

INVESTIGAÇÃO DE ESTRATÉGIA PARA IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS EM MALHA FECHADA APLICADA A DETECÇÃO DE FALTAS

ERICK M. ROCHA, WALTER BARRA JUNIOR, CLEONOR C. DAS NEVES, RENAN L. P. DE MEDEIROS, EDER D. FERREIRA, CARLOS T. DA COSTA JUNIOR

Laboratório de Automação Industrial, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará

Caixa Postal 479, 66075-110, Belém, PA, BRASIL

*E-mails: erickmr22@yahoo.com.br, walbarra@ufpa.br, cartav@ufpa.br,
cleonor.cneves@gmail.com, renanlandau@yahoo.com.br*

Abstract— The faults detection in closed loop system is a challenge due to the controller action. Many researches have been developed based on a system operating in open loop. However, by economic and security reasons, rarely industrial systems are operated in open loop. The default is operating such systems in closed loop form to ensure stability and desired performance. As a result, this work proposes the use of a tool to estimate the open loop transfer function from the data obtained in closed loop, in order to estimate parametric models for the faults investigation. The technique, which is investigated in this paper is the two-stage identification method, this methodology consists in unfold the identification process in closed loop into two sequential stages of identification in open loop. Partial results show a good performance of the proposed methodology.

Keywords— Systems identification, closed loop identification, two-stage method, fault detection.

Resumo— A detecção de faltas em sistemas operando em malha fechada é desafiadora devido à ação compensadora introduzida pelos controladores. Muitos estudos de pesquisa têm sido desenvolvidos tendo como base um sistema operando em malha aberta. No entanto, por razões econômicas e de segurança, raramente sistemas industriais são operados em malha aberta. O padrão é operar tais sistemas em malha fechada para garantir estabilidade e desempenhos desejados. Em vista disso, é proposto neste trabalho o uso de uma ferramenta para estimação da função de transferência de malha aberta a partir de dados obtidos em malha fechada, com o objetivo de estimar modelos paramétricos para investigação de faltas. A técnica investigada neste trabalho é o Método de Dois Estágios, o método consiste basicamente em desdobrar o processo de identificação em malha fechada em duas etapas sequenciais de identificação em malha aberta. Os resultados parciais mostraram o bom desempenho da metodologia proposta.

Palavras-chave— Identificação de sistemas, identificação em malha fechada, Método de Dois Estágios, detecção de faltas.

1 Introdução

O monitoramento de processos para detecção e diagnóstico de faltas em sistemas reais é sempre uma difícil tarefa, principalmente quando as faltas são incipientes ou mesmo imperceptíveis aos métodos clássicos de monitoramento. Alguns métodos de monitoramento para detecção de faltas, como análise de resíduos em modelos identificados, baseado na técnica do modelo do processo, proposto em Isermann (2006), prevê a medição de sinais de entrada e saída para estimação de modelos dinâmicos em processos em malha aberta, procedimento padrão na identificação de sistemas.

Para detecção de faltas baseado na análise paramétrica, um modelo deve ser obtido para avaliação do comportamento dos parâmetros identificados (Zhai *et al*, 2014). Como tratado na literatura, Aguirre (2007) e Coelho e Coelho (2015), sabe-se que, em malha aberta, através da relação entre os sinais de entrada e saída, é possível estimar bons modelos matemáticos para fins de controle e monitoramento. Porém, como discutido em Forssell (1999), sistemas em malha fechada apre-

sentam como problema fundamental no processo de identificação, a correlação entre o ruído imensurável e a entrada da planta, razão pela qual muito dos métodos de identificação em malha aberta falham quando aplicados diretamente em dados de medição de processos em malha fechada.

A aplicação de técnicas para estimar faltas em planta em malha aberta a partir de medidas obtidas em malha fechada é um tema relativamente novo, embora, o estudo envolvendo a identificação em malha fechada para fins de controle há muito tempo tem sido de interesse primordial em aplicações industriais (Forssell & Ljung, 1999). Desse modo, muito esforço tem sido feito para o desenvolvimento de técnicas que identifiquem modelos de malha aberta em plantas operando em malha fechada, visto que em muitos casos por razões de segurança, econômicas ou no caso de sistemas biológicos em que o efeito do controle é inerente ao processo, à remoção do controlador não é permitida durante o processo de identificação (Gustavsson *et al*, 1977) (Forssell, 2000).

A técnica abordada neste trabalho foi amplamente discutida em Van den Hof e Schrama (1993) e em Forssell (1999), e é conhecida como Método de Dois Estágios.

2 Método de Dois Estágios

O método se baseia na estimação da função de transferência em malha aberta, usando medições do sistema em malha fechada. Como propõem a técnica, a diferença entre os dois tipos de identificação, malha aberta ou malha fechada, está na origem dos dados utilizados para identificação, e não necessariamente na técnica utilizada neste processo (Forssell, 1999).

Esse método evita obter complicados conjuntos de modelos paramétricos, além de não exigir conhecimento da dinâmica do controlador C . Como sugere o próprio nome, o método é composto de dois estágios consecutivos de identificação que podem ser realizados usando métodos convencionais de identificação em malha aberta. O método aqui apresentado é baseado na filtragem- u .

2.1 Método da Filtragem- u

Uma das formas de aplicação do Método de Dois Estágios é obter um sinal de controle u (entrada da planta) descorrelacionado do ruído e , e de perturbações externas, que evidentemente poderiam levar a uma estimação inadequada do sistema.

Na primeira etapa do método, um sinal de controle u é estimado usando uma estimação da função sensibilidade S_0 , definida em (1).

$$S = \frac{1}{1+GC} \quad (1)$$

Para obtenção de S é utilizado algum método convencional de identificação em malha aberta, como os Mínimos Quadrados (MQ), ou a relação fundamental definida em (2).

$$S + T = 1 \quad (2)$$

Desde que T , a função sensibilidade complementar definida em (3), seja conhecida.

$$T = \frac{GC}{1+GC} \quad (3)$$

Em sequência, em uma segunda etapa, a partir do sinal de controle estimado e descorrelacionado do ruído, é estimada a função de transferência de malha aberta G_0 seguindo o mesmo procedimento da etapa anterior.

2.2 Etapas do Método de Dois Estágios

Inicialmente consideramos o arranjo experimental de malha fechada do sistema, como apresentado na Figura 1. Nesse primeiro momento, serão apresenta-

dos os passos para identificação em um sistema SISO, como descrito em Van den Hof e Schrama (1993).

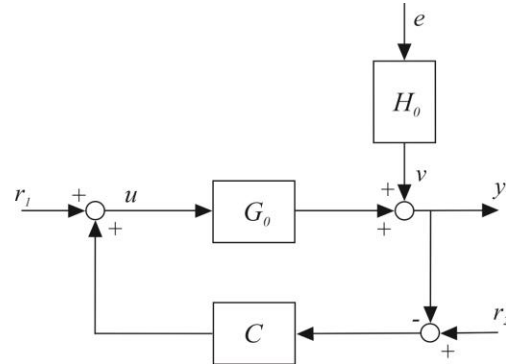


Figura 1. Sistema em malha fechada. (Fonte: Adaptado Van den Hof e Schrama, 1993).

Considera-se que r é um sinal externo mensurável, determinístico, e persistentemente excitado descorrelacionado do ruído e , e que a planta G_0 é estável em malha aberta. Da Figura 1 obtêm-se as expressões para o sinal de saída y e sinal de controle u em (4) e (5).

$$y(t) = G_0(q)u(t) + H_0(q)e(t) \quad (4)$$

$$u(t) = C(q)[r_2(t) - y(t)] + r_1(t) \quad (5)$$

Substituindo (4) em (5), tem-se:

$$u(t) = C(q)[r_2(t) - G_0(q)u(t) - H_0(q)e(t)] + r_1(t) \quad (6)$$

Pelo menos inicialmente não há interesse em separar os efeitos de r_1 e r_2 , e assim considera-se um sinal r equivalente dado por:

$$r(t) := r_1(t) + C(s)r_2(t) \quad (7)$$

e (6) torna-se

$$u(t) = -C(q)G_0(q)u(t) - C(q)H_0(q)e(t) + r(t) \quad (8)$$

Isolando $u(t)$ na equação (8) e considerando a função sensibilidade S_0 definida em (1), tem-se:

$$u(t) = S_0(q)r(t) - S_0(q)C(q)H_0(q)e(t) \quad (9)$$

Desde que r e e sejam sinais descorrelacionados (não se correlacionam), e que u e r sejam disponíveis por meio de medição, então é possível identificar a função sensibilidade S_0 em (9) como se fosse um sistema em malha aberta.

Como mencionado, usando estratégias de identificação clássicas, é possível identificar consistentemente S_0 independente das contribuições do ruído

na parcela $S_0(q)C(q)H_0(q)e(t)$ em (9). Com este propósito considere a seguinte estrutura de modelo:

$$u(t) = S(q, \beta)r(t) + R(q, \gamma)\varepsilon_u(t) \quad (10)$$

$\beta \in B \subset \Re^{d_\beta}, \gamma \in \Gamma \subset \Re^{d_\gamma}$

Onde $S(q, \beta)$ e $R(q, \gamma)$ são funções de transferência racionais parametrizadas independentes, e adequadamente obtidas por estimadores, cujos parâmetros reais β e γ são contidos nos seus respectivos conjuntos de valores admissíveis, B e Γ ; $\varepsilon_u(t)$ é o erro de predição de $u(t)$ um instante à frente. A estimativa $S(q, \hat{\beta}_N)$ de $S_0(q)$ é determinado pelo critério de mínimos quadrados do erro de predição baseado em $\varepsilon_u(t)$, dado pela seguinte equação,

$$\hat{\beta}_N = \arg_{\beta} \min_{\beta, \gamma} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varepsilon_u(t)^2 \quad (11)$$

A consistência de $S(q, \hat{\beta}_N)$ pode claramente ser alcançado quando $S_0(q) \in \mathcal{F} := \{S(q, \beta) | \beta \in B\}$.

A primeira etapa do Método de Dois Estágios consiste exatamente na estimação da função sensibilidade S . Finalizada esta etapa, o próximo passo é estimar a função de transferência de malha aberta do sistema usando a estimativa do sinal de controle u descorrelacionado do ruído e .

Assim dado (9) e considerando a condição de que r e e são descorrelacionados, então é possível obter um sinal de controle também descorrelacionado do ruído usando a seguinte relação.

$$u^r(t) := S_0(q)r(t) \quad (12)$$

Substituindo (9) em (4) e considerando a função sensibilidade definida em (1) obtém-se a relação entre u^r e a saída y .

$$y(t) = G_0(q)u^r(t) + H_0(q)e(t) \quad (13)$$

Desde que u^r e e sejam descorrelacionados e u^r disponível por medição, C pode ser estimado usando técnicas de identificação de sistemas em malha aberta.

Porém sabe-se que u^r não é conhecido, mas pode ser estimado usando a relação definida em (12) e o conhecimento prévio da função sensibilidade estimada como em (14).

$$u^r(t) = S(q, \hat{\beta}_N)r(t) \quad (14)$$

Assim podemos reescrever (13) como:

$$y(t) = G_0(q)\hat{u}^r(t) + S_0(q)H_0(q)e(t) + \dots \quad (15)$$

$$\dots + G_0(q)[S_0(q) - S_0(q, \hat{\beta}_N)]r(t)$$

O segundo passo do processo consiste em aplicar um método de identificação padrão do erro de predição, o objetivo é identificar G_0 , então assim como em (10), tem-se um conjunto de modelos para G_0 dado por:

$$u(t) = G(q, \theta)\hat{u}^r(t) + W(q, \eta)\varepsilon_y(t) \quad (16)$$

Onde $G(q, \theta)$ e $W(q, \eta)$ são parametrizados independentemente, para todo $\theta \in \Theta \subset \Re^{d_\theta}, \eta \in \Omega \subset \Re^{d_\eta}$. E a estimação dos parâmetros θ do conjunto $G(q, \theta)$ é dada por

$$\hat{\theta}_N = \arg_{\theta} \min_{\theta, \eta} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varepsilon_y(t)^2 \quad (17)$$

Onde $G(q, \theta)$ para os parâmetros $\hat{\theta}_N$ obtidos converge para $G_0(q)$.

3 Testes de Identificação usando o Método de Dois Estágios

O método será aplicado para identificação de modelos de plantas de primeira e de segunda ordem em malha fechada sob a ação de controlador. A proposta é obter modelos paramétricos da planta e compará-los com modelos reais para fins de detecção de faltas. Neste sentido, identificar bons modelos paramétricos significa obter um sistema de monitoramento mais confiável reduzindo erros de detecção de faltas.

3.1 Testes de Simulação em Planta de 1º Ordem

Inicialmente será considerado uma planta de primeira ordem $G(s)$ sob ação de um controlador PI em malha fechada. A função de transferência da planta no domínio s em malha aberta será:

$$G(s) = \frac{2}{s+1} \quad (18)$$

O controlador Proporcional-Integral (PI) desenvolvido para a constante de tempo desejada ($\tau = 0,2s$) é:

$$C(s) = 2,5 + \frac{2,5}{s} \quad (19)$$

Como discutido, o primeiro passo do Método de Dois Estágios consiste em obter uma boa aproximação para a função sensibilidade do sistema em malha fechada. Assim, considerando uma excitação do tipo degrau na referência r_2 , ver Figura 1, e sabendo-se que r_2 é descorrelacionado do sinal de ruído e , cuja intensidade é igual a $10^{-5} pu^2$, e, considerando-se que

os sinais de controle e referência, u e r_2 , podem ser obtidos por medição, a estimativa da função sensibilidade complementar $T(s)$ obtida usando técnica dos mínimos quadrados recursivos (MQR) é:

$$T(s) = \frac{0,9987}{0,1857s + 1} \quad (20)$$

Considerando a relação fundamental em (2), a função sensibilidade $S(s)$ é:

$$S(s) = \frac{s + 0,0068}{s + 5,385} \quad (21)$$

A Figura 2 apresenta a resposta em frequência para as duas funções de transferência

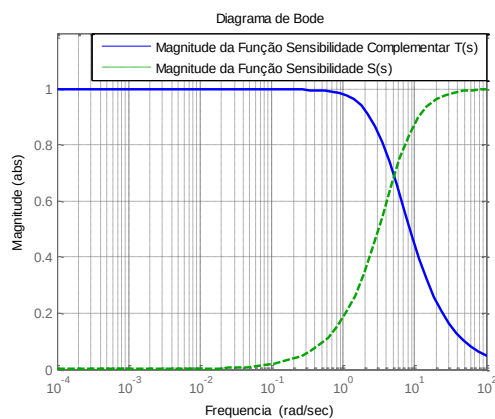


Figura 2. Magnitudes da resposta em frequência de $T(s)$ e $S(s)$.

Estimado um modelo adequado para a função sensibilidade $S(s)$, a próxima etapa é obter uma estimativa do sinal de controle u descorrelacionado do ruído e , denominado de $\hat{u}^r$, utilizando (14). Nesta etapa, deve-se considerar que o sinal de referência r_1 , ver Figura 1, e o sinal de ruído e são descorrelacionados, e que o sinal de saída y e o sinal de referência r_1 podem ser obtidos por medição. A Figura 3 apresenta o comportamento do sinal de controle medido u bem como da sua estimativa descorrelacionada do ruído $\hat{u}^r$.

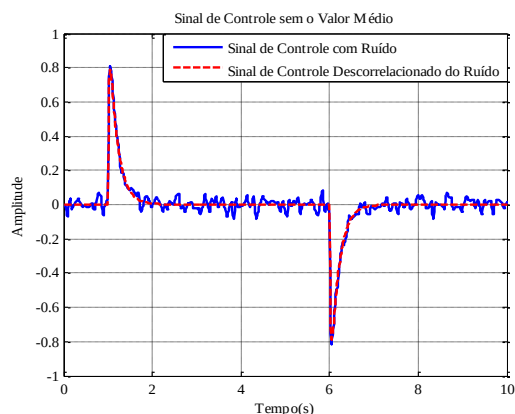


Figura 3. Sinal de controle real e o estimado por $S(s)$.

Como observado, a boa estimação da função sensibilidade $S(s)$ possibilitou obter uma boa estimação de $\hat{u}^r$, mesmo na presença de ruídos.

Na segunda etapa do Método de Dois Estágios, a estimativa do sinal de controle descorrelacionada do ruído $\hat{u}^r$, bem como os valores do sinal y , medidos na saída do sistema, são utilizadas na estimação do modelo para a função de transferência em malha aberta $\hat{G}_0$. Para isso, foi utilizada a técnica dos MQR. Como resultado, a estimativa obtida para a função de transferência de malha aberta no domínio de tempo discreto, com valores do desvio padrão dos parâmetros abaixo de 10^{-6} é:

$$\hat{G}_0(z^{-1}) = \frac{0,02145z^{-1}}{1 - 0,9890z^{-1}} \quad (22)$$

Utilizando-se o mapeamento inverso da discretização de Euler a seguinte estimativa foi obtida para $\hat{G}_0$ de s

$$\hat{G}_0(s) = \frac{1,958}{0,9075s + 1} \quad (23)$$

pode-se observar que o método permitiu obter uma estimativa relativamente precisa dos valores reais dos parâmetros com um erro relativo percentual de 2,10% de erro no valor do ganho estático e 9,25% de erro relativo percentual para a constante de tempo. Para fins de comparação, a Figura 4 apresenta a resposta em frequência do sistema real e identificado.

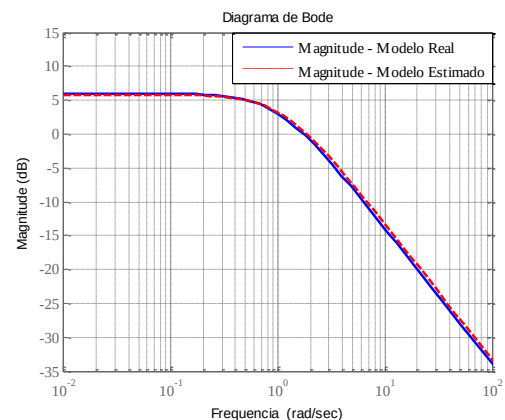


Figura 4. Resposta em frequência (modelo real e estimado).

Observa-se uma boa aproximação entre a planta real de malha aberta e o correspondente modelo estimado. Na detecção de faltas por análise paramétrica, o modelo obtido corresponderia à situação do sistema livre de faltas, sistema sadio, e qualquer variação dos a e b do modelo discreto seria um indicativo de possíveis avarias. Na sequência os parâmetros a e b , dos modelos em tempo discreto (domínio z) obtidos para diferentes valores de potência do ruído, são apresentados para análise quantitativa do efeito do ruído na

precisão dos modelos estimados, e consequentemente para a detecção de faltas por análise paramétrica.

Tabela 1. Modelos Estimados em Diferentes Graus de Ruído

Ruído (pu^2)	Parâmetro a	Parâmetros b	Precisão
0	-0,99005	0,01989	99,65%
10^{-8}	-0,98988	0,02008	96,50%
10^{-7}	-0,98986	0,02016	96,44%
10^{-6}	-0,98976	0,02043	94,92%
10^{-5}	-0,98904	0,02145	85,77%
10^{-4}	-0,98345	0,02606	50,68%
10^{-3}	-0,95897	0,04246	7,542%

Pela Tabela 1, observa-se que o ruído, como esperado, interfere na qualidade dos modelos estimados. No processo de detecção de faltas, a variação nos parâmetros do modelo estimado, devido a falhas no processo de identificação, compromete todo o sistema de diagnóstico de falta baseado na análise do modelo do processo. Desse modo, a qualidade dos sinais utilizados no processo de identificação é fundamental para que bons modelos sejam estimados, reduzindo erros de detecção de faltas e consequentemente alarmes falsos.

3.2 Testes de Simulação em Planta de 2º Ordem

Testes adicionais para verificar o desempenho do método de dois estágios foram realizados para identificar modelos de segunda ordem. O modelo de segunda ordem é da forma

$$\hat{G}_0(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (24)$$

onde $\omega_n = 2,0 \text{ rad/s}$ e $\xi = 0,1$ são, respectivamente, os valores da frequência angular natural e do amortecimento relativo. E o regulador PID projetado considerando máximo *overshoot* de 10% e tempo de acomodação de 2 segundos é:

$$C(s) = 11,85 + \frac{24,14}{s} + 4,4s \quad (25)$$

Em testes de simulação verificou-se que, sinais do tipo degrau utilizados para excitar persistentemente as referências r_1 e r_2 , ver Figura 1, não permitem extrair bons modelos, razão pela qual não são recomendados nem em testes de identificação de sistema em malha aberta (Coelho & Coelho, 2015). De posse disso foi projetado um sinal do tipo Sequência Binária Pseudoaleatória (SBPA).

Em Huang e Shah (1997) a escolha de modelos de ordem elevada da função sensibilidade, é justificada, teoricamente, na premissa de que modelos de ordem elevada conseguem representar mais fielmente as

principais dinâmicas de um processo. Assim, $T(s)$ e $S(s)$ foram escolhidos como funções de transferência de 4º ordem como apresentadas em (26) e (27). E a Figura 5, apresenta a complementaridade entre elas.

$$T(s) = \frac{0,5756s^3 + 2,922s^2 + 376,1s + 1403}{0,1857s^4 + s^3 + 123,5s^2 + 492,6s + 1403} \quad (26)$$

$$S(s) = \frac{s^4 + 2,286s^3 + 649,4s^2 + 627,1s - 1,585}{s^4 + 5,386s^3 + 665,1s^2 + 2653s + 7558} \quad (27)$$

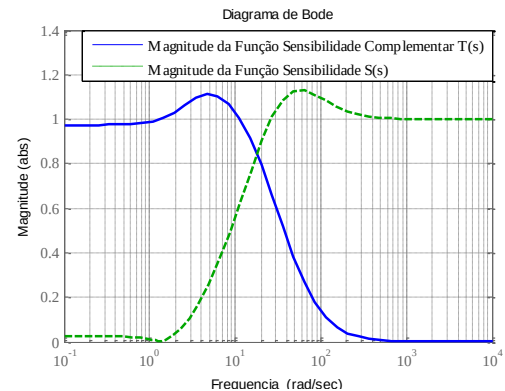


Figura 5. Magnitudes da resposta em frequência de $T(s)$ e $S(s)$.

Na sequência, a segunda etapa do Método de Dois Estágios consiste na estimação do sinal de controle $\hat{u}^r$ através da função sensibilidade $S(s)$. A Figura 6 apresenta o sinal de controle real e o sinal de controle estimado, neste caso o sinal de ruído foi considerado de baixa potência.

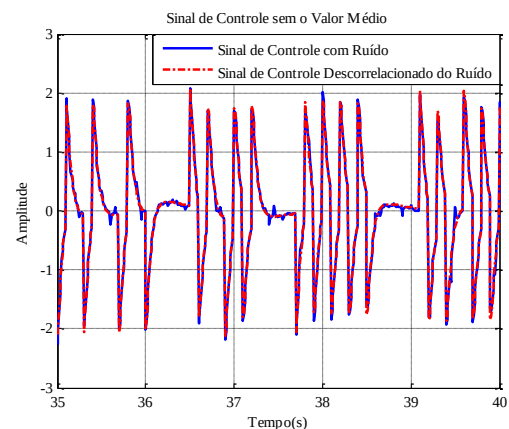


Figura 6. Sinal de controle real e o estimado a partir de $S(s)$

Novamente, observa-se a boa estimação do sinal de controle, importante resultado para a segunda etapa do processo. Assim, a função de transferência no domínio de tempo discreto obtida é a seguinte:

$$\hat{G}_0(z^{-1}) = \frac{0,0002177 + 0,0001522z^{-1}}{1 - 1,993z^{-1} + 0,9935z^{-2}} \quad (28)$$

E, usando-se o mapeamento inverso da discretização de Euler, a função de transferência de malha aberta estimada $\hat{G}_0(s)$ é dada por:

$$\hat{G}_0(s) = \frac{0,003265s + 3,712}{s^2 + 0,6507s + 3,521} \quad (29)$$

Dependendo da finalidade que se dará aos modelos, em um caso particular, a precisão fornecida pelo Método de Dois Estágios pode ser satisfatória. No caso estudado para o sistema subamortecido de segunda ordem, é possível observar analisando a magnitude do diagrama de Bode na Figura 7 que a estimação dos parâmetros da função de transferência de malha aberta foi relativamente precisa na estimação da frequência angular natural, o mesmo não ocorrendo no caso da estimação do valor do amortecimento relativo.

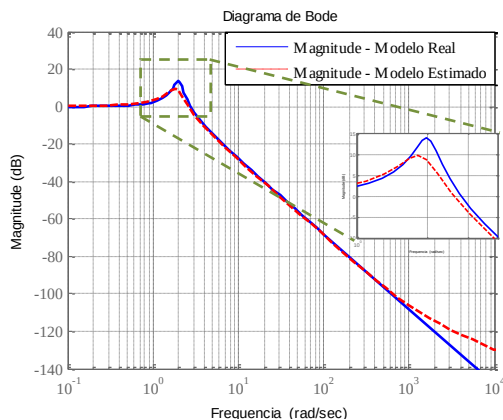


Figura 7. Resposta em frequência (modelo real e estimado).

Para fins de detecção de faltas e monitoramento de sistemas, o ideal é a identificação de modelos com menor erro de estimação possível. Analisando-se os resultados da Figura 7, observou-se que o Método de Dois Estágios não estimou adequadamente nas vizinhanças da frequência de ressonância, o que poderia tornar este modelo inadequado ao monitoramento do sistema.

4 Conclusão

O processo de detecção de faltas utilizando análise dos parâmetros do modelo no domínio z é uma estratégia com grande aplicabilidade no monitoramento de sistemas. Nesse sentido, o Método de Dois Estágios foi proposto como uma ferramenta para detecção de faltas à medida que nos fornece uma estimativa não polarizada dos parâmetros do modelo da planta em malha aberta. Baseado na Filtragem- u o método permitiu estimar modelos paramétricos do sistema em malha aberta sobre diferentes graus de intensidade do ruído. Os resultados preliminares de simulação mostraram a potencialidade do método adotado que permitiu dentro de certas restrições, estimar adequadamente os modelos com boa aproximação matemática.

Porém, observou-se que, mesmo simulando condições favoráveis como, por exemplo, sistema pouco ruidoso, a metodologia se mostrou passível a erros de

estimação. No caso do sistema de segunda ordem com baixo amortecimento relativo, foi apresentado um erro relativo percentual de 6,18% para ω_n e de 73,39% para ξ , o que provavelmente comprometeria a detecção da falta se esta estivesse relacionada ao amortecimento relativo. Neste sentido outras estratégias serão investigadas como o Método da Projeção de Forssell (1999), a fim de tornar mais confiável o processo de monitoramento.

Referências Bibliográficas

- Aguirre, L. A (2007). Introdução à Identificação de Sistemas: Técnicas Lineares e Não - Lineares Aplicadas a Sistemas Reais. Editora UFMG, 3ª edição, Belo Horizonte - MG.
- Åström, K. J. and Hägglund, T (2006). Advanced PID Control. Instrumentation, Systems, and Automation Society – ISA. Printed in the United States of America - USA.
- Coelho, A. A. R. e Coelho, L. dos S (2015). Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares. Editora da Universidade Federal de Santa Catarina (EdUFSC), 2ª edição revisada, Florianópolis - SC.
- Forssell, U (1999). Closed-loop Identification, Methods, Theory, and Applications. Department of Electrical Engineering, Linköping University, SE-581 83 Linköping, Sweden.
- Forssell, U. and Ljung, L (1999). Closed-loop Identification Revisited. Automatica, Vol. 35, No. 7, pp. 1215-1241.
- Forssell, U. and Ljung, L (2000). A Projection Method for Closed-loop Identification. IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 45, No.11, pp. 2101-2106.
- Gustavsson, I., Ljung, L and Söderström, T (1977). Identification of Processes in Closed Loop - Identifiability and Accuracy Aspects. Automatica, Vol. 13, pp. 59-75.
- Huang, B. and Shah, S. L (1997). Closed-loop identification: a two step approach. Journal of Process Control, Vol. 7, No. 6, pp. 425-438.
- Isermann, R (2006). Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Van den Hof, P. M. J. and Schrama, R. J. P (1993). An Indirect Method for Transfer Function Estimation from Closed Loop Data. Automatica, Vol. 29, No. 6, pp. 1523 - 1527.
- Zhai, S., Wang, W. and Ye H (2014). Fault diagnosis based on parameter estimation in closed-loop systems. IEEE Transactions on IET Control Theory & Applications, Vol. 9, No. 7, pp. 1146 - 1153.