

**VITOR ALEX OLIVEIRA ALVES**

**COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DIRETOS E DE DOIS-PASSOS NA  
IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS EM MALHA FECHADA**

Tese apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para a obtenção  
do título de Doutor em Engenharia Elétrica

São Paulo  
2011

**VITOR ALEX OLIVEIRA ALVES**

**COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DIRETOS E DE DOIS-PASSOS NA  
IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS EM MALHA FECHADA**

Tese apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para a obtenção  
do título de Doutor em Engenharia Elétrica

Área de Concentração:  
Engenharia de Sistemas

Orientador:  
Prof. Dr. Cláudio Garcia

São Paulo  
2011

## **AGRADECIMENTOS**

Durante os cinco anos em que me dediquei à realização deste trabalho, conheci diversas pessoas que contribuíram, em menor ou maior grau, ao alcance dos objetivos traçados. Em especial, agradeço ao Professor Rodrigo Alvite Romano pelos conselhos e sugestões de abordagem em minha linha de pesquisa. Não posso deixar de agradecer e reconhecer o apoio de velhos amigos que se mostraram ansiosos pelo bom andamento de meus estudos. Caros Professor Wilson Inacio Pereira e (quase) Engenheiro Tiago Sanches Silva, obrigado pela ajuda e paciência.

Gostaria de expressar minha intensa gratidão ao meu orientador, Professor Claudio Garcia, que sempre se mostrou aberto à discussão de modificações ou melhorias em meu trabalho. Professor, nossas reuniões foram de enorme valia. Além de discussões técnicas, as conversas sobre amenidades contribuíram sempre para o avanço do trabalho com bom humor e confiança. Obrigado pelo apoio.

Agradeço aos meus pais, que entenderam os momentos de apreensão e preocupação e que sempre me apoiaram com palavras amigas.

Finalmente, faltam-me palavras para expressar minha enorme e eterna gratidão à luz de minha vida. Obrigado pela compreensão, incentivo e principalmente por estar sempre ao meu lado – mesmo quando a preocupação com o andamento da tese me tornava mal-humorado. Sei que posso contar contigo em qualquer situação. Obrigado meu anjo, obrigado Aline.

*À luz de minha vida, meu farol e meu porto seguro.*

*Este trabalho é para você, Aline.*

*“Apaixonei-me por um olhar,*

*por um gesto de ternura.*

*Mesmo sem palavra alguma para falar.*

*Meu amor, a vida passa num instante.*

*E um instante é muito pouco para sonhar.”*

*Quando a gente ama, de Oswaldo Montenegro.*

## RESUMO

A Identificação de Sistemas em Malha Fechada possui considerável apelo prático, uma vez que oferece maior segurança durante a coleta experimental de dados e ao mesmo tempo, em linhas gerais, proporciona a construção de modelos mais adequados para servir de base ao projeto de sistemas de controle. Esta Tese apresenta, como um de seus principais objetivos, a comparação dos Métodos Diretos aplicados à Identificação em Malha Fechada com a classe dos Métodos de Dois-Passos, que se enquadram na abordagem de Identificação Conjunta Entrada/Saída. Complementando esta comparação, propõe-se um novo algoritmo em Dois-Passos, a Dupla Filtragem. As propriedades de convergência deste método são analisadas em detalhe. O desempenho alcançado pelos modelos identificados pelos Métodos Diretos e com o uso dos Métodos de Dois-Passos aqui considerados – a saber, Filtragem- $u$  (VAN DEN HOF; SCHRAMA, 1993), Filtragem- $y$  (HUANG; SHAH, 1997) e Dupla Filtragem – são comparados em uma abordagem estatística por meio da aplicação de Simulações de Monte Carlo. Também se propõe uma variante ao método da Filtragem- $u$ , proporcionando duas formas distintas de descrever a função de sensibilidade da saída associada ao processo sob estudo (FORSSSELL; LJUNG, 1999). Os critérios de comparação de desempenho adotados nesta tese incluem validações dos modelos identificados em simulações livres (operação em malha aberta), em que os objetos de análise são respostas a pulsos retangulares e, com maior ênfase, validações em malha fechada – que utilizam o mesmo controlador instalado no sistema sob estudo. Nesta última situação são empregados sinais de excitação de mesma natureza daqueles adotados nos ensaios de identificação, porém com diferentes realizações. Cada uma dessas validações é acompanhada de seu respectivo *fit* (LJUNG, 1999), índice de mérito que mede a proximidade entre as respostas temporais do sistema físico e de seu modelo matemático. Também são consideradas as respostas em frequência do processo, que constituem a base para a determinação do limite máximo para a incerteza associada ao modelo (ZHU, 2001). Tomando como fundamento tais limites máximos de incerteza, em conjunto com as

---

respostas em frequência dos modelos identificados, é possível associar graduações a esses modelos (A, B, C, ou D). Desta forma, esta tese utiliza índices de mérito fundamentados em ambas as respostas temporais e em frequência. Aspectos relativos à influência da amplitude e do tipo de sinal de excitação aplicado à malha, bem como à relação sinal-ruído estabelecida no sistema, são analisados. Também se investiga a relação entre a qualidade do modelo identificado e o ponto de aplicação do sinal de excitação: no valor de referência da malha de controle ou na saída do controlador. Por fim, verifica-se como a sintonia do controlador afeta o modelo identificado. Todas as simulações realizadas utilizam sinais de perturbação do tipo quase não-estacionário, típicos da indústria de processos (ESMAILI *et al.*, 2000). Os resultados indicam que os Métodos Diretos são mais precisos quando a estrutura de modelo e ordem adotadas são idênticas àquelas do processo real. No entanto, os Métodos de Dois-Passos são capazes de fornecer modelos muito confiáveis mesmo quando a estrutura e ordem do modelo diferem daquelas do processo sob estudo.

---

---

## ABSTRACT

Closed-loop System Identification has considerable practical appeal, since it provides increased security during the collection of experimental data and, at the same time, provides the construction of suitable models for the design of high performance control systems. This thesis presents, as one of its main objectives, a thorough comparison between Direct Methods (applied to the closed-loop identification) and Two-Step Methods. The latter ones belong to the Joint Input/Output approach. Complementing this comparison, a new two-step algorithm – the Double Filtering – is proposed. The convergence properties of this method are analyzed in detail. The performance achieved by the models identified by Direct and Two-Step methods is compared in a statistical approach through Monte Carlo simulations. The Two-Step methods considered in this thesis are the  $u$ -Filtering (VAN DEN HOF; SCHRAMA, 1993), the  $y$ -Filtering (HUANG; SHAH, 1997) and the Double Filtering. A variant of the  $u$ -Filtering method is proposed, providing two distinct ways of describing the output sensitivity function associated with the process under study (FORSSELL; LJUNG, 1999). The performance comparison criteria adopted in this thesis include free-run model validations (open-loop operation), in which rectangular pulses responses are analyzed. Greater emphasis is given to closed loop model validation, which uses the same controller installed in the system under study. This type of validation employs excitation signals similar to those adopted in the identification tests, but with different realizations. Each of these validations is accompanied by its corresponding *fit* (Ljung, 1999), a merit index that measures the proximity between the time responses of the physical system and its mathematical model. Process frequency responses are also considered, since they form the basis for determining the model uncertainty upper-limit or upper-bound error (ZHU, 2001). The upper-bounds, along with the frequency responses of each identified model, provides ranks (A, B, C, or D) for these models. Therefore, this thesis uses merit indexes based on both time and frequency responses. It is analyzed how the type and magnitude (or equivalently, the signal-to-noise ratio) of the excitation signal applied to the loop impacts the accuracy of the identified models. This work also investigates the

---



relationship between the accuracy of the identified models and the point of application of the excitation signal: the reference of the control loop or the controller output. Finally, it is checked how the controller tuning affects the identified models. All simulations employ quasi non-stationary disturbance signals, typical of the process industries (ESMAILI *et al.*, 2000). The results indicate that Direct Methods are more accurate when the model structure and order adopted in the identification are identical to those of the actual process. However, the Two-Step Methods are capable of providing very reliable models even when the adopted structure and order differ from those of the process under study.

---

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Objetivos .....	1
1.2 Motivação .....	4
1.2.1. Experimentos em Malha Fechada: Por que utilizá-los? .....	6
1.2.2. Modelos Aproximados: Por que utilizá-los? .....	9
1.2.3. Resumo .....	12
1.3 Sumário Estruturado da Tese .....	12
1.4 Principais Contribuições .....	14
2. IDENTIFICAÇÃO EM MALHA FECHADA .....	16
2.1 Identificação de Sistemas – Conceitos Básicos .....	16
2.1.1. Definições .....	17
2.1.2. O Ciclo da Identificação de Sistemas .....	18
2.2 Métodos de Erro de Predição .....	21
2.2.1. Fundamentos .....	22
2.2.2. Propriedades da Estimativa Limite .....	25
2.2.3. Distribuição Assintótica das Estimativas dos Parâmetros .....	30
2.2.4. Variância Assintótica das Estimativas das Funções de Transferência ....	32
2.3 Dados Experimentais colhidos em Malha Fechada .....	33
2.4 Estrutura de Sistemas com Operação em Malha Fechada .....	36
2.5 Abordagens para a Identificação em Malha Fechada .....	41
2.5.1. Método Direto .....	43
2.5.2. Métodos Indiretos .....	43
2.5.3. Identificação Conjunta Entrada-Saída .....	46
2.5.4. Propriedades das Estimativas Limite: Uso das diferentes Abordagens ...	50
2.5.5. Variância Assintótica das Estimativas das Funções de Transferência ....	55

---

## Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

