

COMPARAÇÃO DE TÉCNICAS DE CONTROLE APLICADAS A UM SISTEMA DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA

Caio Igor Gonçalves Chinelato

Universidade Federal do ABC - UFABC

Av. dos Estados, 5001, Bangu, 09210-971, Santo André, SP, Brasil

E-mail: caio_i_c@hotmail.com

Resumo: Neste trabalho é apresentado o estudo e implementação de três técnicas de controle aplicadas a um sistema de levitação magnética. Este é um sistema dinâmico não-linear e não pode ser controlado globalmente por técnicas de controle lineares tradicionais. As técnicas de controle usadas são PD (Proporcional-Derivativo) com o sistema linearizado no ponto de equilíbrio, linearização por realimentação e SDRE (State-Dependent Riccati Equation). O objetivo deste trabalho é comparar o comportamento do sistema às diferentes técnicas de controle aplicadas. Resultados simulados com o software Matlab mostram a aplicação das técnicas de controle ao sistema.

Palavras-chave: Sistema de Levitação Magnética, Sistemas Dinâmicos Não-lineares, Controle PD, Linearização por realimentação, Controle SDRE.

1. Introdução

O sistema analisado é o sistema de levitação magnética [4]. O objetivo é manter suspensa no ar uma bola metálica através da variação do campo magnético. A corrente eletromagnética deve aumentar até a força magnética ser igual a força gravitacional atuando na bola. O sistema é mostrado na Figura 1 [6].

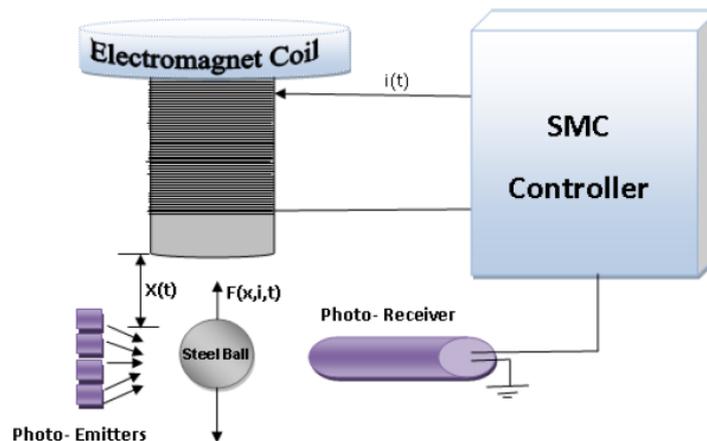


Figura 1: Sistema de levitação magnética [6].

A modelagem do sistema pode ser vista detalhadamente em [6]. O sistema no espaço de estados é dado por:

$$\begin{aligned}
 \dot{X}_1 &= X_2 = f_1 \\
 \dot{X}_2 &= g - \frac{K}{m} \cdot \frac{X_3^2}{X_1^2} = f_2 \\
 \dot{X}_3 &= \frac{-R \cdot X_3}{L_1 + \frac{2K}{X_1}} + \frac{2K}{L_1 + \frac{2K}{X_1}} \cdot \frac{X_2 X_3}{X_1^2} + \frac{U}{L_1 + \frac{2K}{X_1}} = f_3
 \end{aligned} \tag{1}$$

Onde X_1 é a posição da bola, X_2 é a velocidade da bola, X_3 é a corrente eletromagnética aplicada, a entrada de controle U é a voltagem elétrica aplicada na bobina eletromagnética, m é a massa da bola, g é a aceleração gravitacional, K é uma constante de força, R é a resistência da bobina, L_1 é a indutância da bobina e L_0 é a indutância da bobina sem a bola metálica. Os parâmetros são:

Valores dos Parâmetros
$m = 0.014 \text{ Kg}$
$g = 9.81 \text{ m/s}^2$
$K = 4.944 \times 10^{-6} \text{ Nm}^2/\text{A}^2$
$R = 5.2 \Omega$
$L_1 = 0.027 \text{ H}$
$L_0 = 0.0011 \text{ H}$

Tabela 1: Valores dos Parâmetros [6].

Este é um sistema dinâmico não-linear e não pode ser controlado técnicas de controle lineares tradicionais. Para controlar este tipo de sistema não-linear, técnicas avançadas são usadas, como H^∞ [7], modos deslizantes [6] e estrutura variável [5]. Neste trabalho são comparadas três técnicas de controle não-lineares: PD (Proporcional-Derivativo) com sistema linearizado no ponto de equilíbrio, linearização por realimentação e SDRE (State-Dependent Riccati Equation).

2. Técnicas de Controle

Nesta seção são descritas as três técnicas de controle utilizadas.

A lei de controle PD (Proporcional-Derivativo) é dada por:

$$U = K_p(X_{ref} - X) - K_D \dot{X} \quad (2)$$

onde X é a posição, X' é a velocidade, X_{ref} é a referência para o controle e K_p e K_D são os ganhos do controle PD.

A técnica linearização por realimentação é a mais complexa de ser projetada e implementada. Esta técnica é muito usada na comunidade de controle. A ideia principal é transformar algebricamente um sistema dinâmico não-linear em um sistema dinâmico linear e aplicar uma técnica de controle linear ao sistema [4,8]. Há dois tipos de linearização, entrada-estado e entrada-saída. Neste trabalho é usada a linearização entrada-estado. Considere o seguinte sistema não-linear:

$$\dot{X} = f(X, U) \quad (3)$$

O objetivo é projetar uma entrada de controle U . A linearização entrada-estado resolve este problema em dois passos. Primeiro, encontramos uma transformação de estado:

$$Z = Z(X) \quad (4)$$

e uma transformação de entrada:

$$U = U(X, v) \quad (5)$$

finalmente, transformamos o sistema não-linear em uma forma linear:

$$\dot{Z} = AZ + bv \quad (6)$$

Então usamos um controle linear tradicional para encontrar v . Na Figura 2, a técnica de controle pode ser vista graficamente.

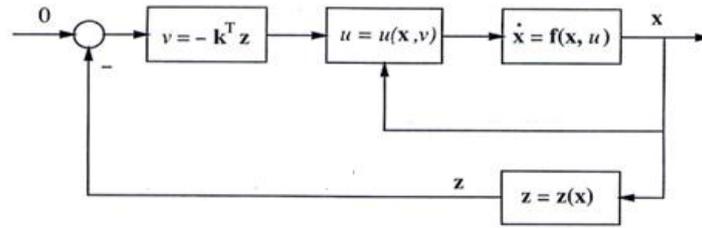


Figure 2: Linearização por realimentação [8].

O método de controle SDRE (State-Dependent Riccati Equation) tem recebido muita atenção da comunidade de controle atualmente [1]. Esta estratégia é muito eficiente para controle de realimentação não-linear. O método representa o sistema não-linear em uma estrutura linear que tem matrizes dependentes de estado e minimiza um índice de performance quadrático. O algoritmo resolve, para cada ponto no espaço de estados, a equação algébrica de Riccati e dependente do estado. Por causa disto este método chama-se equação de Riccati dependente do estado (State-Dependent Riccati Equation).

Dado o sistema não-linear:

$$\dot{X} = f(X) + g(X)U \quad (7)$$

O sistema precisa ser transformado na seguinte forma:

$$\dot{X} = A(X)X + B(X)U \quad (8)$$

A lei de controle de realimentação que minimiza o índice de performance quadrático:

$$J = \int_0^{\infty} [X(t)^T Q(X)X(t) + U(t)^T R(X)U(t)] dt \quad (9)$$

é:

$$U = -R^{-1}(X)B^T(X)P(X)X \quad (10)$$

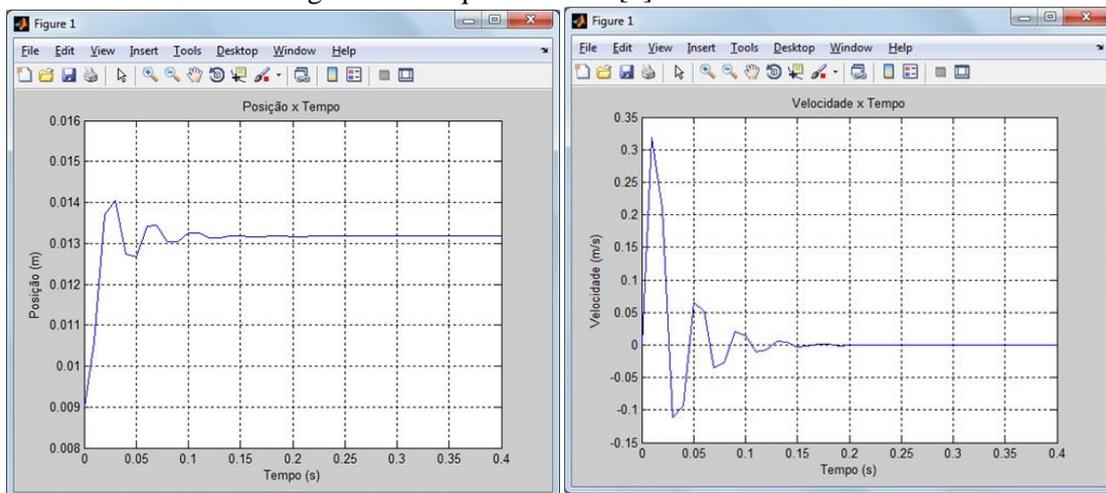
A matriz P(X) pode ser obtida pela equação de Riccati:

$$P(x)A(x) + A^T(x)P(x) + Q(x) - P(x)B(x)R^{-1}(x)B^T(x)P(x) = 0 \quad (11)$$

Q(X) e R(X) são parâmetros de projeto e são positivos definidos.

3. Resultados Simulados

Nesta seção são mostradas as performances das três técnicas de controle. O objetivo é manter a bola metálica na posição 0.012 m. A posição inicial é 0.009 m. Os resultados simulados com o software Matlab são mostrados abaixo. O método numérico para resolver o sistema não-linear é o Runge-Kutta de quarta ordem [2].



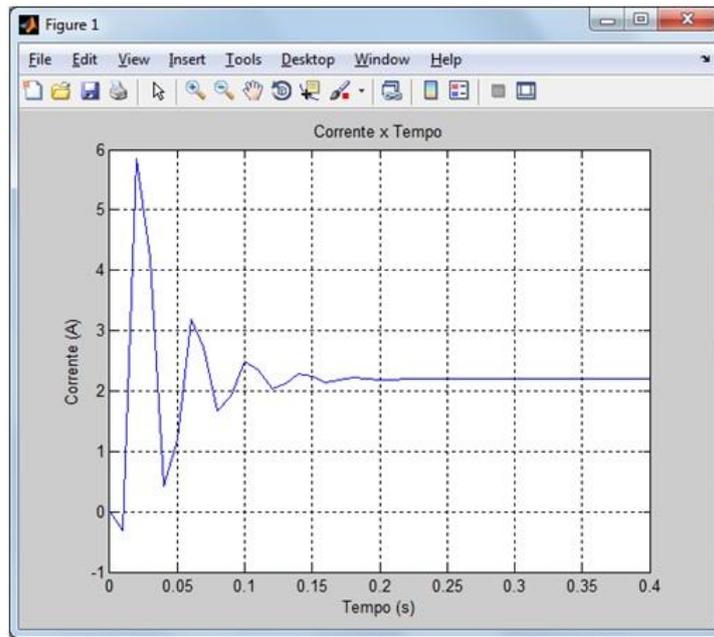


Figure 3: Posição, velocidade e corrente para a técnica de controle PD.

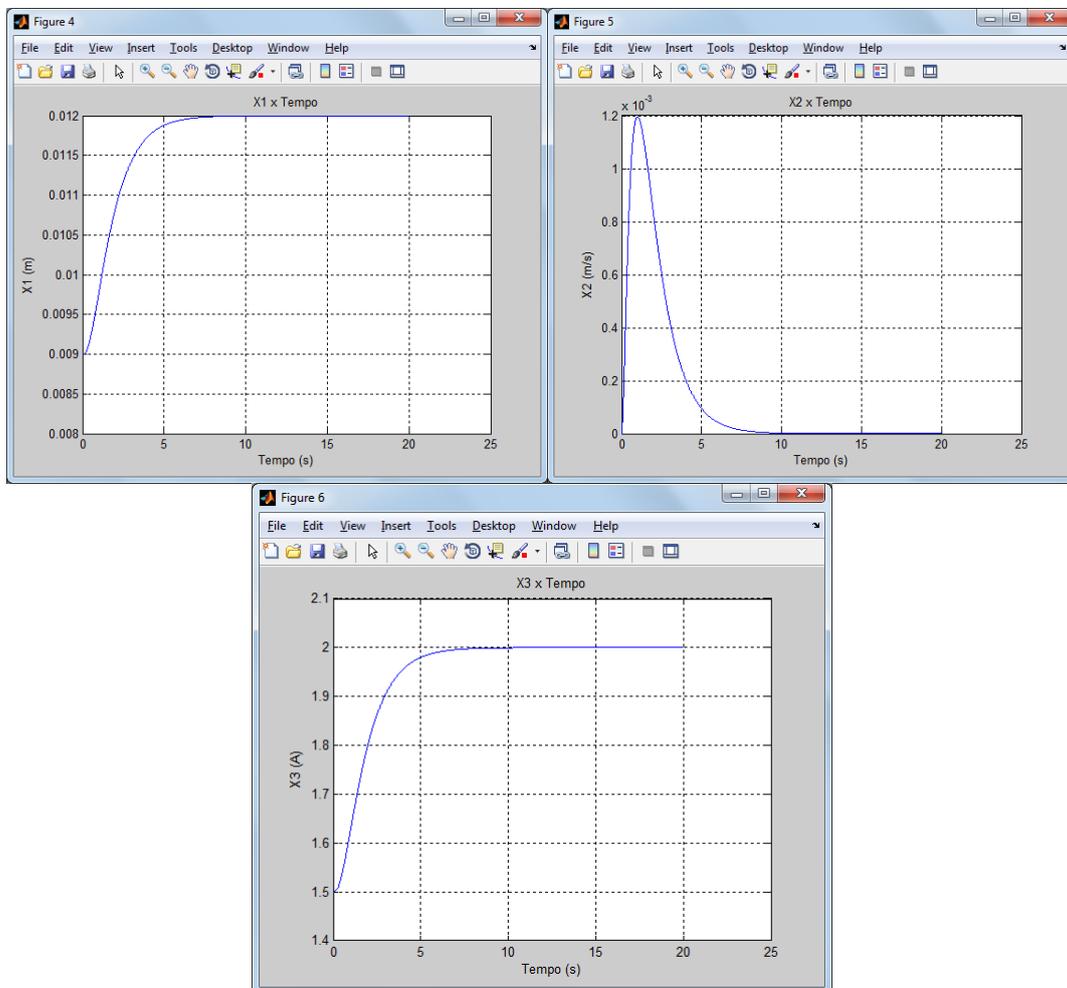


Figure 4: Posição, velocidade e corrente para a técnica de controle linearização por realimentação.

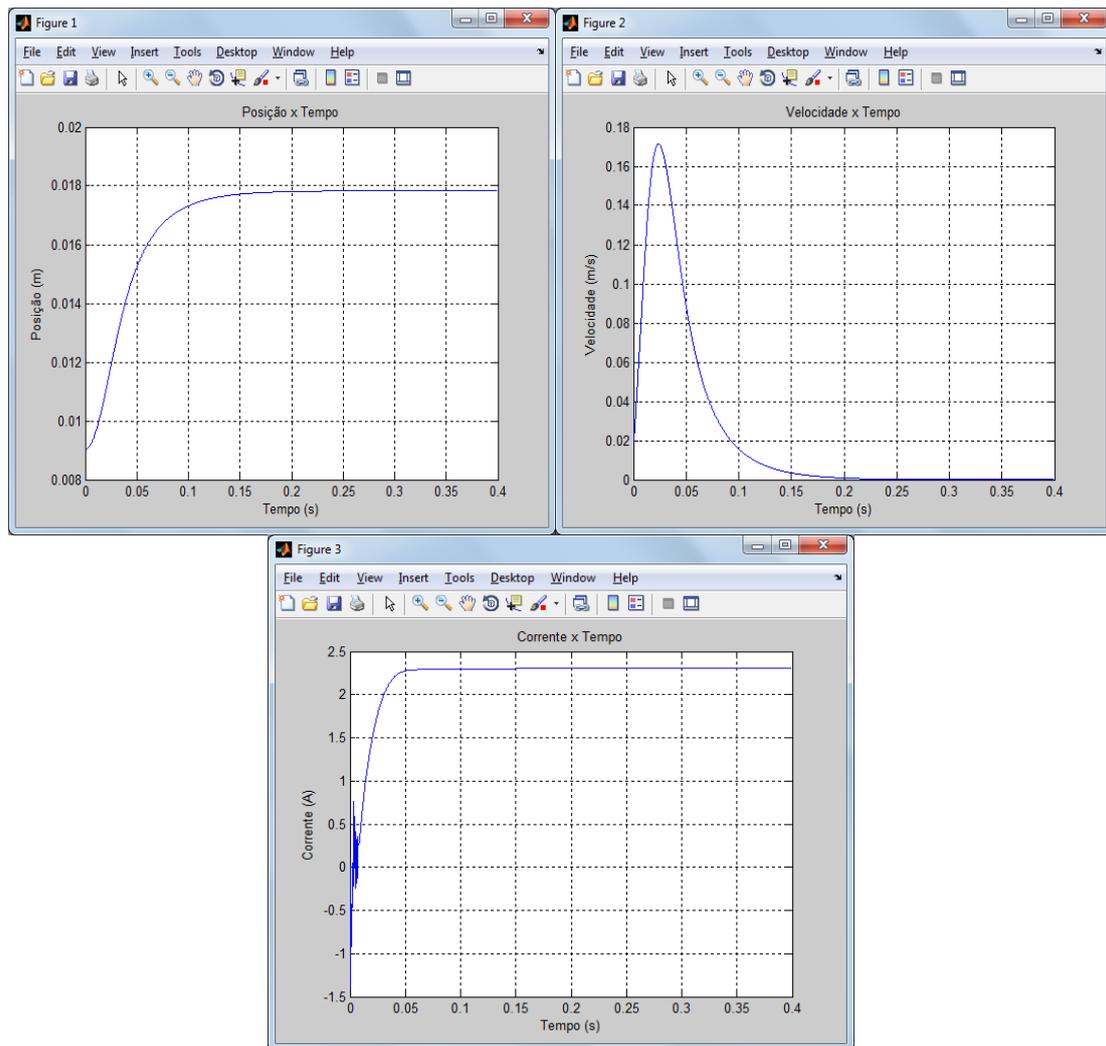


Figure 5: Posição, velocidade e corrente para a técnica de controle SDRE.

Analisando os resultados das simulações pode-se ver que a técnica de controle linearização por realimentação apresentou a melhor performance. A pior performance pode ser vista na técnica de controle SDRE. Isto ocorre devido a grande quantidade de cálculos e a performance de controle depende da escolha de A , B , Q e R em (8) e (9). Há a possibilidade várias escolhas para estas matrizes. A técnica de controle PD apresentou uma boa performance, no entanto, não é uma solução global e só vale próximo ao ponto de equilíbrio.

4. Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho nós apresentamos o estudo e a implementação de três técnicas de controle aplicadas ao sistema de levitação magnética. As técnicas de controle são PD (Proporcional-Derivativo) com o sistema linearizado no ponto de equilíbrio, linearização por realimentação e SDRE (State-Dependent Riccati Equation). Analisando os resultados, a técnica linearização por realimentação teve a melhor performance e a técnica SDRE teve a pior performance.

Os principais trabalhos futuros são a aplicação de outros tipos de técnicas avançadas e não-lineares de controle como controle adaptativo, redes neurais e técnicas Fuzzy.

5. Referências

- [1] Çimen, State-Dependent Riccati Equation (SDRE) Control: a Survey, Proceedings of the 17th World Congress the International Federation of Automatic Control, 2008.
- [2] Chapra, "Numeric Methods for Engineers", Mcgraw Hill, 2001.
- [3] Kirk, "Optimal Control Theory: An Introduction", Princeton Hall Englewood Cliffs, 1970.
- [4] Khalil, "Nonlinear Systems", Prentice Hall, 2002.
- [5] Kharaajoo, High Performance Variable Structure Control of a magnetic Levitation System, Asian Journal of Control, Vol.4, No.3, 2002.
- [6] Khemissi, Control Using Sliding Mode of the Magnetic Suspension System, International Journal of Electrical and Computer Sciences, Vol.10, No.3.
- [7] Shen, H^∞ Control and Sliding Mode Control of Magnetic Levitation System, Asian Journal of Control, Vol.4, No.3, 2002.
- [8] Slotine, "Applied Nonlinear Control", Prentice Hall, 1991.