



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA**

Autorizada pelo Decreto Federal nº 77.496 de 27/04/76  
Recredenciamento pelo Decreto nº 17.228 de 25/11/2016



**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**COORDENAÇÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA**

## **XXV SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UEFS SEMANA NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA - 2021**

### **PROJETO DE CONTROLADOR ROBUSTO PARA UM PROTÓTIPO DE UM SISTEMA TÉRMICO DE AUTOMAÇÃO PREDIAL**

**Vanessa de Souza de Oliveira<sup>1</sup>; Márcia Lissandra Machado Prado**<sup>2</sup>

1. Bolsista PIBIC/CNPq, Graduando em Engenharia de Computação, Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail: [vanessasouzaoliveira1@gmail.com](mailto:vanessasouzaoliveira1@gmail.com)
2. Orientador, Departamento de Tecnologia, Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail: [marcia.lissandra@gmail.com](mailto:marcia.lissandra@gmail.com)

**PALAVRAS-CHAVE:** Teoria de controle; Sistemas Térmicos; Controle Robusto.

#### **INTRODUÇÃO**

A temperatura é uma das grandezas mais medidas e controladas em todo o mundo, tanto na climatização de ambientes - em residências, prédios e hospitais, quanto em indústrias - em fornos, estufas e reatores (Sousa, 2001). Em prédios comerciais, verifica-se que os maiores gastos energéticos devem-se a utilização de ar condicionado (Gallo e Ribeiro, 2007).

Além das medidas tradicionais utilizadas na construção dos prédios (canais de ventilação e materiais adequados), a automação predial possui ferramentas eficientes que contribuem com a melhor utilização energética. Os sistemas de controle podem ser empregados na melhoria do conforto térmico nos ambientes, sendo interessante que a temperatura esteja por volta de 24 a 25 graus (Creder, 2004).

A princípio, pode-se utilizar um controle mais simples, como um liga desliga. Mas é interessante obter um sistema de controle mais sofisticado, podendo-se utilizar controladores proporcionais, derivativos, integrais (PID) e por realimentação de estados (Ogata, 2010). Além disso, podem ser implementados controladores robustos, em que mesmo que o sistema varie seus parâmetros ou sofra perturbações, o sistema de controle responde de maneira satisfatória (Prado, 2006).

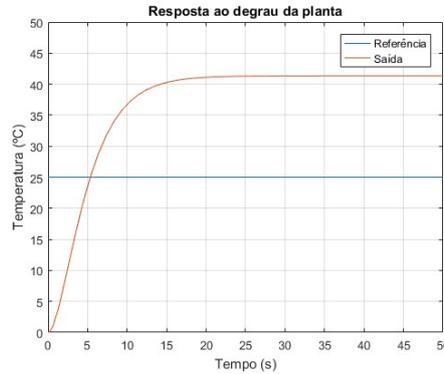
Neste trabalho foi feito o estudo, projeto e simulação de um sistema de controle térmico robusto para o ambiente de um prédio para que o mesmo viabilize o conforto térmico de forma automática. E neste resumo, serão descritos a metodologia utilizada e os resultados obtidos com os experimentos.

#### **METODOLOGIA**

A metodologia utilizada na pesquisa foi, inicialmente, uma revisão bibliográfica sobre a teoria de controle, controle PID, sistemas térmicos e controle robusto pelo método da análise intervalar modal. A partir dos assuntos estudados, escolheu-se o sistema que representa o ambiente da sede da empresa Spin Engenharia e Automação Ltda, que teve

sua identificação feita por Vieira e Wyant (2007) e sua planta é representada na equação (1) e a resposta ao degrau no gráfico da Figura 1.

$$G(s) = \frac{0,252}{(s + 0,5)(s + 0,3048)} \quad (1)$$

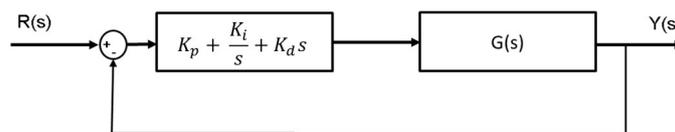


**Figura 1:** Resposta ao degrau da planta

Observando-se a resposta ao degrau da Figura 1, percebe-se que existe um erro de regime permanente, visto que o valor desejado é de 25°C e a resposta do sistema é maior que 40°C. Outro problema observado é que o tempo de estabelecimento é muito elevado. Assim, faz-se necessário o projeto de um controlador e as especificações definidas foram: tempo de estabelecimento ( $t_s$ ) de 3s e sobre-elevação máxima ( $M_p$ ) de 5%.

A partir de estudos, concluiu-se que seria conveniente utilizar um controlador PID (Proporcional Integral Derivativo) tradicional para atender aos requisitos do projeto. A função de transferência de um controlador PID é representada na equação (2). E o diagrama de blocos do sistema é mostrado na Figura 2.

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



**Figura 2:** Diagrama de blocos do sistema com o controlador PID

Substituindo a equação de malha aberta do sistema (equação (3)) na equação (4), obtém-se a função de transferência em malha fechada do sistema.

$$G_1(s) = \frac{0,252(K_d s^2 + K_p s + K_i)}{s^3 + 0,8048s^2 + 0,1524s} \quad (3)$$

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

A partir das especificações do sistema, foi possível calcular os valores do coeficiente de amortecimento ( $\xi$ ) e da frequência natural ( $\omega_n$ ) (Ogata (2010)), sendo eles iguais a 0,6901 e 1,9321rad/s, respectivamente. Com isso, foi possível fazer a alocação de polos (Ogata (2010)) do sistema e obter os ganhos  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  do controlador mostrados em (5).

$$K_p = 310,5045 \quad K_i = 414,7653 \quad K_d = 118,4994 \quad (5)$$

Em projetos de sistemas de controle, um ponto a ser considerado é que o sistema é sensível ao erro entre o sistema real e o modelo projetado. Para evitar problemas em relação a isso, é utilizado o método de projeto de controle robusto (Ogata (2010)) através da análise intervalar modal (Prado, 2006).

Neste projeto para o controlador robusto, os valores nominais das especificações do sistema e um dos valores constantes da planta (equação (1)) foram transformados em intervalos modais. Que são definidos por um par formado por um intervalo clássico  $[x]'$  e um quantificador  $Q[x]$ , que indica a modalidade de um intervalo, podendo ser Existencial ou Universal (Prado (2006)).

O valor nominal  $A=0,252$  da planta (equação (1)) foi variado em 10%, resultando no intervalo  $[A]' = [0,2268, 0,2772]$ . Para encontrar os intervalos das especificações, foram utilizados os valores de  $M_p = 4\%$ ,  $t_s = 2,5s$  para o limite inferior de  $\xi$  e  $\omega_n$  e  $M_p = 6\%$ ,  $t_s = 3,5s$  para o limite superior. Os intervalos obtidos foram  $[\xi]' = [0,7156, 0,6671]$  e  $[\omega_n]' = [2,2359, 1,7132]$ .

Aplicando-se a semântica intervalar modal, foram escolhidas as modalidades: Universal para o intervalo de  $[A]'$ ; Existencial para os intervalos  $[\xi]'$  e  $[\omega_n]'$ . E a partir das equações intervalares, utilizando as operações da aritmética intervalar modal descritas em Prado (2006), obtiveram-se os intervalos dos ganhos do controlador robusto, mostrados em (7), (8) e (9).

$$[K_p] = [340,7194 ; 294,4607] \quad (7)$$

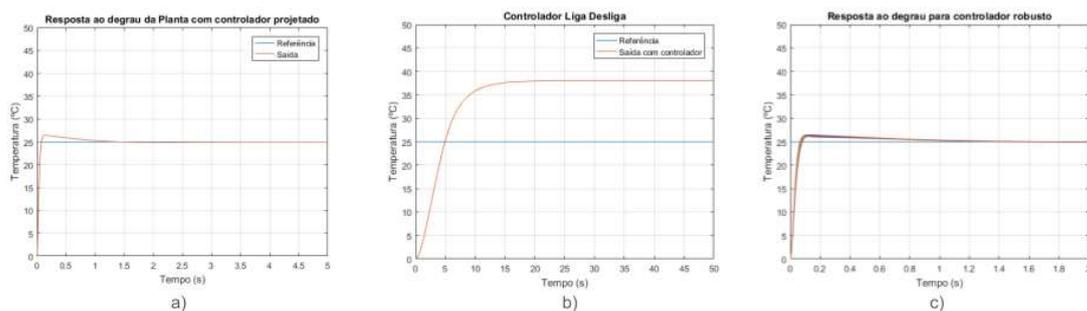
$$[K_i] = [504,9746 ; 362,3524] \quad (8)$$

$$[K_d] = [109,6509 ; 129,9866] \quad (9)$$

Nota-se que os intervalos  $[K_p]$  e  $[K_i]$  são impróprios, logo, têm modalidade universal, ou seja, qualquer valor deles, dentro dos intervalos, atende às especificações. O intervalo  $[K_d]$  é próprio, logo, sua modalidade é existencial, ou seja, existe pelo menos um valor de ganho no intervalo que atende às especificações.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para realizar a análise dos resultados, foi utilizada a entrada degrau com valor de referência de 25°C, que é considerado como ideal para o conforto térmico. Foi feita a comparação entre o controlador liga-desliga, o controlador PID tradicional projetado neste estudo, com os ganhos correspondentes à equação (5) e o controlador robusto projetado com alguns valores dentro dos intervalos dos ganhos correspondentes às equações (7), (8) e (9). Os resultados desta comparação são demonstrados na Figura 3.



**Figura 3:** a) Resposta do controlador PID tradicional; b) Resposta do controlador liga desliga; c) Resposta do controlador robusto

Pode-se observar que o sistema com o controlador PID tradicional, projetado neste trabalho (Figura 3(a)) teve o erro de regime permanente corrigido e o tempo de estabelecimento foi reduzido para 1,5s, melhor do que o definido pelas especificações. O mesmo acontece com o controlador robusto projetado (Figura 3(c)), em que além de ter o erro de regime corrigido e o tempo de estabelecimento reduzido, ele funciona mesmo com variações nos parâmetros de entrada e nos valores dos ganhos, dentro de intervalos definidos, comprovando seu funcionamento de controlador robusto. Quando se compara esses controladores ao liga desliga (Figura 3(b)), nota-se que o desempenho dos projetados é muito superior, visto que o liga desliga não corrigiu o erro de regime e nem melhorou o tempo de estabelecimento.

## **CONCLUSÃO**

A partir dos resultados obtidos pelos controladores, PID tradicional e PID robusto, foi possível constatar que o erro de regime permanente foi eliminado em ambos os casos, além do tempo de acomodação que foi reduzido para aproximadamente 1,5s, o que é um ótimo resultado. Concluiu-se que comparando com o controlador liga-desliga, os controladores projetados obtiveram resultados muito melhores. Portanto os resultados obtidos foram satisfatórios e os objetivos do trabalho foram alcançados.

## **REFERÊNCIAS**

- SOUSA, J. do A. C. 2001. Sistema de Controle Térmico para Ambiente Predial, Monografia de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília.
- GALLO, E. A., RIBEIRO, F. N. 2007. Índice de Conforto Térmico ISO7730 em Automação Predial, Monografia de Conclusão de Curso, Faculdade de Tecnologia, Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Universidade de Brasília.
- CREDER, H. 2004. Instalações de Ar Condicionado. 6ª Edição. Rio de Janeiro: LTC. p. 79.
- OGATA, K. 2010. Engenharia de Controle Moderno. 5ª edição, Prentice Hall. p. 521.
- PRADO, M. L. M. 2006. Controle Robusto por Alocação de Pólos via Análise Intervalar Modal, Universidade Estadual de Campinas, Tese.
- VIEIRA, B.B.S., WYANT, R.S. (2007). Automação e Controle de um Ambiente Predial Multi-Salas utilizando o Supervisório “ActionView”, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade de Brasília.