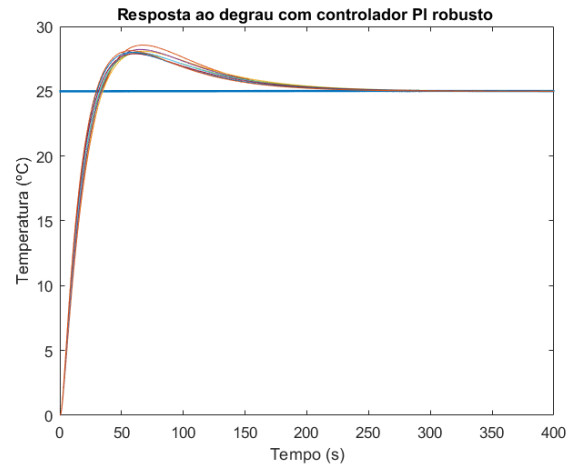


Figura 4. Resposta do sistema ao degrau com controlador PI robusto

$$U(A, [A]')E(\omega_n, [\omega_n]')E(K_i, [K_i]') \quad (27)$$

$$K_i = \frac{\omega_n^2 p_1 p_2 p_3}{A}$$

A equação (26) tem o seguinte significado: Existe pelo menos um valor de K_p pertencente ao seu intervalo que satisfaz à equação para todos os valores do parâmetro A pertencente ao seu intervalo e para algum valor das especificações ξ e ω_n dentro dos seus intervalos. Desta forma, garante-se que existe pelo menos um valor do ganho K_p que satisfaz ao projeto.

A equação (27) tem o seguinte significado: Existe pelo menos um valor de K_i pertencente ao seu intervalo que satisfaz à equação para todos os valores do parâmetro A pertencente ao seu intervalo e para algum valor das especificações ξ e ω_n dentro dos seus intervalos. Desta forma, garante-se que existe pelo menos um valor do ganho K_i que satisfaz ao projeto.

4. RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos através de simulações para o controlador projetado neste trabalho. O software utilizado na simulação foi o *MATLAB*.

Para simular o comportamento do controlador, foi utilizada a referência com amplitude 25, correspondente a temperatura de 25°C.

Para simular uma perturbação no sistema, foi somado à entrada o sinal de uma senóide com amplitude de 0,1 e frequência de aproximadamente 32Hz. Para simular as variações, foram utilizados valores aleatórios dentro dos intervalos K_p , K_i e A .

Como resultado dessas simulações com variações dos valores dentro dos intervalos, obteve-se o gráfico da Figura 4 que mostra a resposta do sistema com o controlador robusto e na Figura 5 o sinal de controle.

Analisando a Figura 4, percebe-se que o resultado foi satisfatório, porque o erro de regime permanente foi corrigido, o sobressinal máximo atingido em todos os controladores utilizados na simulação foi de no máximo 14,24%, sendo que o valor máximo desejável era de 15%. E o tempo de

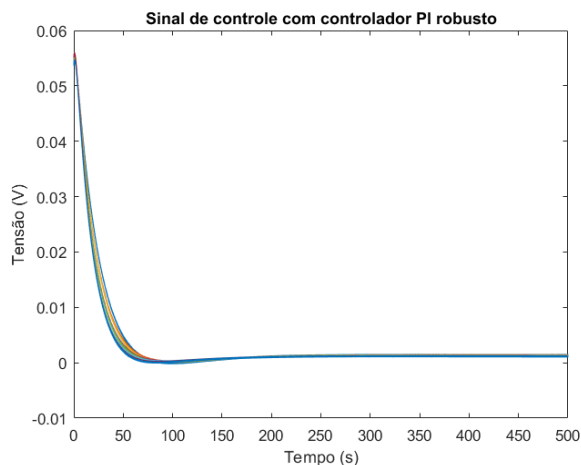


Figura 5. Sinal de controle do sistema com controlador PI robusto

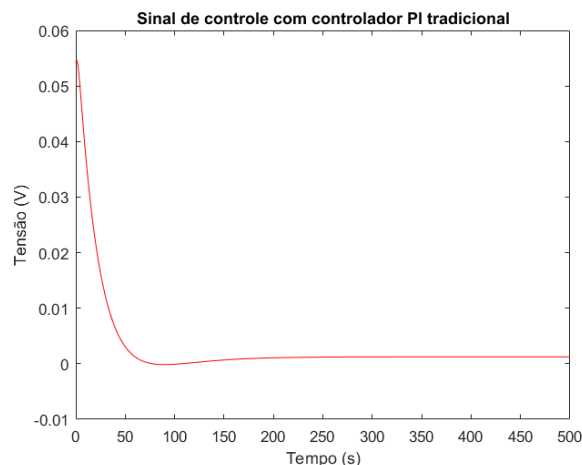


Figura 7. Sinal de controle do sistema com controlador PI tradicional



Figura 6. Resposta ao degrau do sistema com controlador PI tradicional

estabelecimento se manteve em aproximadamente 200s, um valor bastante aceitável em se tratando de um sistema térmico. Analisando o sinal de controle da Figura 5, pode-se perceber que este também possui um valor bem aceitável, pois em todos os casos a variação máxima do sinal foi de 0 a 0,05603, o que favorece a aplicação em um sistema real.

Além da simulação do controlador robusto, também foi feita a simulação de um controle PI tradicional utilizando valores fixos no lugar dos intervalos de M_P e t_s sendo utilizados os valores $M_P = 15\%$ e $t_s = 600s$. A resposta obtida na simulação é demonstrada na Figura 6 e o sinal de controle na Figura 7.

Analisando a resposta do sistema, nota-se que o erro de regime permanente foi corrigido, o sobressinal máximo é de 11,2% e o tempo de estabelecimento é 197s. A resposta foi satisfatória e com isso pode-se concluir que o controlador robusto possui uma resposta muito boa, pois seus resultados ficaram bem próximos ao de um controlador PI tradicional mesmo com incertezas e variações nos parâmetros do sistema, além do sinal de controle que permaneceu em um valor próximo ao do tradicional.

5. CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos no projeto do controlador PI robusto, pode-se perceber que mesmo com pequenas variações em um parâmetro da planta ou incertezas nos parâmetros do controlador, o controle robusto por análise intervalar modal consegue se manter eficiente. Podendo ser utilizado em sistemas que possuem incertezas ou que exigem uma maior robustez em seu controle.

Como trabalho futuro, pode ser incrementado ao projeto a variação das demais constantes da planta para ser possível simular as incertezas em todos os parâmetros e também a realização de mais testes dentro do projeto existente. Outra possibilidade futura seria o desenvolvimento de um protótipo com a implementação do controlador projetado neste trabalho para a realização de uma análise prática do comportamento do controlador simulado.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à UEFS e a CNPq por todo suporte oferecido.

REFERÊNCIAS

- Bezerra, J.H. (2007). Estudo de sistema de controle usando o controlador pid em processos industriais. *Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas.*
- Filho, F.M.L. (2010). Controle inteligente para automação predial. *Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade de Brasília.*
- Lucena, T.V.L. (2017). Controle de temperatura para um sistema de condicionamento de ar. *Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Rio de Janeiro.*
- M. A. Sainz, J.A. and L. J. J. V. a. Remei Calm, P.H. (2014). *Modal Interval Analysis: New Tools for Numerical Information.* Lecture Notes in Mathematics 2091. Springer, 1st edition.
- Ogata, K. (2010). *Engenharia de Controle Moderno.* Pearson Prentice Hall, São Paulo, 5 edition.
- Oliveira, F.A.R. (2010). Instrumentação e identificação de um ambiente predial visando controle preditivo do con-

- forto térmico. *Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília.*
- Prado, M.L.M. (2000). Controle multivariável aplicado a sistemas com atraso. *Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo.*
- Prado, M.L.M. (2006). Controle robusto por alocação de polos via análise intervalar modal. *Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas.*
- Prado, M.L.M. and Paz, M.A. (2008). Controle robusto utilizando estrutura pd e análise intervalar modal. *XIII Congresso Latino Americano ´ de Controle Automático.*
- Sousa, J.A.C. (2001). Sistema de controle térmico para ambiente predial. *Monografia - Universidade de Brasília.*
- Vieira, B.B.S. and Wyant, R.S. (2007). Automação e controle de um ambiente predial multi-salas utilizando o "actionview". *Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade de Brasília.*