

PROJETOS DE CONTROLADORES ROBUSTOS PARA UM SISTEMA LEVITADOR MAGNÉTICO.

Ian da Silva Viganó¹; Márcia Lissandra Machado Prado²

1. Bolsista PIBIC/FAPESB, Graduando em Engenharia de Computação, Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail: ians028@gmail.com
2. Orientador, Departamento de tecnologia, Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail: marcia.lissandra@gmail.com

PALAVRAS-CHAVE: Teoria de Controle, Controle Robusto, Sistema Levitador Magnético

INTRODUÇÃO

Os Sistemas de Controle têm desempenhado um papel fundamental na evolução da engenharia e da ciência. Exemplos de sua importância estão nos sistemas de veículos espaciais, sistemas de controle de mísseis, sistemas robóticos e similares, sistemas de controle de pressão, velocidade, temperatura, vazão, etc (Ogata, 2010).

Uma área da tecnologia que atualmente envolve uma grande linha de pesquisa são os sistemas de levitação magnética, que é o processo com o qual se consegue suspender um objeto numa posição estável, contrariando, assim, as forças de gravidade, mediante o uso de forças exercidas sem contato com o objeto. Manter um corpo suspenso no ar, sem qualquer apoio aparente, como que desafiando a lei da gravidade, é reconhecido como fenômeno de levitação (Barbosa et al., 2004).

Este trabalho propõe a aplicação da metodologia de análise intervalar modal descrita em (Prado e Paz, 2008) no projeto de controladores robustos. Para isso foram aplicadas variações nos parâmetros do sistema, gerando, assim, intervalos modais. A substituição dos parâmetros constantes do sistema por intervalos permite tornar os parâmetros do sistema variáveis e, com isso, fazendo uso da aritmética intervalar modal (Sainz et al, 2014), é possível realizar o projeto do controlador robusto.

MATERIAL E MÉTODOS OU METODOLOGIA (ou equivalente)

Para realizar a modelagem do sistema são usadas as equações diferenciais que podem representar a dinâmica do sistema matematicamente (Dorf e Bishop, 2001). O sistema do Levitador Magnético pode ser dividido em dois subsistemas, o elétrico e o eletromecânico, onde a saída do sistema elétrico serve de entrada para o sistema eletromecânico. Esses sistemas podem ser modelados separadamente. Essa abordagem foi utilizada e as sub-plantas e seus respectivos controladores são apresentados separadamente. Para a parte elétrica do sistema são usadas as leis de Kirchhoff para definir relações entre as tensões e/ou correntes no sistema. A bobina usada no eletroímã tem uma indutância e uma resistência, assim, utilizando as equações diferenciais, a 2º lei de Kirchhoff, a Lei de Ohm, a Lei da indutância de Faraday e a transformada de Laplace obtemos a seguinte função de transferência para o subsistema elétrico:

$$G_e(s) = \frac{A}{s+B}$$

Equação 1

Onde $A = 2,42$ e $B = 26,6$.

De forma análoga fazemos o mesmo processo para o subsistema eletromecânico utilizando as leis de Newton obtemos:

$$G_m(s) = \frac{C}{s^2-D}$$

Equação 2

com $C = -19600$ e $D = 2800$.

Para o projeto dos controladores partiu-se da equação de realimentação em malha fechada dada por:

$$Gmf(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)}$$

Equação 3

Onde $C(s)$ representa a função de transferência do controlador e $G(s)$ é a função de transferência que representa o comportamento dinâmico da planta. Desenvolvendo essa equação para ambos os subsistemas, e utilizando um controlador *PID* (Proporcional-Integral-Derivativo), dada por, $C(s) = \frac{Kds^2+Kps+Ki}{s}$ obtemos:

$$Gmf_c(s) = \frac{A(Kpd+Kds+Ki)}{(AKd+1)s^2 + (AKpR+B)s + AKiR} \quad (4)$$

Equação 4

$$Gmf_m(s) = \frac{CKi}{s^3 + CKds^2 + (CKp+D)s + CKiH}$$

Equação 5

Nas equações (4) e (5) R e H , são respectivamente, uma resistência e um conversor de um sinal de posição para um sinal de corrente, pois como nos subsistemas os sinais de entrada não tem a mesma unidade dos sinais de saída, se faz necessário esse tipo de conversão para a realimentação da planta. Para o subsistema elétrico o conversor é uma simples resistência que relaciona diretamente a tensão (entrada) com a corrente (saída), Já para o subsistema eletromecânico H é uma função que relaciona a corrente (entrada) com a posição (saída).

Para encontrar os ganhos do controlador *PID* é necessário comparar o denominador da equação (4) com a equação (6) que representa a equação padrão de segunda ordem. Dessa forma é possível determinar os valores dos ganhos em função dos parâmetros de desempenho definidos para o sistema, da mesma forma é feito para a equação (5), porém comparando seu denominador com a equação (7), que é o sistema padrão de terceira ordem.

$$s^2 + 2\varepsilon\omega_n + \omega_n^2$$

Equação 6

$$s^3 + (p + 2\varepsilon\omega_n)s^2 + (2p\varepsilon\omega_n + \omega_n^2)s + p\omega_n^2$$

Equação 7

Os parâmetros de desempenho definidos para a planta foram 10% de sobre-elevação máxima e um tempo de acomodação de 0.15s. Esses parâmetros de desempenho resultam em um $\varepsilon = 0,59$ e um $\omega_n = 33,89$.

Para projetar o controlador robusto os parâmetros, tanto da planta, quanto de desempenho do projeto foram variados em 10%. Com isso os valores de A,B,C,D, ε e ω_n se tornam intervalos, com o valor desses intervalos e aplicando a aritmética intervalar descrita em (Saintz et al, 2014) obtemos o valor para os ganhos do controlador na forma de intervalos, são eles: $[Kd]' = 0$, $[Kp]' = [5.70420, 5.70523]$ e $[Ki]' = [498.55, 467.22]$ para o subsistema elétrico e $[Kd]' = [-0,0040 ; -0,0054]$, $[Kp]' = [-0,2887 ; -0,3265]$ e $[Ki]' = [-0,0234 ; -0,0372]$ para o subsistema eletromecânico.

RESULTADOS E/OU DISCUSSÃO (ou Análise e discussão dos resultados)

Para analisar o controlador proposto, este foi aplicado na planta, por simulação, com parâmetros variáveis, fazendo o sistema resultante responder ao degrau unitário. Os valores de parâmetros da planta (A e B) foram variados de forma a representar os dois extremos dos seus respectivos intervalos, o ponto médio, uma média entre o ponto mínimo e o ponto médio, chamada de Média inferior, e uma média entre o ponto médio e o ponto máximo, chamada de Média superior, esses valores podem ser vistos na Tabela 1. Os valores de Kp e Ki foram variados em um conjunto de dez controladores dentro dos intervalos e aplicados a cada uma das variações da planta.

	A	B	C	D
Ponto mínimo	2,178	23,94	-17640	2520
Média inferior	2,299	25,27	-18620	2660
Ponto médio	2,420	26,60	-19600	2800
Média superior	2,541	27,93	-20570	2940
Ponto máximo	2,662	29,26	-21560	3080

Tabela 1: Parâmetros do variados referente ao subsistema elétrico e eletromecânico

A Figura 3-A mostra o resultado obtido para o subsistema elétrico do levitador magnético, onde foram aplicados os valores de Kp e Ki na equação (4). É possível perceber através da análise do gráfico que o erro de regime foi eliminado e que o sistema atende aos requisitos propostos para todas as variações dos controladores aplicados (dentro dos intervalos definidos por Kp e Ki , a cada uma das variações aplicadas sobre a planta original, mantendo sobre-elevação máxima inferior a 11% e tempo de estabelecimento menor que 0.165 segundos (com critério de 5%), que são os valores máximos aceitos após a variação de 10% sobre os requisitos de projeto. No gráfico apresentado e nos que vem a seguir, Média1 corresponde à Média inferior e Média2 corresponde a Média superior e seus valores correspondentes estão na Tabela 1.

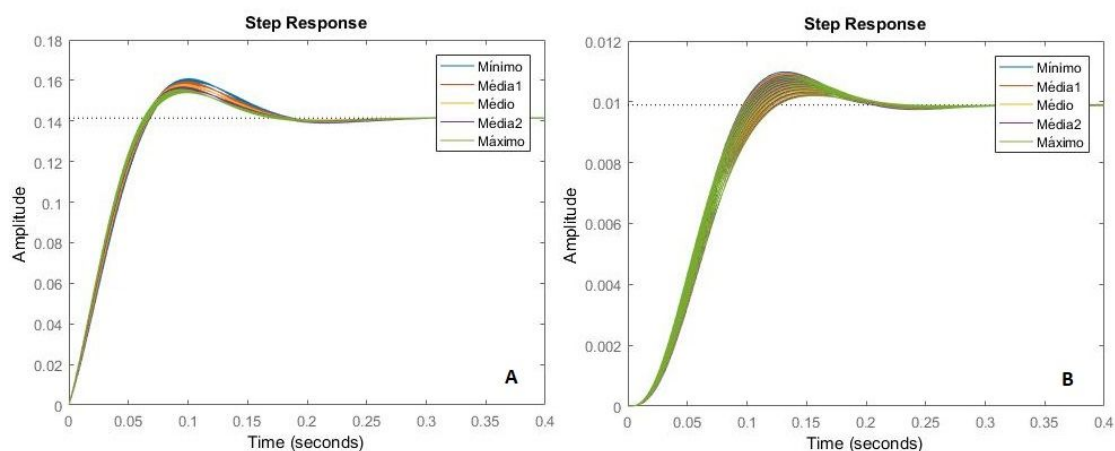


Figura 3: **A** - Resposta ao degrau do subsistema elétrico. **B** - Resposta ao degrau do subsistema elétrico e eletromecânico.

A Figura 3-B mostra a resposta ao degrau obtido para o subsistema eletromecânico do levitador magnético, onde foram aplicados os valores de K_d, K_p e K_i na equação (5). É possível perceber através da análise do gráfico que o erro de regime foi eliminado e que o sistema atende aos requisitos propostos para todas as variações dos controladores aplicados (dentro dos intervalos definidos por K_d, K_p e K_i , a cada uma das variações aplicadas sobre a planta original, mantendo sobre-elevação máxima inferior a 11% e tempo de estabelecimento menor que 0.165 segundos (com critério de 5%), que são os valores pretendidos de desempenho após a variação de 10% sobre os requisitos de projeto.

CONSIDERAÇÕES FINAIS (ou Conclusão)

Através da análise dos resultados obtidos com o projeto do controlador robusto foi possível perceber que o sistema atende todas as especificações do projeto, eliminando o erro de regime permanente e com um tempo de resposta dentro do limite estipulado. Constatou-se ainda que o sinal de controle assumiu valores ótimos dentro do esperado.

REFERÊNCIAS

- BARBOSA, L. F. W; COSTA, F; LUDWIG, G. O; NASCIMENTO JR, C. L. 2004. Controle analógico de um levitador magnético (maglev) de simples construção e operação, XV Brazilian Conference on Automatics, Gramado, Brazil.
- DORF, R. C; BISHOP, R. H. 2001. Sistemas de Controle Modernos.
- OGATA, K. (2010). Engenharia de Controle Moderno, Pearson. 5ed. 824p.
- PRADO, M; PAZ, M. (2008). Controle robusto utilizando estrutura pd e análise intervalar modal, XIII Congresso Latinoamericano de Control Automático, Mérida.
- SAINZ, M. A; ARMENGOL, J; CALM, R; HERRERO, P; JORBA, L; VEHI, J. (2014). Modal interval analysis, Lecture Notes in Mathematics 2091.