

# OTIMIZAÇÃO DO CONTROLE DA MASSA DE REVESTIMENTO DE ZINCO EM UMA LINHA DE GALVANIZAÇÃO POR IMERSÃO A QUENTE UTILIZANDO CONTROLADORES ROBUSTOS<sup>1</sup>

*Cid Jorge Interaminense Rodrigues<sup>2</sup>  
Heyne Rodrigues de Lima<sup>3</sup>  
Silvan Rocha Pordeus<sup>4</sup>  
Marcelo Vieira Corrêa<sup>5</sup>  
Fabrício de Souza Fernandes<sup>6</sup>*

## **Resumo**

Este trabalho tem como objetivo investigar as técnicas de projeto de controladores robustos a partir de modelos identificados em malha fechada e aplicá-las na otimização da massa de revestimento de zinco em uma linha de galvanização por imersão a quente. Esta abordagem permite a realização do experimento de identificação durante a operação normal da planta, com interferência mínima e sem interrupção da produção. A implementação do novo controlador otimizou o desempenho do processo, com redução significativa de material não conforme durante as transições de espessura das bobinas e mudanças no *set point* da massa de revestimento.

**Palavras-chave:** Controle robusto; Identificação de sistemas em malha fechada; Identificação para controle; Galvanização por imersão a quente.

## OPTIMIZATION OF COATING MASS CONTROL IN A HOT DIP CONTINUOUS GALVANIZING LINE USING ROBUST CONTROLLERS

## **Abstract**

This work has as objective to investigate the techniques of robust controllers design from models identified in closed loop and to apply them in the optimization of coating mass control in a hot-dip continuous galvanizing line. This approach allows the accomplishment of identification experiment during the plant normal operation, with minimum interference in the production. The implementation of the new controller optimized the process performance; with significant reduction of non conform materials during the coil thickness transitions and changes in set point of the coating mass.

**Key words:** Robust control; Closed loop system identification; Identification for control; Hot-dip continuous galvanizing line.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao XI Seminário de Automação de Processos, 3 a 5 de outubro, Porto Alegre-RS*

<sup>2</sup> *Membro da ABM, Engenheiro Eletricista, M.Sc.,CQE, Superintendência de Projetos, Instrumentação e Automação, Usiminas, Ipatinga, MG.*

<sup>3</sup> *Engenheiro Metalúrgico, CQE, Gerência de Unidade Técnica, Unigal, Ipatinga, MG.*

<sup>4</sup> *Membro da ABM, Engenheiro Eletricista, CQE, Superintendência de Projetos, Instrumentação e Automação, Usiminas, Ipatinga, MG.*

<sup>5</sup> *Engenheiro Eletricista, Dr., Departamento de Engenharia Elétrica da Unileste, Coronel Fabriciano, MG.*

<sup>6</sup> *Engenheiro Eletricista, M.Sc., Departamento de Engenharia Elétrica da Unileste, Coronel Fabriciano, MG.*

## 1 INTRODUÇÃO

A Teoria de Identificação de Sistemas, também conhecida como modelagem empírica, é a área do conhecimento que estuda maneiras de modelar e analisar sistemas a partir de observações, ou seja, de dados.<sup>(1)</sup> O modelo matemático originário desta abordagem deve ser capaz de reproduzir a dinâmica dominante do processo a ser modelado, a partir do qual, um controlador poderá ser projetado para atingir determinado desempenho ao ser aplicado no sistema real. Mas, por melhor que possa ser, um modelo nunca será perfeito. Sempre estará associado um erro decorrente de ruídos e distúrbios existentes no processo. Ou então, alguma informação relevante não está contida nos dados coletados. Isto quer dizer que, um controlador projetado para atingir um determinado desempenho, a partir deste modelo, poderá falhar quando for aplicado no processo real.

A Teoria de Controle Robusto parte do princípio que sempre haverá um erro associado ao processo de modelagem. Esta técnica utiliza os contornos deste erro para projetar controladores com garantia de estabilidade e desempenho.<sup>(2)</sup>

A partir da década de 1990 surgiu uma nova disciplina, chamada de Identificação para Controle, cujo objetivo é integrar a Teoria de Identificação de Sistemas com a Teoria de Controle Robusto. Com esta nova visão, o experimento de identificação deveria ser projetado de tal forma que o modelo nominal e o contorno do erro obtidos fossem apropriados para o projeto de controladores de alto desempenho.<sup>(3)</sup>

Dentre as pesquisas desenvolvidas, duas observações importantes merecem destaque:<sup>(4)</sup> a primeira é que “um modelo é considerado bom para o projeto de controladores se o desempenho em malha fechada do controlador, projetado a partir deste modelo, é aproximado quando o mesmo controlador for aplicado à planta real”; a outra é que “o experimento de identificação deve reproduzir condições similares às que o controlador será submetido, quando o mesmo for aplicado no processo real”.

A partir destas observações, pesquisas de diversos autores<sup>(5-8)</sup> chegaram à mesma conclusão, indicando que o experimento de identificação deveria ser conduzido com a planta sob-controle, ou seja, em malha fechada.

Segundo Forssell e Ljung,<sup>(6)</sup> esta abordagem foi rapidamente absorvida pela indústria, uma vez que utilizava as mesmas informações que já estavam sendo coletadas pelos computadores durante a operação normal da planta. Adicionalmente, esta constatação ajudou a quebrar o paradigma de que o experimento de identificação deveria ser realizado em malha aberta, provocando paradas indesejadas na produção.

A estimação dos parâmetros do modelo é realizada utilizando-se o método de identificação por Erro de Predição (PE), que é o melhor e mais utilizado método de identificação de modelos paramétricos.<sup>(3)</sup> Este método consiste em estimar um modelo nominal do processo e uma região de incerteza, baseada na matriz de covariância dos parâmetros estimados. Esta região contém o modelo real da planta com uma certa probabilidade, definida pelo projetista, por exemplo 95%, caso seja usada uma estrutura de modelo não-polarizada.

Nos trabalhos de Bombois et al.<sup>(9,10)</sup> são apresentadas medidas orientadas para controle robusto, que foram utilizadas por Gevers et al.<sup>(11,12)</sup> para implementar um *framework* de identificação e projeto de controladores robustos.

Rivera et al.<sup>(13)</sup> apresenta critérios para qualificar o projeto de experimento ótimo, que é definido como “o que tem o menor tempo de duração e o que provoca menos distúrbio no processo, conseqüentemente, o menos custoso, e que ao

mesmo tempo, irá fornecer informações suficientes da dinâmica do sistema para o projeto de controladores robustos”. Esta abordagem, é conhecida como *Plant-Friendly System Identification*.

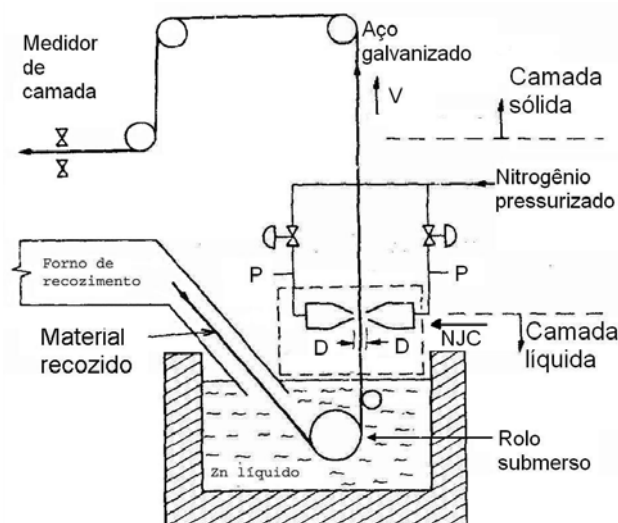
Em Fernandes,<sup>(14)</sup> é proposto um procedimento iterativo para identificação e síntese de controladores robustos. Nesta abordagem utilizam-se técnicas de otimização com algoritmo genético para integrar as ferramentas de análise ao processo de síntese do novo controlador.

O trabalho de Rodrigues<sup>(15)</sup> propõe um procedimento iterativo de identificação e controle robusto para desempenho em regime transitório, ou seja, quando deseje-se otimizar o comportamento transitório do processo durante repetidas alterações no *set point* da variável controlada. Este procedimento de identificação e controle robusto foi aplicado, com sucesso, em um processo industrial real, o qual será apresentado a seguir.

## 2 O PROCESSO DE GALVANIZAÇÃO POR IMERSÃO A QUENTE

A linha de galvanização por imersão a quente (CGL<sup>i</sup>) é o processo siderúrgico responsável pela aplicação de um revestimento de zinco sobre a superfície do aço, aumentando sua resistência à corrosão. Este revestimento permite que o aço seja aplicado, sem proteção adicional, em ambientes agressivos, como por exemplo telhas e paredes metálicas; ou pintadas, com uso intensivo nas indústrias automobilística, de eletrodomésticos e construção civil.

O revestimento é aplicado quando a tira, aquecida nos fornos de recozimento, passa pelo pote contendo zinco fundido. Ao sair do pote, a tira recebe um jato de nitrogênio da NJC<sup>ii</sup>, que retira o excesso de zinco, resultando em uma massa uniforme em ambos os lados da tira. Na Figura 1 são apresentados os equipamentos envolvidos no controle da massa de revestimento. As variáveis envolvidas neste controle são: pressão na NJC (P), distância efetiva entre a tira e a NJC (D) e a velocidade da linha (V).



**Figura 1** - Equipamentos e variáveis envolvidos no controle da massa de revestimento de zinco.

<sup>i</sup> CGL: Do inglês: *C*ontinuous *G*alvanizing *L*ine

<sup>ii</sup> NJC: Do inglês: *N*itrogen *J*et *C*oating

A velocidade da seção de revestimento é determinada, basicamente, pelas condições operacionais dos fornos de recozimento contínuo. Desta forma, o controle da massa de revestimento é realizado alterando-se a pressão (P) e a distância (D) na NJC.

### 3 O CONTROLE DE PRESSÃO NA NJC

O controle de pressão na NJC é realizado por um Sistema de Controle Distribuído (DCS) do sistema de automação da CGL. Os equipamentos de campo envolvidos no controle de pressão na NJC são mostrados na Figura 2.

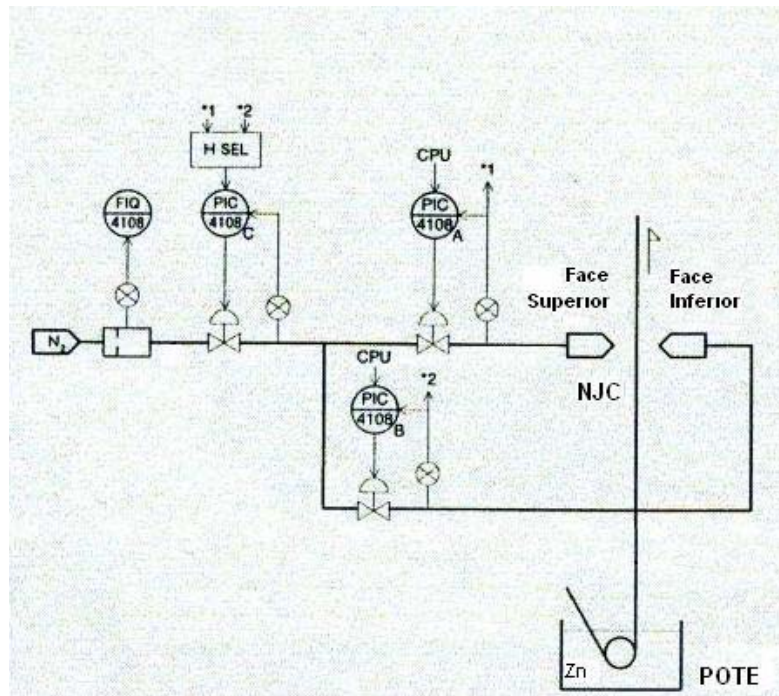
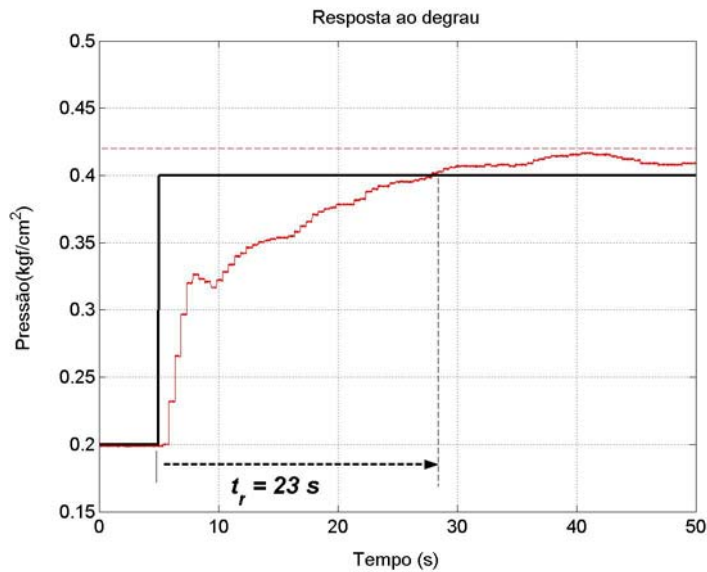


Figura 2 - Diagrama do controle de pressão na NJC.

Dois controladores PID<sup>iii</sup>, PIC4108A e PIC4108B, realizam o controle da pressão nas faces superior e inferior da tira, respectivamente. Os *set points* de pressão dos controladores, que variam de 0,2 a 1,3 kgf/cm<sup>2</sup>, são definidos pelo modelo matemático do sistema de automação, em função da massa de revestimento visada, da espessura da tira, da distância entre a tira e a NJC e da velocidade da linha. Um terceiro controlador, o PIC4108C, é responsável pelo controle da pressão anterior às duas válvulas principais.

Inicialmente, foram realizados experimentos para avaliar o desempenho do controlador e para obter informações sobre o comportamento da planta, como por exemplo: não-linearidades, constantes de tempo e atrasos de transporte. A faixa de pressão foi dividida em 4 partes e aplicou-se 4 degraus em malha fechada, um para cada faixa de pressão, com o controlador atual ativo. A figura 3 mostra a resposta do controle a um degrau de 0,2 para 0,4 kgf/cm<sup>2</sup> de pressão, observando-se um tempo de subida de 23 s. Considerando-se uma velocidade na seção central da linha de 2 m/s, durante as transições entre produtos com massas de revestimento e/ou espessuras diferentes, mais de 40 m no início da bobina ficam com a massa de revestimento fora da faixa.

<sup>iii</sup> PID – Controlador Proporcional-Integral-Derivativo



**Figura 3** - Resposta ao degrau da malha PIC4108A para a faixa de pressão 1.

A aprovação do produto depende da medição da massa de revestimento em laboratório, a partir de uma amostra retirada no início do produto, ou seja, na região onde ocorrem as transições de pressão na NJC. Caso a massa medida na amostra esteja fora da faixa, o produto deverá ser enviado para uma linha de rebobinamento para descarte da região afetada e retirada de uma nova amostra. Este procedimento, além de aumentar o custo de produção, gera uma quantidade excessiva de sucata, aproximadamente 50 m. Aumenta-se também o tempo de processamento dos produtos, atrasando o despacho para o cliente e aumentando o *lead time*<sup>iv</sup> do mesmo.

Outro problema observado durante a análise foi a ocorrência de sobre-sinal excessivo da pressão da NJC durante as transições. O sobre-sinal máximo admissível deve ser de 0,02 kgf/cm<sup>2</sup>. Este limite deve ser obedecido em toda faixa de pressão da NJC. O excesso de pressão deve ser evitado porque retira mais zinco do que o necessário, reduzindo a massa de revestimento resultante.

O tempo de subida ( $t_r$ ) e o sobre-sinal máximo ( $M_p$ ) obtidos do controlador existente, para cada faixa de pressão, são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1**- Resultado da avaliação preliminar.

Faixas	Pressão (kgf/cm <sup>2</sup> )	Tempo de subida (s)	Sobre-sinal (kgf/cm <sup>2</sup> )
1	0,2 → 0,4	23,0	0,019
2	0,5 → 0,7	12,0	0,025
3	0,8 → 1,0	8,0	0,026
4	1,1 → 1,3	5,0	0,020

A região de transição entre produtos é crítica e normalmente são realizados cortes no início e no final de cada produto. A partir destas observações, estabeleceram-se como critérios de desempenho o tempo de subida máximo de 10 s e o sobre-sinal máximo de 0,02 kgf/cm<sup>2</sup> em toda a faixa de pressão. O tempo de subida de 10 s propicia que a amostra, retirada do produto, esteja numa região onde a pressão na NJC e, conseqüentemente, a massa de revestimento, já esteja

<sup>iv</sup> *Lead time*: Termo em inglês que significa “período entre a programação e o acabamento de um produto”.

estabilizada e dentro dos limites de controle. De acordo com a tabela 1, este tempo foi ultrapassado nas faixas 1 e 2. Verificou-se também que o sobre-sinal máximo ultrapassou o limite permitido nas faixas 2 e 3.

Através destes experimentos, observou-se que o processo possuía comportamentos dinâmico e estático não-lineares, o que justificou o projeto de 4 novos controladores, um para cada faixa de pressão.

#### 4 OTIMIZAÇÃO DO CONTROLADOR DE PRESSÃO NA NJC

O procedimento iterativo de identificação e controle robusto, descrito em Rodrigues<sup>15</sup>, e aplicado na otimização do controlador de pressão da NJC foi desenvolvido a partir de experimentos de identificação, obtenção dos modelos e das regiões de incerteza e a síntese dos controladores.

##### 4.1 Experimentos de Identificação

Utilizou-se para a realização do experimento um computador portátil, equipado com um cartão de aquisição de dados, e o software MATLAB.

O período de amostragem utilizado foi de 500 ms, sendo este o mesmo período utilizado na varredura das malhas de controle de pressão existentes.

O experimento de identificação do sistema foi realizado em malha fechada, utilizando-se o método de identificação indireto. Este método consiste em aplicar o sinal de excitação na entrada  $r_1$ , somado ao *set point*  $sp$  do sistema em malha fechada, conforme mostra a Figura 4.

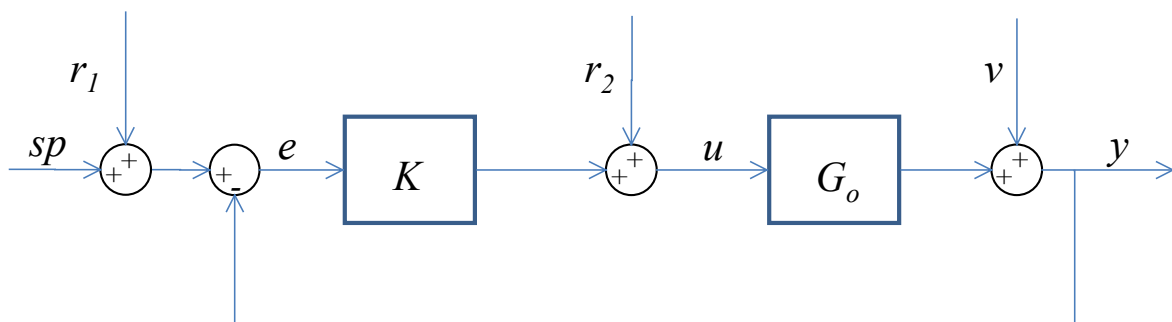


Figura 4 - Diagrama de blocos do sistema em malha fechada.

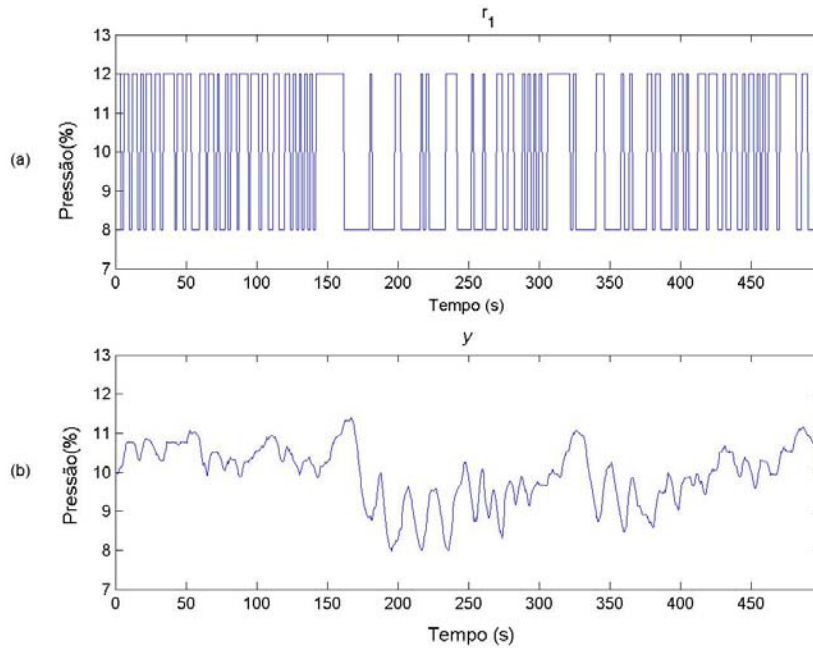
Na Figura 4,  $K$  corresponde ao controlador,  $G_o$  é o processo real,  $r_1$  e  $r_2$  são as possíveis entradas para os sinais de excitação,  $sp$  é o *set point*,  $e$  é o erro de controle,  $u$  é a entrada de controle,  $v$  é o distúrbio existente no processo e  $y$  é a saída.

Para o sinal de excitação foi escolhido o PRBS<sup>v</sup>, cujo período mínimo de variação em cada patamar foi de 2 s. A amplitude do PRBS foi de 0,06 kgf/cm<sup>2</sup>, correspondendo a uma variação de 2% no *set point* de pressão.

A duração de cada experimento foi de 500 s, permitindo a coleta de 1.000 amostras de cada variável.

O sinal de excitação foi somado ao *set point* do controlador, o qual foi mantido constante no centro de cada faixa, ou seja, 0,3 kgf/cm<sup>2</sup>, 0,6 kgf/cm<sup>2</sup>, 0,9 kgf/cm<sup>2</sup> e 1,2 kgf/cm<sup>2</sup>. Os dados de identificação para a faixa 1 são mostrados na Figura 5.

<sup>v</sup> PRBS: Sinal binário pseudo-aleatório. Em inglês *Pseudo Random Binary Signal*.



**Figura 5** - (a) Sinal PRBS e (b) Saída  $y$ .

Na Figura 5 foram considerados os dados de entrada e saída normalizados, sendo que 10% de pressão corresponde a  $0,3 \text{ kgf/cm}^2$ .

#### 4.2 Obtenção dos modelos e das regiões de incerteza

O método de identificação PE foi utilizado para estimar os parâmetros dos modelos matemáticos a partir dos dados coletados. Para verificar a resposta dos modelos identificados, comparou-se o *best fit*<sup>vi</sup> dos modelos em malha fechada. Os valores obtidos são mostrados na Tabela 2.

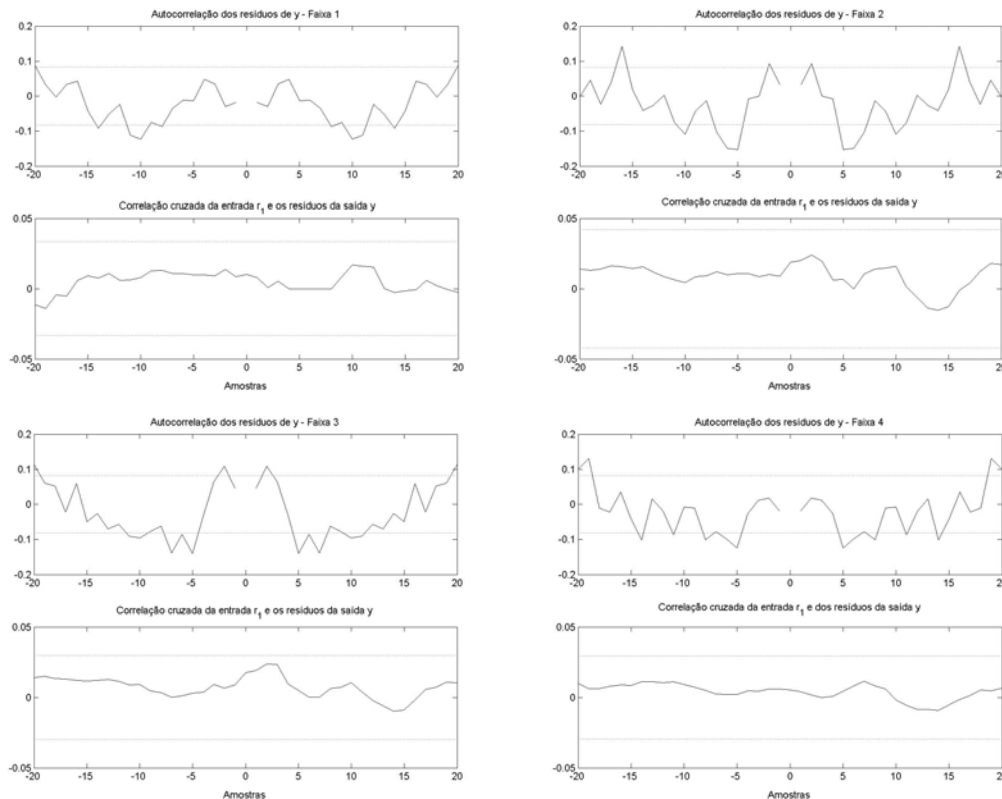
**Tabela 2:** *Best fit* dos modelos obtidos.

Faixas	<i>Best fit</i> (%)
1	62,10
2	42,49
3	34,38
4	39,40

O *best fit* é um indicativo da precisão dos modelos identificados. Porém, quando o objetivo é o projeto de um controlador, o que realmente importa é o desempenho que o controlador projetado terá quando for aplicado na planta real<sup>16</sup>. Neste caso, a precisão do modelo não é relevante.

A seguir, foi feita a validação estatística através da auto-correlação entre os resíduos da saída  $y$  e a correlação cruzada entre a entrada  $r_1$  e a saída  $y$ , considerando um intervalo de confiança de 99%, as quais são apresentadas na Figura 6.

<sup>vi</sup> *Best fit*: Termo em inglês que significa "o percentual da variação da saída real que é reproduzida pelo modelo, a partir dos dados de entrada", conforme definido no Matlab.



**Figura 6** - Auto-correlação e correlação cruzada, utilizando intervalo de confiança de 99%.

Observa-se que a auto-correlação entre os resíduos da saída  $y$  apresentou valores fora do intervalo de confiança devido à realimentação da malha fechada, que faz com que o ruído presente na saída afete o comportamento do controlador, interferindo na saída do processo. A validação através da correlação cruzada entre a entrada  $r_1$  e os resíduos da saída  $y$  foi válida para todos os modelos identificados.

A partir dos modelos identificados e das matrizes de covariância dos parâmetros, construiu-se as regiões de incerteza, utilizando-se uma probabilidade de 95%. Ou seja, estas regiões contêm os modelos reais com 95% de probabilidade.

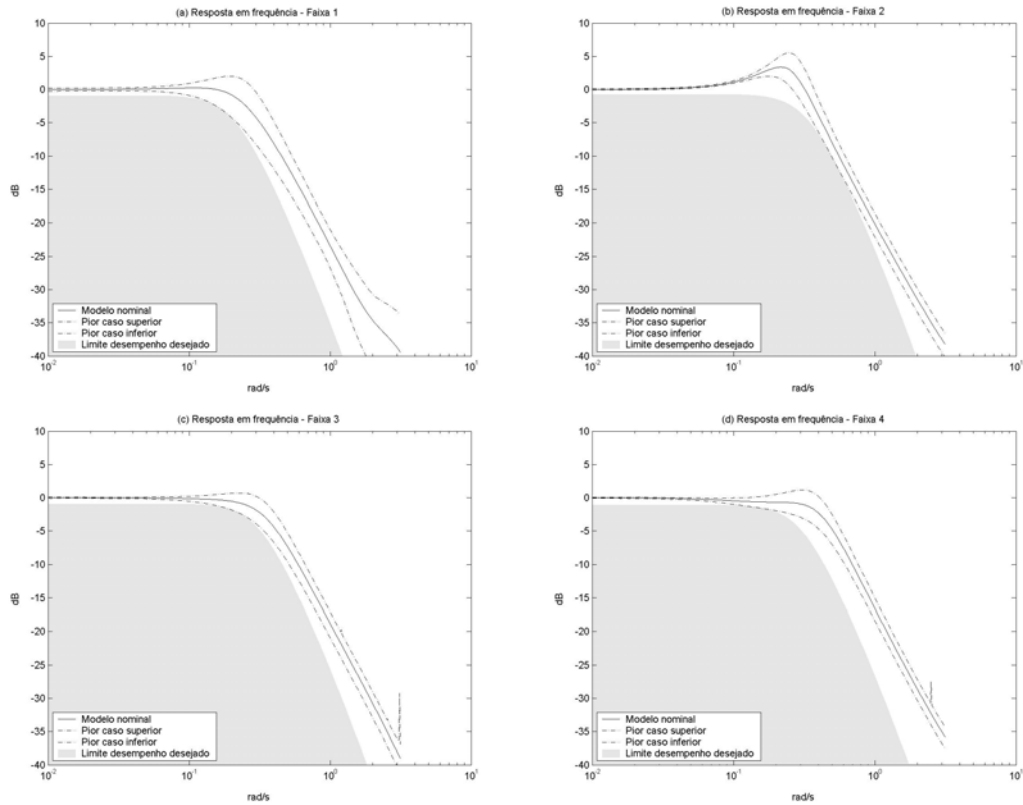
### 4.3 Sínteses dos Controladores

O controlador PID foi considerado neste projeto por possuir estrutura simples e já ser utilizado no controlador da planta. Foram desenvolvidos controladores apenas PI, uma vez que nos controladores existentes a ação derivativa não se encontrava implementada.

A síntese dos controladores foi realizada utilizando-se o Algoritmo Genético Real Polarizado (AGRP).<sup>(17)</sup> Além de encontrar o controlador ótimo, o AGRP encontra um conjunto de controladores estabilizantes que atendem ao critério de desempenho definido. Desta forma, é possível validar a região de incerteza, garantindo que existirá pelo menos um controlador que estabiliza e encontra o desempenho desejado quando aplicado ao sistema real.

A verificação do desempenho robusto é realizada no domínio da frequência. A partir do desempenho desejado, constrói-se um limite para a resposta em frequência do sistema em malha fechada. As respostas em frequência nominal e o pior caso inferior e superior, para os controladores projetados, são apresentados na Figura 7.



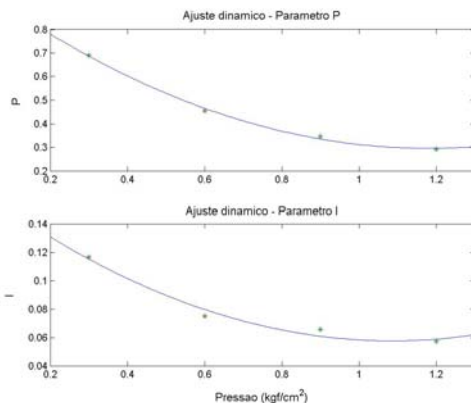


**Figura 7** - Resposta em frequência dos controladores para cada faixa de pressão.

Verificou-se que todos os piores casos inferiores das respostas em frequência estão acima do limite definido pela área hachurada na Figura 7, indicando que os controladores atingirão o desempenho esperado no processo real, com probabilidade de 95%, que foi a probabilidade definida na construção das regiões de incerteza. Os resultados obtidos pelo AGRP mostraram que as regiões de incerteza são orientadas para o projeto de controladores robustos.

## 5 IMPLEMENTAÇÃO

A idéia inicial era implementar os novos controladores de forma escalonada, de acordo com as faixas de pressão na NJC. Todavia, verificou-se que a variação dos parâmetros pode ser aproximada por funções quadráticas, conforme mostra a Figura 8.



$$P = 0,5047x^2 - 1,1913x + 0,9988,$$

$$I = 0,0928x^2 - 0,2020x + 0,1674,$$

**Figura 8** - Variação dos parâmetros P e I dos controladores em função da pressão.

O ajuste dos parâmetros foi implementado de forma dinâmica, ou seja, a cada *scan* do controlador, o DCS lê o valor da pressão atual, atualiza os parâmetros P e I e calcula a saída para a válvula de controle, sem a ocorrência de mudanças bruscas nos parâmetros.

## 6 RESULTADOS OBTIDOS

Os novos controladores, obtidos na primeira iteração do procedimento, foram aplicados no processo real. Os resultados são mostrados na Figura 9.

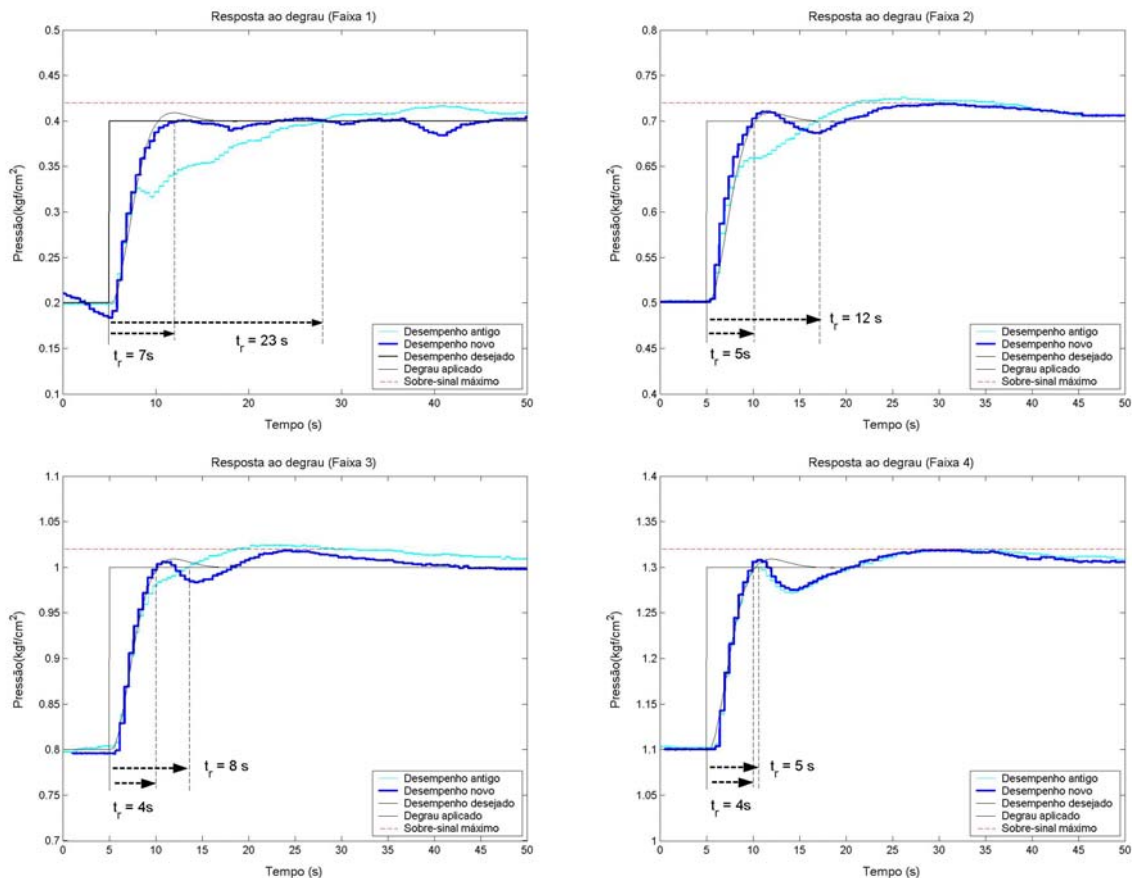


Figura 9 - Resposta ao degrau para cada faixa de pressão.

O tempo de subida e o sobre-sinal máximo, obtidos para todas as faixas de pressão, podem ser observados através das Figuras 10 e 11.

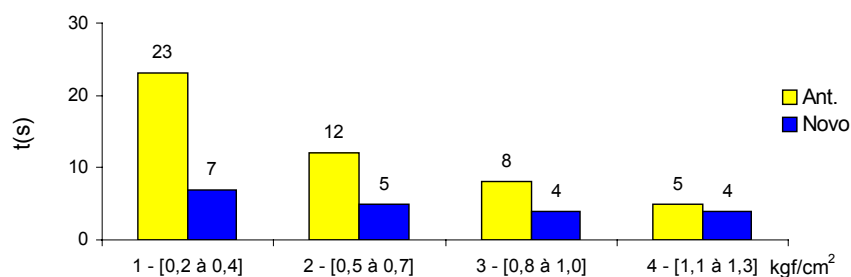
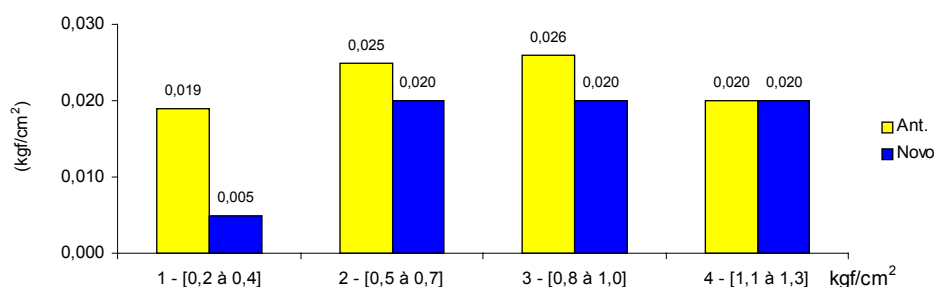


Figura 10 - Redução no tempo de subida para cada faixa de pressão.



**Figura 11** - Redução no sobre-sinal máximo para cada faixa de pressão.

Verifica-se que o tempo de subida e o sobre-sinal máximo ficaram dentro dos limites estabelecidos em todas as faixas de pressão.

Com o novo controlador de pressão obteve-se uma redução de 37% de material não conforme por peso de camada fora de faixa, eliminando também o repasse desse material em linhas de rebobinamento.

## 7 CONCLUSÃO

O procedimento iterativo de identificação e controle robusto, proposto por Rodrigues,<sup>(15)</sup> o qual utiliza técnicas de identificação em malha fechada associadas às ferramentas de controle robusto, se mostrou eficaz, atingindo os objetivos propostos com a realização de apenas uma única iteração.

Um único experimento de identificação foi realizado para cada faixa de pressão, minimizando os impactos negativos no processo.

Na utilização destas técnicas, os seguintes pontos podem ser destacados:

- realização do experimento de identificação em malha fechada, evitando grandes paradas na produção;
- projeto do experimento de identificação *plant-friendly*, ou seja, com o menor impacto possível no processo;
- a validação do modelo e da região de incerteza obtidos é realizada de acordo com critérios de projeto de controladores robustos; e
- os controladores projetados podem ser aplicados diretamente no processo real, uma vez que atingirão a estabilidade e desempenho desejados com probabilidade definida pelo projetista.

## REFERÊNCIAS

- 1 AGUIRRE, L. Introdução à identificação de sistemas: técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais. UFMG. 2004.
- 2 CODRONS, B. Experiment design issues in modelling for control. Tese de Doutorado, Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgium. 2000.
- 3 GEVERS, M. Identification for control: from the early achievements to the revival of experiment design. *European Journal of Control*, 11(4-5):335–352. 2005.
- 4 ANDERSON, B.; GEVERS, M. Fundamental problems in adaptative control. *Perspectives in Control, a Tribute to Ioan Doré Landau*, pp. 9–21. 1998.

- 5 FORSSELL, U. Properties and Usage of Closed-loop Identification Methods. Tese de Doutorado, Linköping University, Division of Automatic Control, Department of Electrical Engineering, S - 581 83 Linköping Sweden. 1997.
- 6 FORSSELL, U.; LJUNG, L. Some results on optimal experiment design. *Automatica*, 36:749–756. 2000.
- 7 CODRONS, B.; BOMBOIS, X.; GEVERS, M.; SCORLETTI, G. A practical application of recent results in model and controller validation to a ferrosilicon production process. 39th Conference on Decision and Control (CDC 2000), pp. 2444–2449. 2000.
- 8 LANDAU, I. Identification in closed loop: a powerful design tool (better design models, simpler controllers). *Control Engineering Practice*, 9:51–65. 2001.
- 9 BOMBOIS, X.; GEVERS, M.; SCORLETTI, G. A measure of robust stability for an identified set of parameterized transfer functions. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 45(11):2141–2145. 2000.
- 10 BOMBOIS, X.; GEVERS, M.; SCORLETTI, G.; ANDERSON, B. Robustness analysis tools for an uncertainty set obtained by prediction error identification. *Automatica*, 37:1629–1636. 2001.
- 11 GEVERS, M.; BOMBOIS, X.; CODRONS, B.; SCORLETTI, G.; ANDERSON, B. D. O. Model validation for control and controller validation in a prediction error identification framework - part I: theory. *Automatica*, 39:403–415. 2003.
- 12 GEVERS, M.; BOMBOIS, X.; CODRONS, B.; SCORLETTI, G.; e ANDERSON, B. D. O. Model validation for control and controller validation in a prediction error identification framework - part II: illustrations. *Automatica*, 39:417–427. 2003.
- 13 RIVERA, D.; LEE, H.; BRAUN, M.; MITTELMANN, H. Plant-friendly system identification: a challenge for the process industries. IFAC Symposium on System Identification (SYSID 2003), Rotterdam, The Netherlands. 2003.
- 14 FERNANDES, F. S. Identificação por predição de erro e síntese de controladores robustos. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil. 2006.
- 15 RODRIGUES, C. J. I. Projeto de controladores robustos a partir de modelos identificados em malha fechada: Aplicação a um sistema industrial. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Centro Universitário do Leste de Minas Gerais - UNILESTE, Coronel Fabriciano, Brasil. 2007.
- 16 SKELTON, R. Model error concepts in control design. *International Journal of Control*, 49(5):1725–1753. 1989.
- 17 TAKAHASHI, R. H. Otimização escalar e vetorial. Notas de Aula. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil. 2004.