

CONTROLE DE TORQUE EM UM SISTEMA COM ACOPLAMENTO ELETROMAGNÉTICO, UTILIZANDO A TÉCNICA DE GANHO SCHEDULING

Simplício Arnaud da Silva - Departamento de Tecnologia Mecânica – CT– UFPB – Campus I - CEP: 58059–900 – João Pessoa – PB, e-mail: arnaud@dtm.ct.ufpb.br.

Paulo Henrique de Miranda Montenegro - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - UFPB - Campus I - CEP: 58059–900 - João Pessoa - PB, e-mail: phmontenegro@bol.com.br.

José Antônio Riul - Departamento de Tecnologia Mecânica – CT–UFPB – Campus I CEP: 58059 – 900 – João Pessoa – PB, e-mail: riul@ct.ufpb.br.

Maria de Lourdes Guerra Luna - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - UFPB - Campus I - CEP: 58059–900 - João Pessoa - PB, e-mail: mlgl@terra.com.br

Resumo - *Este trabalho apresenta o projeto de controladores para um sistema de acoplamento magnético destinado à simulação de cargas, através do controle do torque. O sistema é constituído por um rotor, girando imerso em um campo magnético, acionado pela máquina em prova. A intensidade do campo magnético é controlada através de uma bobina alimentada por corrente contínua, permitindo assim, controlar a intensidade do torque. Para minimizar os problemas de não-linearidade da planta, foi usada a técnica de ganho scheduling (ganho escalonado), onde os coeficientes da função de transferência do controlador são selecionados automaticamente, em função do torque desejado. Devido à complexidade para obter o modelo analítico da planta, usou-se a técnica de identificação de sistemas em diversos pontos de operação da planta, e através de simulações, foram calculados os parâmetros dos controladores utilizando uma lei de controle baseada na técnica de alocação de pólos. Resultados simulados e experimentais sobre o desempenho do sistema são apresentados.*

Palavras-chave: Identificação de sistemas, Dinamômetro, Controle, Ganho escalonado.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de acoplamento eletromagnético podem ser usados para controlar o torque ou a velocidade em uma determinada carga, como nos casos de comportas, esteiras transportadoras ou estiramento de fios na indústria têxtil. Dependendo da configuração do sistema pode-se simular cargas visando determinar as características mecânicas do motor de acionamento.

A variação do torque neste tipo de acoplamento é feita através de uma corrente elétrica aplicada em uma bobina. Esta bobina cria um campo magnético que induz uma corrente elétrica em um volante ou tambor (dependendo da configuração do equipamento), que interagindo com o campo magnético aplicado gera o torque necessário. Para garantir que o torque aplicado se mantenha constante e independente de certas grandezas perturbadoras como: variação na velocidade do motor de acionamento; variação na tensão elétrica de alimentação e variações no campo magnético de

acoplamento, decorrente do aquecimento do volante, devido as correntes induzidas, um sistema de controle em malha fechada deve ser utilizado.

A metodologia de ganho escalonado (gain scheduling) tem se mostrado de grande utilidade em muitas aplicações de engenharia (Shamma e Athans, 1990, 1992 e Rugh, 1991), devido à sua simplicidade e generalidade porque utiliza técnicas de controle linear e é aplicável a uma grande variedade de plantas não-lineares.

Com esta metodologia de controle é possível mudar os parâmetros do controlador, monitorando as condições de operação da planta. É chamada de ganho escalonado, porque foi originalmente utilizada para mudanças apenas no ganho do processo (Aström, 1995). Ganho escalonado é um tipo especial de retroalimentação não-linear que usa um controlador linear, cujos parâmetros são mudados em função das condições de operação da planta. A idéia de relacionar os parâmetros do controlador com variáveis auxiliares é antiga, mas o circuito eletrônico necessário para implementar não era facilmente disponível, devido ao elevado custo dos componentes analógicos. Por isso, o ganho escalonado só era utilizado como piloto automático em aeronaves de alto desempenho. Atualmente, com a evolução da eletrônica digital, tornou-se fácil implementar esses controladores tendo em vista a disponibilidade de programas computacionais.

Ganho escalonado, baseado nas condições de operação do processo, é frequentemente um bom caminho para compensar as variações dos parâmetros ou não-linearidades conhecidas. Esta técnica consiste na obtenção de modelos linearizados, em torno de pontos de operação da planta, para os quais são projetados os controladores.

O projeto de controladores via alocação de pólos é similar ao projeto pelo lugar das raízes (Ogata, 2003 e Nise, 2002), com respeito aos pólos da função de transferência de malha fechada, que podem ser localizados em uma posição desejada. A principal diferença entre estas duas técnicas, é que o projeto por imposição de pólos, permite localizar todos os pólos da função de transferência, e o projeto pelo lugar das raízes só atua nos pólos dominantes. Para localizar todos os pólos, é necessário medir as variáveis do sistema e estimar aquelas que não podem ser medidas.

Neste trabalho é utilizada a metodologia de ganho escalonado para uma planta não linear SISO. São selecionados quatro pontos de operação (PO), para cobrir a faixa dinâmica da planta. Em cada um desses pontos, é obtida uma função de transferência linear, que atua numa faixa de operação selecionada em função dos valores de referência. Através das funções de transferência, são projetados os controladores lineares correspondentes, através da técnica via alocação de pólos, usando observadores de estado para estimar as variáveis que não são medidas. Devido a complexidade para se obter um modelo analítico da planta, optou-se pelo método de identificação de sistemas, para a determinar os modelos. (Aguirre, 2000 e Ljung, 1987).

2. DESCRIÇÃO DA PLANTA

A planta é um dinamômetro eletromagnético fabricado pela Equacional que consiste de um disco metálico acionado por um motor elétrico assíncrono de indução como mostra a Fig. (1). Um conjunto de quatro bobinas, ligadas em paralelo, produzem um fluxo magnético perpendicular à superfície do disco, induzindo correntes que geram um torque no sentido contrário ao torque motor. Este torque de frenagem depende do fluxo magnético gerado pelas bobinas, que por sua vez, está relacionado com uma tensão contínua aplicada nas mesmas. Uma placa de entrada e saída de dados marca Quatech, modelo Daq-801 foi utilizada como interface entre a planta e um computador Pentium 200 MMX, juntamente com o programa computacional LabVIEW, e um sensor de torque, captou a resposta do sistema.

O sensor de torque é constituído de uma barra de aço com quatro extensômetros montados em ponte completa, como mostra a Fig. (2).



Figura 1. Dinamômetro eletromagnético

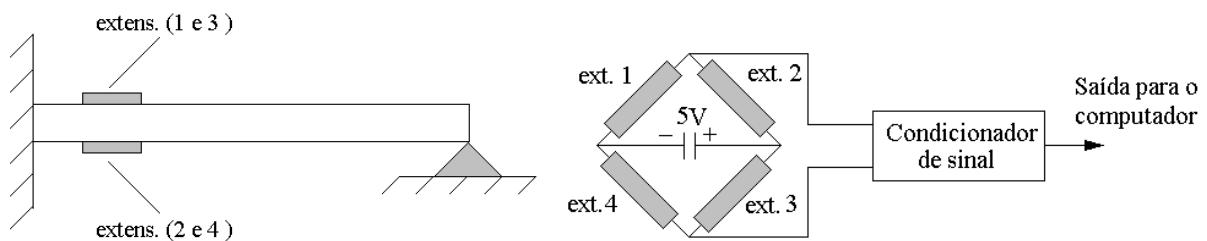


Figura 2. Sensor de torque: a) montagem mecânica; b) montagem elétrica

A variável de controle (tensão de saída do computador), que varia entre -5 e $+5$ V é amplificada para fornecer uma potência suficiente para excitar as bobinas controladoras do torque. O sinal de saída da ponte extensométrica é amplificado e filtrado pelo circuito condicionador, para fornecer a resposta do sistema (torque).

Para avaliar o grau de linearidade da planta, realizou-se um ensaio estático, aplicando-se uma tensão contínua nas bobinas do dinamômetro e mediu-se o torque correspondente, como mostra a curva da Fig. (3a). Analisando-se esta, constata-se que a planta é fortemente não linear, principalmente na faixa de torque entre 0 e $2,0$ Nm. A Fig. (3b) mostra a curva linearizada por faixas, para as quais o sistema vai operar em função da referência.

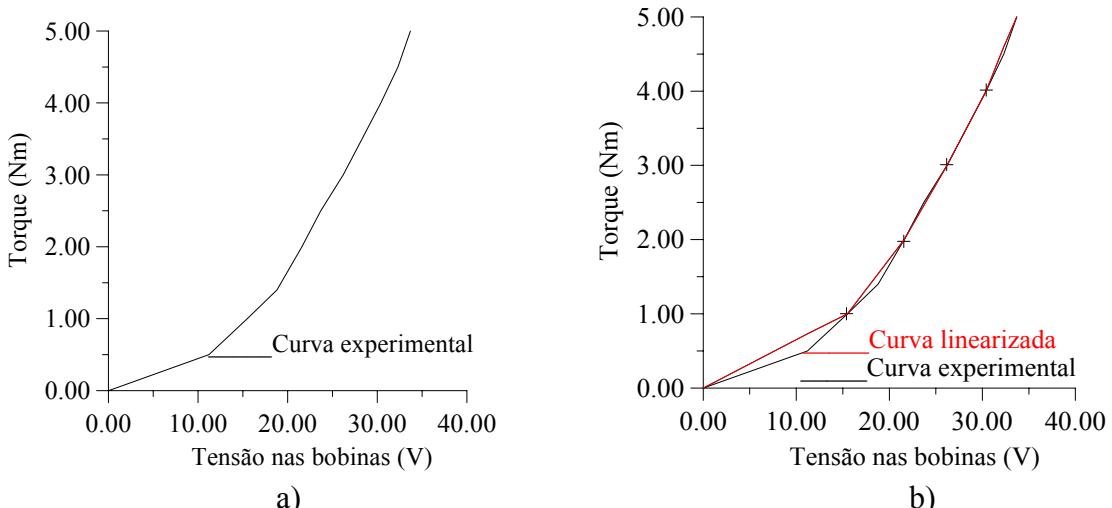


Figura 3. Curvas de excitação versus resposta da planta: a) experimental; b) experimental e linearizada

3. MODELO MATEMÁTICO DO SISTEMA

O modelo matemático do sistema foi obtido usando a técnica de identificação de parâmetros com entradas do tipo degrau, e amplitudes correspondentes a 1,0; 2,0; 3,0 e 4,0 Nm, já que optou-se por fazer a identificação em quatro pontos de operação (PO) distintos. Neste caso, usou-se o sistema em malha aberta e um tempo de amostragem de 30 ms. A curva de resposta do modelo identificado, no tempo, para um torque de 4,0 Nm é mostrada na Fig. (4a). As curvas para os outros pontos de operação (1,0; 2,0 e 3,0), não são mostradas para evitar a repetição de resultados.

Utilizando as curvas de resposta para os respectivos pontos de operação, determinou-se as funções de transferência da planta através do modelo de identificação BJ (Box Jenkins model), que é uma técnica de identificação paramétrica (Ljung, 1987), implantada no programa computacional MATLAB. A Fig. (4b) mostra a resposta obtida com o modelo identificado e a experimental, para um torque de 4,0 Nm.

A validação da identificação é feita comparando-se a curva do modelo identificado com a curva do sistema real (Aguirre, 2000). Um ajuste de parâmetros (sintonia) deve ser feito quando a aproximação das curvas não é considerada satisfatória. Isto não foi necessário para o sistema em estudo, tendo em vista os resultados obtidos como mostra a Fig. (4b). Neste caso, os modelos obtidos foram adotados para representar a dinâmica da planta nos pontos de operação considerados.

Segundo Aguirre (2000), é recomendado comparar a resposta da função identificada com a resposta experimental para outros pontos de operação, para validar o modelo. Entretanto, neste caso, devido à não-linearidade da planta, este procedimento não é válido.

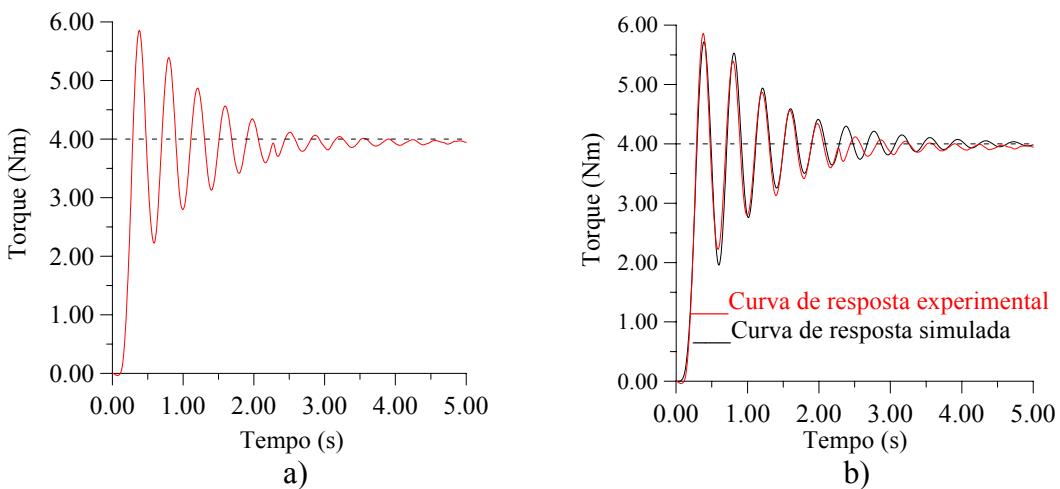


Figura 4. Curva de resposta em malha aberta: a) experimental; b) simulada e experimental

A Equação (1) mostra o modelo identificado da planta na forma de estado, cujos coeficientes para os pontos de operação são dados na Tab. (1).

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} b \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} c & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad D = [0] \quad (1)$$

Na forma de equação tem-se:

$$\dot{X}(s) = AX(s) + BU(s) \quad e \quad Y(s) = CX(s) \quad (2)$$

onde $\dot{X}(s)$ é a derivada de $X(s)$.

Tabela 1. Coeficientes das matrizes de estado correspondentes aos pontos de operação

Coefic. →	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	b	c
PO ↓							
1,0 Nm	-12,89	-481,48	-4,19.10 ³	-5,41.10 ⁴	-2,23.10 ⁵	1,14.10 ⁵	1,00
2,0 Nm	-14,39	-508,93	-4,8.10 ³	-5,97.10 ⁴	-2,23.10 ⁵	2,07.10 ⁵	1,00
3,0 Nm	-14,34	-511,29	-4,85.10 ³	-6,03.10 ⁴	-2,73.10 ⁵	4,85.10 ⁵	1,00
4,0 Nm	-11,71	-438,20	-3,51.10 ³	-4,40.10 ⁴	-1,69.10 ⁵	2,66.10 ⁵	1,00

4. CONCEITOS BÁSICOS DE GANHO ESCALONADO

O principal problema no projeto de sistemas, com ganho escalonado, é encontrar as variáveis adequadas para servir de referência, o que é geralmente feito com base no sistema físico. Quando a variável é escolhida, os parâmetros dos controladores são calculados, para um número de condições de operação, usando técnicas de controle adequadas. Algumas vezes é possível obter escalonamento de ganho, através de linearização de atuadores, em que a resposta do sistema não depende das condições de operação da planta, mas, dos valores de referência.

Além da linearização de atuadores, esta metodologia utiliza outras técnicas como: a) ganho escalonado baseado na medição das variáveis auxiliares; b) através da variação do tempo de amostragem; c) transformação não-linear (Aström, 1995). A Fig. (5) mostra um diagrama de blocos de um sistema com ganho escalonado.

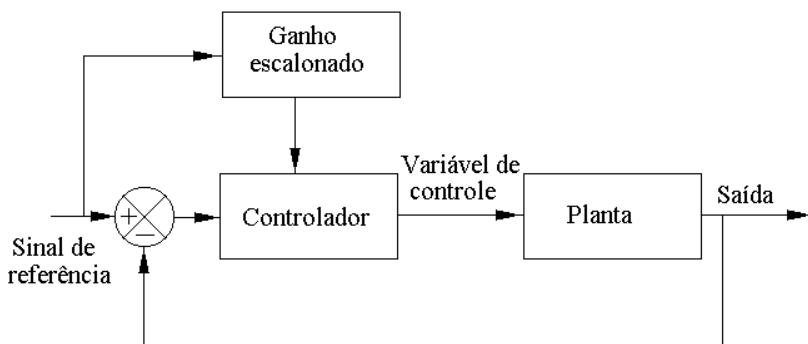


Figura 5. Diagrama de blocos de um sistema com ganho escalonado

5. PROJETO DE CONTROLADORES VIA ALOCAÇÃO DE PÓLOS

O projeto de controladores via alocação de pólos é baseado no modelo de espaço de estado do sistema e permite que todos os pólos da função de transferência sejam situados na posição desejada, o que torna necessário a medição de diversas variáveis do sistema. Em muitas aplicações, não se podem medir todas as variáveis, devido ao custo ou falta de transdutores adequados, e então são estimadas (Phillips e Habor, 1996).

O procedimento de projeto, portanto, se constitui em um primeiro estágio onde determina-se a matriz de ganho de retroação K que conduz à dinâmica desejada para o sistema, e um segundo estágio onde determina-se o ganho do observador K_e, que conduz à estimativa das variáveis não mensuráveis.

O requisito para a aplicação da técnica de controle via alocação pólos é que o sistema seja a estados completamente controláveis. Para um sistema do tipo zero, o projeto consiste em inserir um integrador (Ogata, 2003) no caminho do ramo direto, entre o comparador de erro e a planta, conforme mostrado na Fig. (6), obedecendo a seguinte lei de controle:

$$U(s) = -KX(s) + K_I \varepsilon = -K_1 X_1(s) - K_2 X_2(s) - \dots - K_n X_n(s) + K_I \varepsilon \quad (3)$$

onde K é o vetor constante de ganho de retroação.

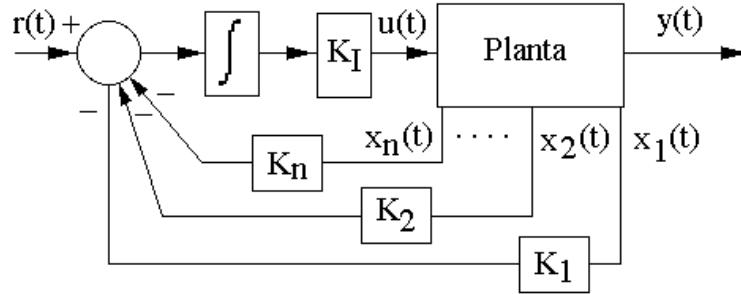


Figura 6. Diagrama de blocos do sistema em malha fechada com alocação de pólos

Um observador de estado estima as variáveis de estado com base nas medições das variáveis de saída e de controle. Neste caso, os ganhos do observador K_e só podem ser determinados se e somente se a condição de observabilidade for satisfeita.

Considerando o sistema representado pela Eq. (1), a expressão para o observador é escrita como:

$$\dot{\hat{X}}(s) = (A - K_e C) \hat{X}(s) + BU(s) + K_e Y(s) \quad (4)$$

onde $\hat{X}(s)$ é a variável estimada e $\dot{\hat{X}}$ é a sua derivada.

Segue que a variável de controle por retroação de estado observado $U(s)$ é:

$$U(s) = -K\hat{X}(s) + K_I \varepsilon(s) \quad (5)$$

onde $\varepsilon(s)$ é a integral do erro.

Substituindo a Eq. (5) na Eq. (4) tem-se:

$$U(s) = G_{1C}(s)Y(s) + G_{2C}(s)K_I \varepsilon(s) \quad (6)$$

onde:

$$G_{1C}(s) = -K(sI - A + K_e C + BK)^{-1} K_e \quad (7)$$

e

$$G_{2C}(s) = 1 - K(sI - A + K_e C + BK)^{-1} B \quad (8)$$

A Figura (7) mostra o diagrama de blocos do sistema com o controlador-observador.

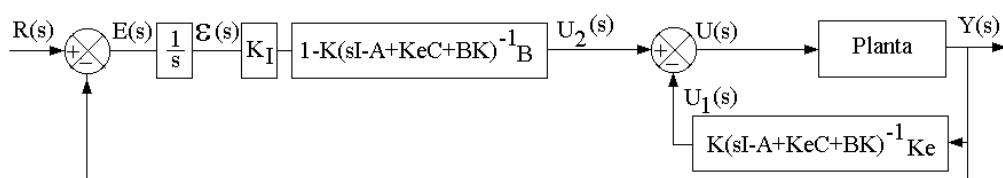


Figura 7. Diagrama de blocos do sistema com controlador-observador

6. PROJETO DO CONTROLADOR-OBSERVADOR

Para o projeto do controlador-observador, fez-se uma simulação no programa computacional MATLAB, para calcular os ganhos de retroação, através da imposição dos pólos de malha fechada. Estes pólos foram ajustados utilizando o processo de tentativa e erro, visando obter uma resposta ao degrau, sem sobresinal e com o menor tempo de estabelecimento. Depois de ajustados para um dos pontos de operação, estes mesmos pólos foram testados para os outros pontos, fornecendo também resultados satisfatórios. Diante disso, os pólos usados para o cálculo do conjunto dos ganhos de retroação, mostrados na Tab. (2), foram: $P_{1,2} = -5 \pm 5i$ e $P_3=P_4=P_5 = P_6 = -8$. Estes ganhos de retroação são dados por um vetor linha com seis elementos $[K_1 \ K_2 \ K_3 \ K_4 \ K_5 \ K_6]$, sendo o elemento da sexta coluna correspondente ao valor de K_I (ganho integral) com o sinal positivo.

Tabela 2. Ganhos de retroação para os respectivos pontos de operação

Gan.de Ret. →	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_I
PO ↓						
1,0 Nm	$6,99 \cdot 10^{-1}$	$9,06 \cdot 10^{-1}$	$2,89 \cdot 10^{-2}$	$2,39 \cdot 10^{-3}$	$-2,55 \cdot 10^{-4}$	1,80
2,0 Nm	$-6,02 \cdot 10^{-1}$	$-7,69 \cdot 10^{-2}$	$1,30 \cdot 10^{-2}$	$1,18 \cdot 10^{-3}$	$1,33 \cdot 10^{-4}$	0,89
3,0 Nm	$-2,67 \cdot 10^{-1}$	$-3,41 \cdot 10^{-2}$	$5,44 \cdot 10^{-3}$	$5,00 \cdot 10^{-4}$	$5,70 \cdot 10^{-5}$	0,42
4,0 Nm	$-9,64 \cdot 10^{-2}$	$-8,42 \cdot 10^{-4}$	$1,49 \cdot 10^{-2}$	$1,19 \cdot 10^{-3}$	$1,14 \cdot 10^{-4}$	0,77

Para o cálculo dos ganhos do estimador K_e , é recomendado utilizar pólos mais rápidos que os pólos de malha fechada (Phillips e Habor, 1996; Ogata, 2003). Neste caso, usando o mesmo critério de ajuste utilizado para o cálculo dos ganhos de retroação, obteve-se os seguintes pólos: $P_{1,2} = -15 \pm 30i$ e $P_3=P_4=P_5 = -35$. Isto resultou nos ganhos do observador, os quais são dados por um vetor coluna de cinco elementos $[K_{e1}; K_{e2}; K_{e3}; K_{e4}; K_{e5}]$, cujos valores, para os quatro pontos de operação, são mostrados na Tab. (3).

Tabela 3. Ganhos do observador para os respectivos pontos de operação

Gan.do Obs. →	K_{e1}	K_{e2}	K_{e3}	K_{e4}	K_{e5}
PO ↓					
1,0 Nm	$1,22 \cdot 10^2$	$5,89 \cdot 10^3$	$1,32 \cdot 10^5$	$3,12 \cdot 10^5$	$-5,10 \cdot 10^7$
2,0 Nm	$1,21 \cdot 10^2$	$5,70 \cdot 10^3$	$1,23 \cdot 10^5$	$1,09 \cdot 10^5$	$-5,08 \cdot 10^7$
3,0 Nm	$1,21 \cdot 10^2$	$5,71 \cdot 10^3$	$1,23 \cdot 10^5$	$9,48 \cdot 10^4$	$-5,12 \cdot 10^7$
4,0 Nm	$1,23 \cdot 10^2$	$6,06 \cdot 10^3$	$1,42 \cdot 10^2$	$6,14 \cdot 10^3$	$-4,83 \cdot 10^7$

7. DISCRETIZAÇÃO DO CONTROLADOR-OBSERVADOR

Para implementar o controlador-observador, no programa computacional LabVIEW é necessário transformar as funções de transferência da forma contínua para a forma discreta (Hemerly, 1996).

Através do programa computacional MATLAB obteve-se as seguintes funções de transferência:

$$G_{1d}(z) = \frac{U_1(z)}{Y(z)} = \frac{a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3} + a_4 z^{-4} + a_5 z^{-5}}{1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3} + b_4 z^{-4} + b_5 z^{-5}} \quad (9)$$

$$G_{2d}(z) = \frac{U_2(z)}{E(z)} = \frac{1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + c_3 z^{-3} + c_4 z^{-4} + c_5 z^{-5}}{1 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} + d_3 z^{-3} + d_4 z^{-4} + d_5 z^{-5}} \quad (10)$$

$$\frac{\varepsilon(z)}{E(z)} = \frac{0,03z^{-2}}{1 - z^{-1}} \quad (11)$$

onde $G_{1d}(z)$ e $G_{2d}(z)$ são as funções de transferência na forma discreta, $E(z)$ é o erro e $\varepsilon(z)$ a sua integral.

As Tabelas (4 e 5) mostram os coeficientes das funções de transferências dadas pelas Eqs. (9 e 10), respectivamente.

Tabela 4. Coeficientes para a função de transferência G_{1d}

Coefic. →	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅
PO ↓										
1,0 Nm	0,4599	-1,6791	2,2988	-1,3979	0,3184	-3,5191	5,0261	-3,6200	1,3218	-0,1938
2,0 Nm	0,2780	-1,0235	1,4144	-0,8693	0,2004	-3,5347	5,0651	-3,6684	1,3390	-0,1967
3,0 Nm	1,2120	-4,4665	6,1788	-3,8015	0,8773	-3,5345	5,0643	-3,6674	1,3385	-0,1966
4,0 Nm	1,4385	-5,1189	6,8027	-3,9949	0,8729	-3,5046	4,9919	-3,5978	1,3080	-0,1915

Tabela 5. Coeficientes para a função de transferência G_{2d}

Coefic. →	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅
PO ↓										
1,0 Nm	-3,7661	5,7241	-4,3807	1,6850	-0,2601	-3,5191	5,0261	-3,6200	1,3218	-0,1938
2,0 Nm	-3,7683	5,7304	-4,3875	1,6882	-0,2607	-3,5347	5,0651	-3,6684	1,3390	-0,1967
3,0 Nm	-3,7684	5,7307	-4,3877	1,6883	-0,2607	-3,5345	5,0643	-3,6674	1,3385	-0,1966
4,0 Nm	-3,7631	5,7158	-4,3721	1,6809	-0,2594	-3,5046	4,9919	-3,5978	1,3080	-0,1915

8. RESULTADOS

Com o projeto via alocação de pólos, elaborado em quatro pontos de operação, o controlador de ganhos escalonados, foi implementado no programa computacional LabVIEW, para quatro faixas de referência.

Depois de implementado no programa computacional LabVIEW, o controlador foi testado no sistema real, com os valores obtidos na simulação. Constatou-se, em todos os pontos de operação, que a resposta experimental, ao degrau, não apresentou sobresinal, porém, foi mais lenta do que a simulada.

Visando reduzir o tempo de estabelecimento, ajustou-se o ganho integral, resultando em um sobresinal que foi limitado para um máximo de 20%.

A Tabela (6) mostra as faixas de referência utilizadas para cada ponto de operação, inclusive os valores dos ganhos integral, simulados e experimentais.

A Fig. (8a) mostra as curvas de resposta ao degrau, do sistema real, nos pontos de operação e fora destes, e a Fig. (8b) mostra curvas de resposta ao degrau usando apenas a função de transferência identificada no ponto de operação de 2,0 Nm.

Tabela 6. Faixas de referência do sistema de controle

Ponto de operação (Nm)	Faixa de referência (Nm)	Ganho integral experimental	Ganho integral simulado
1,0	0,0 a 1,5	4,30	1,80
2,0	1,5 a 2,5	1,70	0,99
3,0	2,5 a 3,5	1,70	0,42
4,0	3,5 a 5,0	2,20	0,77

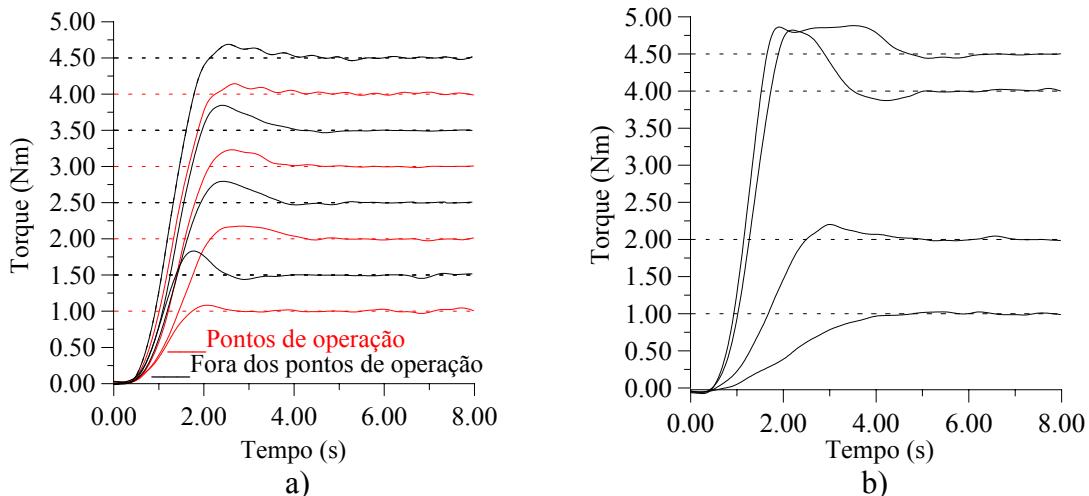


Figura 8. Curvas de resposta ao degrau do sistema: a) usando o controlador escalonado; b) usando o controlador via alocação de pólos, projetado com a função de transferência identificada no ponto de operação igual 2,0 Nm.

9. CONCLUSÃO

Analizando as curvas da Fig. (8a), constata-se que o sistema apresentou resultados similares para toda faixa de torque, com pequenas diferenças no sobresinal. Constatou-se também que no limite superior de cada faixa de operação, o sobresinal foi maior, porém, o tempo de estabelecimento diminuiu. Comparando a Fig. (8a), com a Fig. (8b) cujas curvas foram obtidas usando apenas uma função de transferência, para toda faixa de operação, constata-se a superioridade do ganho escalonado aplicado à plantas não-lineares. Neste caso, para degraus menores que 2,0 Nm, o sistema não apresentou sobresinal, mas tornou-se mais lento. Por outro lado, com degrau maior que 2,0 Nm, o sobresinal aumentou.

10. REFERÊNCIAS

- Astrom, J. K. & Wittenn, B. (1995). Adaptaive Control. Addisn-Wesley Publishing Company. Inc.
- Aguirre, L. A. (2000). Introdução à Identificação, Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas à sistemas reais. Ed. UFMG, Belo Horizonte - MG.
- Hemerly, E. M. (1996). Controle por Computador de Sistemas Dinâmicos, Editora Edgard Blucher LTDA - São Paulo - SP.
- Ljung, L. (1987). System Identification: Theory for the User, Ed. Prentce - Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Nise, N. S. (2002).Engenharia de Sistema de Controle. LTC Editora, Rio de Janeiro - RJ.
- Ogata, K. (2003). Engenharia de Controle Moderno. Prentice Hall, São Paulo-SP.
- Phillips, C. L. e Habor, R. D. (1996). Sistema de Controle e Realimentação. Editora Markon Books, São Paulo – SP.

- Rugh, W. J. (1991). Analytical Framework for Gain Scheduling, IEEE Control Syst. Mag., 11, 79-84.
- Shamma, J. S.; Athans, M. (1990). Analysis of Gain Scheduled Control for Nonlinear Plants, IEEE Trans. Automat. Cont., 35, 898-907.
- Shamma, J. S.; Athans, M. (1992). Gain Scheduling: Potencial Hazards and Possible Remedies, IEEE Control Syst. Mag., 12, 101-10.

11. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso neste trabalho.

TORQUE CONTROL SYSTEM WITH AN ELECTROMAGNETIC JOINING, USING A GAIN SCHEDULING THECNIQUE

Simplicio Arnaud da Silva - Department of Mechanical Technology - CT - UFPB - Campus I - CEP: 58059-900 - João Pessoa - PB, Fax: 2167186, e-mail: arnaud@dtm.ct.ufpb.br

Paulo Henrique de Miranda Montenegro - Post-Graduation Course in Mechanical Engineering – CT-UFPB - Campus I – CEP: 58.059. – João Pessoa-PB, Fax: 2167186, e-mail: phmontenegro@bol.com.br

José Antônio Riul - Department of Mechanical Technology - CT - UFPB - Campus I - CEP: 58059-900 - João Pessoa - PB, Fax: 2167186, e-mail: riul@ct.ufpb.br

Maria de Lourdes Guerra Luna - Post-Graduation Course in Mechanical Engineering – CT-UFPB - Campus I – CEP: 58.059. – João Pessoa-PB, Fax: 2167186, e-mail: mlgl@terra.com.br

Abstract - This work shows the design of controllers for a magnetic joining system aiming at the simulation of loads through the control of the torque. The system is constituted by a rotor, that rotates immersed in a magnetic field and is driven by the machine in test. The intensity of the magnetic field is controlled through a coil supplied by continuous current. To minimize the problems of nonlinearity of the plant, the gain scheduling technique was used, where the transfer function coefficients, of the controller are automatically selected because of the desired torque. Due to the difficulties of obtaining an analytic model of the plant, the technique of system identification was used in several operational points, and through simulations the parameters of the controllers were calculated using a control law based on the technique of poles allocation. Simulated and experimental results are presented.

Keywords. Systems identification, Dynamometer, Controller, Gain Scheduling.