

IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS E LAMINAÇÃO A FRIO¹

Adauto Martins de Assis²

Gerson Alves Inácio³

Antonio José de Oliveira Cabral⁴

Jayme Pereira de Gouvêa⁵

Resumo

A modelagem e a simulação de processos são ferramentas importantes. Em especial a identificação de sistema gera modelos nos domínios discretos ou contínuos do tempo ou da frequência, também descreve o comportamento do sistema e ajuda no projeto de controle do processo e é útil na execução do referido processo. Assim, a espessura de saída da tira no processo de laminação a frio de aço de uma importante siderúrgica foi descrita. Inicialmente por técnicas tradicionais obtendo-se a espessura de entrada da tira, a qual foi usada como variável de entrada na modelagem por identificação de sistemas. Também as tensões a ré e avante, a velocidade periférica do cilindro de trabalho, a pressão no arco de contato e a tensão de escoamento do material da tira foram usadas como variáveis de entrada no processo da identificação de sistema. Analisando os modelos gerados com esta técnica foi notado um bom ajuste entre a predição da identificação do sistema e os dados operacionais obtidos no processo.

Palavras-chave: Laminação a frio; Modelagem; Identificação de sistemas.

SYSTEMS IDENTIFICATION AND THE COLD ROLLING

Abstract

Nowadays the process modeling and simulation are important tools, in a special way the system identification generates models in the discrete or continuous domains in the time or frequencies domains to describe the system behavior. They can aid in the control process project and in its execution. Thus, the output strip thickness in steel cold rolling process of an important steelmaker was described initially with traditional techniques. It allowed to obtain the interesting variables as input thickness, backward tension, forward tension, peripheral work roll speed, contact arc pressure and yield to the system identification process. The next step was to model the cold rolling process with these techniques and the models for each rolling stands were obtained. These models presented good adjustment between the prediction of system identification and operational data acquired in the cold rolling process.

Key words: Cold rolling; Modeling; System identification.

¹ Contribuição técnica ao 46º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 27 a 30 de outubro de 2009, Santos, SP.

² Professor Adjunto (Dep. Engenharia Mecânica EEIMVR/UFF), adauto@metal.eeimvr.uff.br

³ Engenheiro Pleno da Gerência de Redução a Frio da CSN, [email: gerson.inacio@csn.com.br](mailto:gerson.inacio@csn.com.br)

⁴ Professor Adjunto (Dep. Engenharia Mecânica EEIMVR / UFF), [email: ajoc@metal.eeimvr.uff.br](mailto:ajoc@metal.eeimvr.uff.br)

⁵ Professor Titular (Dep. Engenharia Mecânica EEIMVR / UFF), [email: jpg@metal.eeimvr.uff.br](mailto:jpg@metal.eeimvr.uff.br)

1 INTRODUÇÃO

O processo de laminação a frio de tira de aço pode ser modelado por diversas técnicas e metodologias de modelagem. Pode-se considerar, por exemplo, o estado plano de deformação e usar o método das fatias para modelar o processo. Então, usar a equação de Ekelund com este objetivo. Outra possibilidade é modelar a dinâmica do processo. Para isto pode ser utilizados os valores das variáveis do processo, da tira e do laminador adquiridos durante o processo de laminação a frio.

As funções de transferência contínuas ou discretas podem ser usadas para modelar este processo de laminação a frio. Então, a técnica de identificação de sistemas pode ser utilizada com os modelos discretos lineares como ARX, o Armax e outros. Também modelos discretos não lineares podem ser usados para modelar e simular para o processo de laminação. Com modelos identificados é possível conhecer o comportamento do processo em relação às variáveis envolvidas o que possibilita implementar um sistema de controle baseados nestes modelos.

O principal objetivo deste artigo é tornar conhecido o comportamento do processo no laminador analisado.

2 PROCESSO DE LAMINAÇÃO A FRIO

Segundo Helman e Cetlin⁽¹⁾ a força de laminação pode ser estimada pela a equação de Ekelund e o raio deformado dos cilindros de trabalho, equações (1), onde P é a força de laminação, w é a largura da tira, \bar{S} é a tensão média de escoamento, R' é o raio deformado dos cilindros de trabalho, Δh é a diferença de espessura, μ é o coeficiente de atrito entre os cilindros e a tira, h_i a espessura na entrada, h_o a espessura na saída, R é o raio dos cilindros e c é a constante elástica do material do cilindro.⁽²⁾ A pressão média no arco de contato é dada pela razão entre a força de laminação, equação (1) e a área de contato.

$$\frac{P}{w} = \bar{S} \sqrt{R' \Delta h} \left[1 + \frac{1,6\mu \sqrt{R' \Delta h} - 1,2\Delta h}{(h_i + h_o)} \right]; \quad R' = R \left[1 + \frac{c}{h_i - h_o} \left(\frac{P}{w} \right) \right]; \quad (1)$$

O processo de laminação a frio é mostrado na Figura 1. Para este estimou-se a tensão avante na tira entre a desbobinadora e a 1ª cadeira por uma rotina que considera a tensão elétrica na armadura do motor da desbobinadora, a intensidade de corrente nesta e a velocidade periférica dos cilindros de trabalho da 1ª cadeira. Nas demais cadeiras, a tensão avante é obtida com aumento da velocidade nestas cadeiras causando uma tensão trativa na tira entre estas e a cadeira anterior. Estima-se a tensão a ré entre a 5ª cadeira e a bobinadora pela mesma rotina com a tensão elétrica no motor da bobinadora e a intensidade de corrente nesta e a velocidade periférica do cilindro de trabalho da 5ª cadeira. Nas demais cadeiras, as tensões a ré são iguais a tensão avante da cadeira anterior. A tensão média de escoamento é aproximada pelas equações (2) e (3).^(3,4)

$$\hat{Y} = \bar{S} \left(1 - (1,15/2\bar{S})(t_b + t_f) \right) \quad (2)$$

$$\bar{S} = \frac{P(h_i + h_f)}{w \cdot \left\{ (h_i + h_f) + \left[1,6\mu' \left\{ R \left[1 + \frac{cP}{w(h_i - h_f)} \right] (h_i - h_f) \right\} - 1,2(h_i - h_f) \right] \right\} \sqrt{R \left[1 + \frac{cP}{w(h_i - h_f)} \right] (h_i - h_f)}} \quad (3)$$

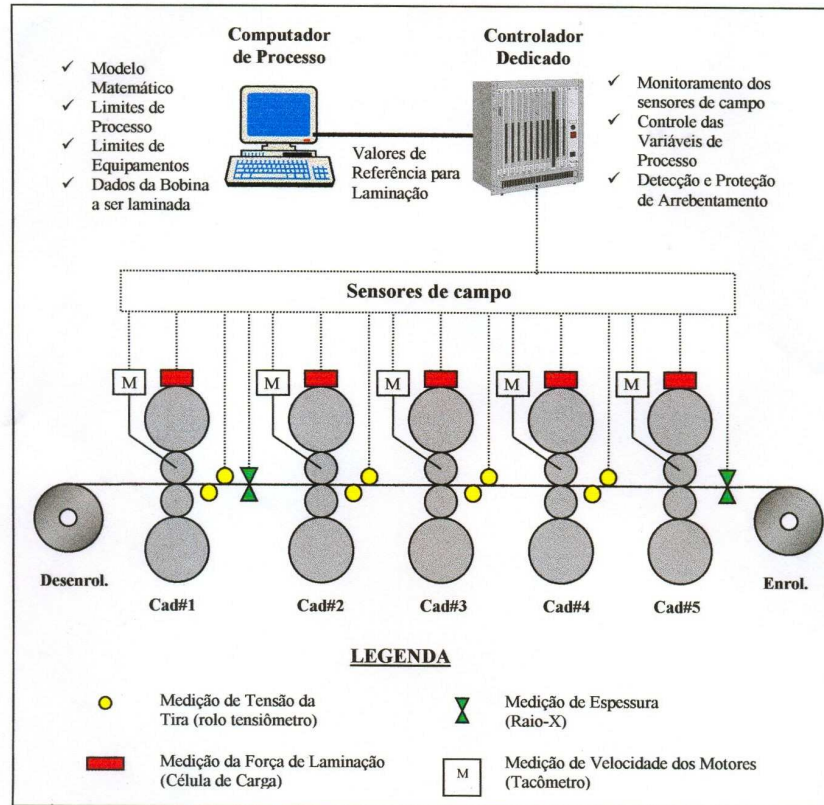


Figura 1. Desenho esquemático do laminador analisado.

A largura da tira varia mais ou menos 10 mm. A espessura na saída da 1ª e 5ª cadeiras foi estimada pelo desvio da espessura medido por sensores de raio-X. Nas outras cadeiras a espessura na saída e na entrada são estimadas pela equação (4).

$$h_{ji} = h_{(j-1)o} \cdot (1 - r_j); \quad j = 2, \dots, 4; \quad 2^{\text{nd}}, 3^{\text{rd}}, 4^{\text{th}} \text{ cadeiras e } i = \text{entrada}, o = \text{saída} \quad (4)$$

3 IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS

Segundo Coelho e Coelho⁽⁵⁾ os modelos reduzidos podem representar os sistemas. As funções de transferências de primeira, equação (5), caracterizam a dinâmica do sistema, K é o ganho, θ é o atraso de transporte, τ é a constante de tempo, e $Y(s)$ e $U(s)$ são transformadas de Laplace da saída e da entrada.

$$G_p(s) = [Y(s)]/[U(s)] = [Ke^{\theta \cdot s}]/[1 + \tau \cdot s] \quad (5)$$

Na identificação de sistemas são usadas as variáveis de entrada e de saída do processo. Na laminação a frio a aquisição dos dados é feita com auxílio das teorias que regem este processo devido sua complexidade. Assim, aquisitar pressão média no arco de contato é feita com a partir da força de laminação, equações (1), e da área de contato da tira com o cilindro. Ainda, o coeficiente de atrito é usado no

cálculo da tensão média de escoamento. Na equação (6) as variáveis de entrada são a espessura na entrada h_i , tensões na tira antes e depois de cada cadeira t_b e t_f , velocidade periférica dos cilindros de trabalho V , pressão no arco de contato p e tensão média de escoamento \bar{s} . A variável de saída é a espessura h_o após a cadeira.

$$h_o = f(h_i, t_b, t_f, V, p, \bar{s}) \quad (6)$$

Identificou-se o processo por cadeira no Matlab,⁽⁶⁾ gerando modelos discretos com sinais amostrados com taxa de 1/0,020s. Este artigo modela 1 bobina de aço grau CSN 2710. A duração do processo é de 123 segundos, sendo: 37 para o encaixe e 38 para aceleração dos laminadores, 76 para o processo em regime, 19 para desaceleração dos laminadores e 9 segundos para o desencaixe da tira. A espessura de entrada é em média de 3,464 mm e a de saída é 1,228 mm.

3.1 Primeira Cadeira

Usou-se o raio dos cilindros de 278 mm, coeficiente de atrito de 0,03 e a largura média da tira de 1202,03 mm para estimar a pressão no arco de contato e a tensão média de escoamento. Estimou-se o tempo de atraso de transporte na medição de espessura (Figura 2), alto no período transiente e normal em regime. Mediu-se a velocidade periférica dos cilindros e estimaram-se as velocidades avante e ré com os escorregamento avante e a ré iguais. Estimou-se a tensão de escoamento, Eq.(2), (3). Na Figura 3 há os sinais de entrada: a) h_i ; b) t_f ; c) t_b ; d) V ; e) p e f) \bar{s} e o de saída em g) h_o . Os sinais sem processamento com 5874 medidas e processados divididos em duas partes com 2937 medidas uma para identificação e outra para validação.

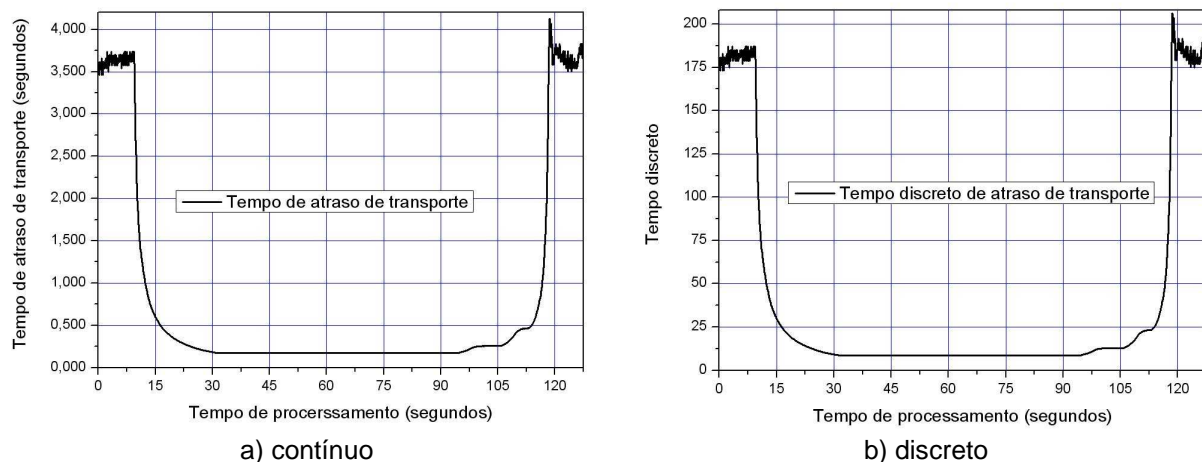


Figura 2. Estimativa do tempo de atraso na medição de espessura (1ª cadeira).

Foram avaliados diversos modelos lineares ou não lineares para o conjunto de dados da primeira cadeira de laminação. Ao término do processo de identificação obteve-se como resposta um modelo por função de transferência continua "P1D" com 6 entradas e uma saída, descrito pela Figura 4 na cor azul e a equações (7) e a Tabela 1 apresentando um ajuste de 76,97%, que acompanhou a forma dos dados operacionais, porém com oscilações menores.⁽⁶⁾

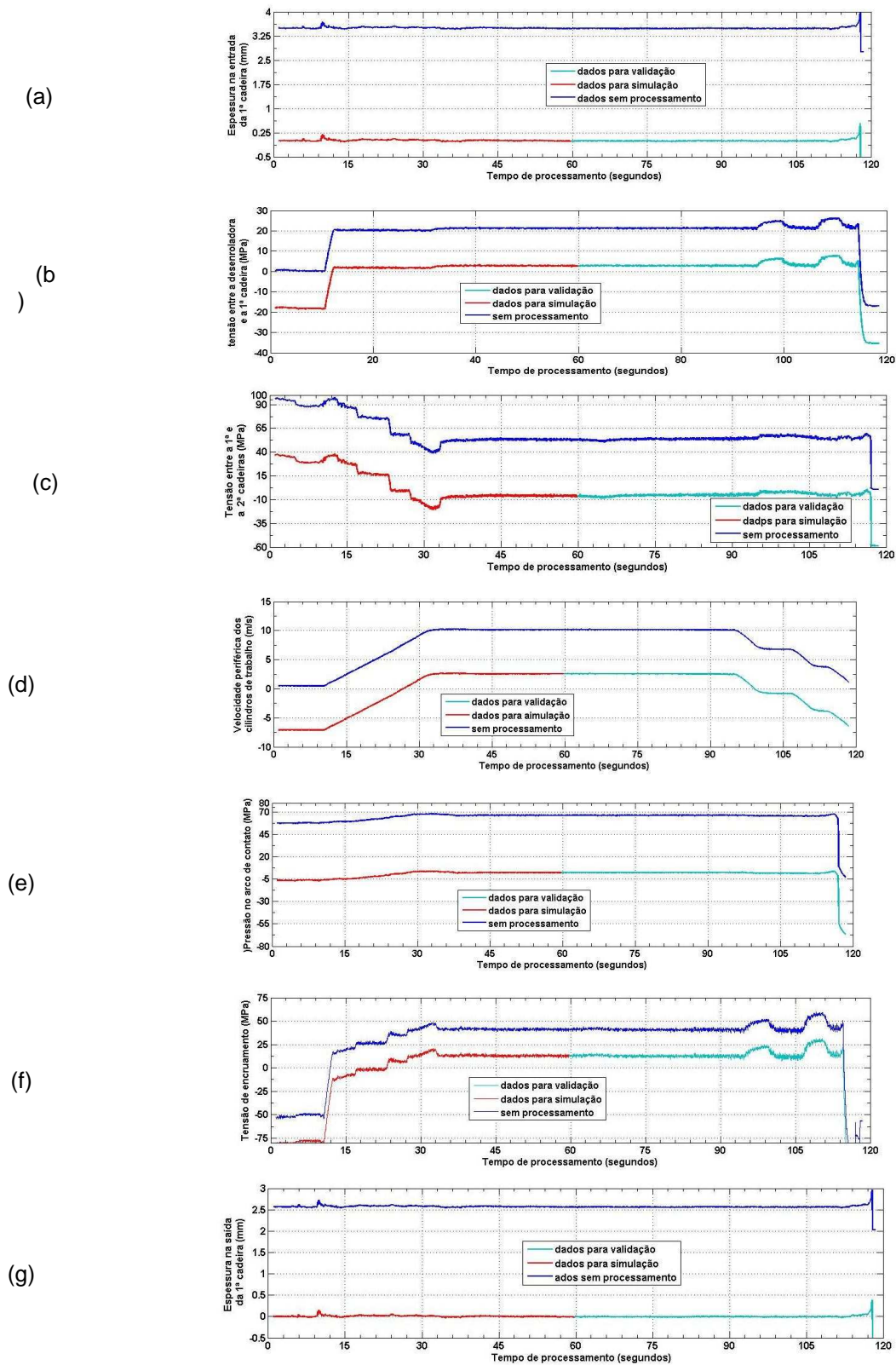


Figura 3. Sinais (a) a (f) de entrada e (g) de saída, 1ª cadeira.

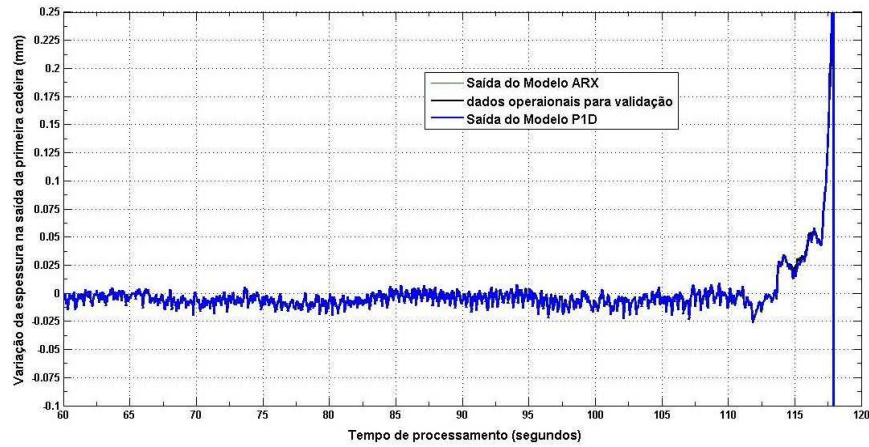


Figura 4. Comparação dos sinais medidos e simulados, 1ª cadeia.

$$y = G_1(s)u_1 + G_2(s)u_2 + G_3(s)u_3 + G_4(s)u_4 + G_5(s)u_5 + G_6(s)u_6 + (C/D)e \quad (7)$$

$$G_i(s) = \left(K \cdot e^{\theta_i \cdot s} \right) / (1 + \tau_i \cdot s)$$

Modelo é estável se os pólos estiverem no semiplano complexo negativo.

Tabela 1. Funções de transferência do modelo (1ª cadeia)

i	K _i	τ _i	θ _i	Modelo ARMA do ruído		
				Ruído	[C(s)/D(s)]e	D(s) = s
1	0.70381	00.001	0	Método	PEM	
2	0.0021096	0.8738	0.19053	Loss function	9.41257e-006	
3	0.00027414	0.50198	0.6	FPE	9.54164e-006	
4	4.1538e-006	0.001	0			
5	-0.00038519	0.001	0.6			
6	0.00062737	1.0449	0.00881			

3.2 Segunda, Terceira, Quarta e Quinta Cadeiras

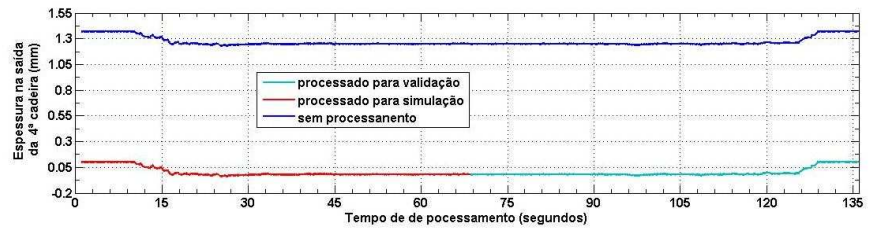
Nas Tabelas 2 e 3 estão os parâmetros e modelos das 2ª, 3ª, 4ª e 5ª cadeiras .

Tabela 2. Parâmetros e modelos da segunda, terceira e quarta cadeia de laminação

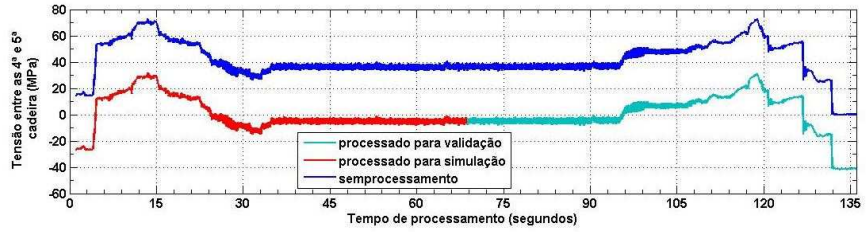
Cadeira	Raio do cilindro (mm)	Coeficiente do atrito	Largura da tira (mm)	Sinais de entrada e saída	
				Não processados	Processados
2	263,0	0,07	1202,03	6378 dados	3189 dados
3	257,0	0,07	1202,03	6378 dados	3189 dados
4	290,5	0,07	1202,03	6378 dados	3189 dados
5	281,5	0,41	1202,03	6754 dados	3377 dados
Cadeira	Modelo	Ajuste	Figura	Tabela	Equação
2	P1D	90,21%	6	3	(8)
3	P1D	87,61%	7	4	(7)
4	ARX	Sem ajuste	8	5	(8) e (9)
5	P1D	78,06%	9	6	(7)

Na quinta cadeia há o sensor de raio-X para medir a espessura na saída. Os sinais de entrada são: a) h_i ; b) t_i ; c) t_b ; d) V ; e) p e f) \bar{s} e o de saída g) h_o . (Figura 5).

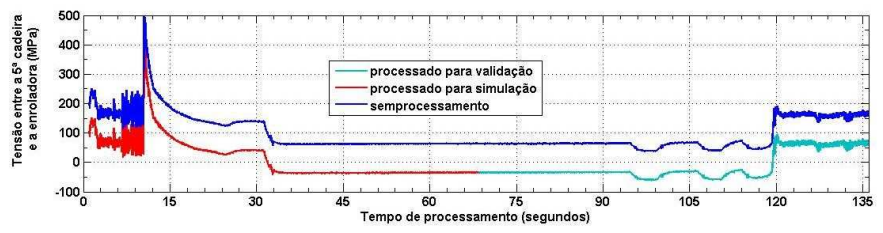
(a)



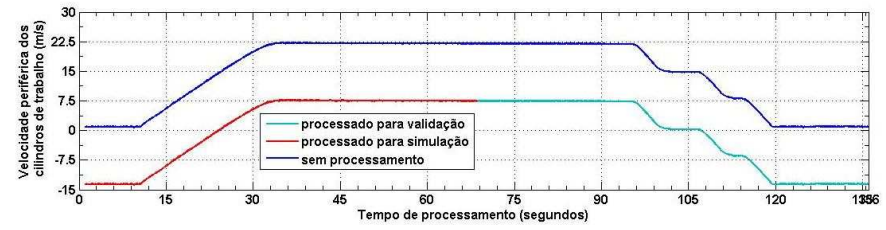
(b)



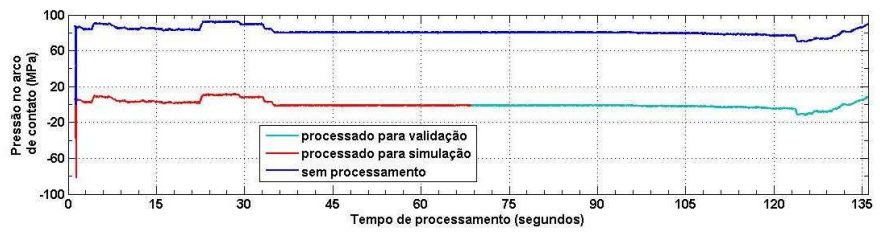
(c)



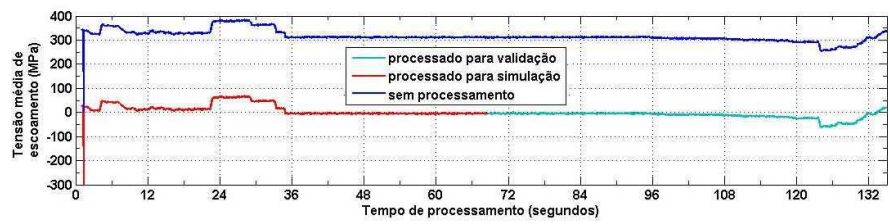
(d)



(e)



(f)



(g)

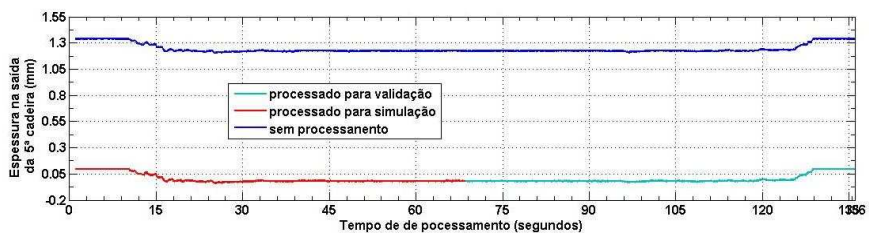


Figura 5. Sinais (a) a (f) de entrada e (g) de saída, 5ª cadeira.

Tabela 3. Modelos da 2ª, 3ª, 4ª e 5ª cadeiras

Segunda cadeira						
i	K_i	τ_i	θ_i	Modelo ARMA do ruído		
1	0,65973	0,0109	0	Ruído	$[C(s)/D(s)]e$	
2	0,000127	0,001	0.19053	C(s) = s + 14,99	D(s) = s - 4,364	
3	0,000196	171,01	0,57179	Método	PEM	
4	-4,81e-005	145,22	0,6	Loss function	5,58533e-006	
5	-3,10e-005	0.001	0.6	FPE	5,65583e-006	
6	7,88e-005	0,001	1,79e-10			
Terceira cadeira						
i	K_i	τ_i	θ_i	Modelo ARMA do ruído		
1	0,79795	0,099147	0	Ruído	$[C(s)/D(s)]e$	
2	0.26485	1.587e+005	0.46257	C(s) = s	D(s) = s	
3	0,03781	4,543e+005	0,36158	Método	PEM	
4	-2,614e-05	0,0015704	5,6482e-006	Loss function	9,8565e-006	
5	-0,001044	41,243	0,076612	FPE	9,9809e-006	
6	0,000377	29,165	0,59986			
Quarta cadeira						
	$j \backslash i$	1	2	3	4	
A		- 1,11	+ 0,1347	- 0,04711	+ 0,03125	Loss function
B	1	-0,8467	+ 0,8592	+ 0,0075	- 0,03054	7.4557e-008
	2	-5,595e-06	+ 9,978e-06	+ 4,664e-06	- 6,789e-06	
	3	1,384e-08	+ 1,418e-06	+ 1,877e-08	- 6,567e-06	FPE
	4	+0,000341	- 0,0005746	+ 0,000105	0,000125	7.6135e-008
	5	-0,1288	+ 0,1301	+ 0,002766	- 0,005483	
	6	0,02317	- 0,02341	- 0,0005074	+ 0,0009983	
Quinta cadeira						
i	K_i	τ_i	θ_i	Modelo ARMA do ruído		
1	0,82082	0,61047	0	Ruído	$[(C(s))/(D(s))]e$	
2	6,1211e-005	1,0135	0,0024413	C(s)= s + 23,4 ($\pm 1,408$)		
3	6,9782e-007	0,3527	0,48903	D(s)= s + 0,1539 ($\pm 1,412$)		
4	1,7943e-005	0,049473	0,59738	Método	PEM	
5	0,00017474	2,2056	0,27086	Loss function	1,8426e-006	
6	2,9402e-006	0,001	1,226e-007	FPE	1,8646e-006	

A equação (8) mostra o modelo ARX da 4ª cadeira e nas Figuras 6 a 8 existem as comparações dos sinais de validação e simulados.

$$\begin{aligned}
 arxqs &= arx(mydatade, [na, nb, nk]) \\
 na &= [4]; \quad nb = [4 \ 4 \ 4 \ 4 \ 4 \ 4]; \quad nk = [0 \ 0 \ 7 \ 0 \ 0 \ 0]
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

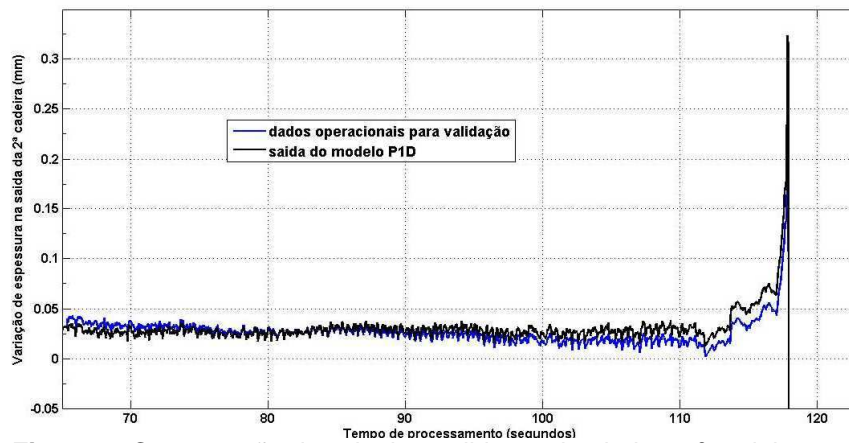


Figura 6. Comparação dos sinais medidos e simulados, 2ª cadeira.

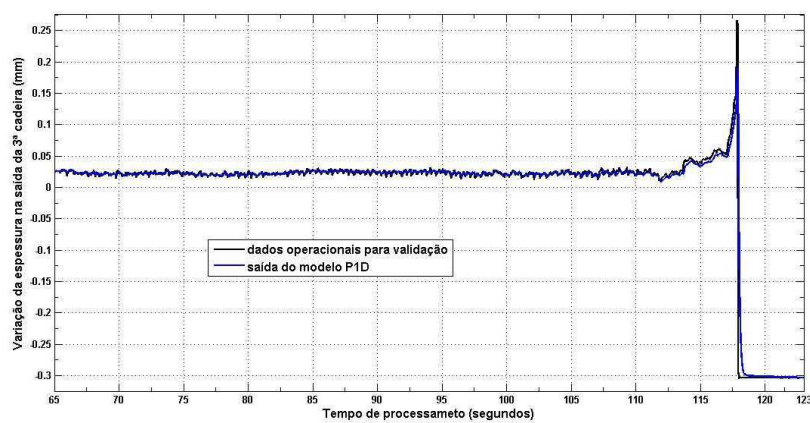


Figura 7. Comparação dos sinais estimados e simulados, 3ª cadeira.

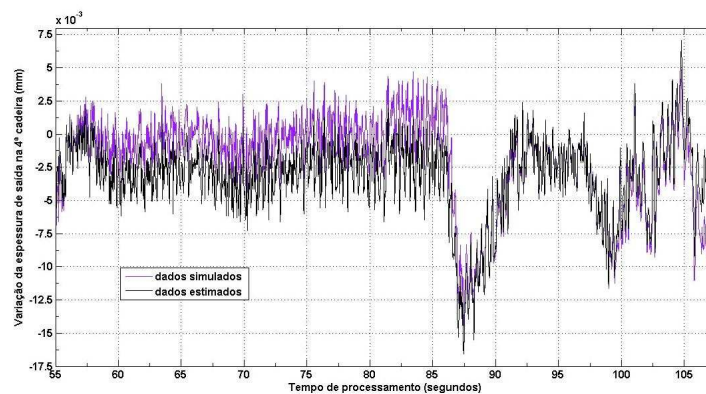


Figura 8. Comparação dos sinais estimados e simulados, Bobina D, 4ª cadeira.

Na 4ª cadeira o ajuste do modelo, equação (9), não expressivo, mas a espessura está na faixa de tolerância de variação de espessura e o modelo simulado acompanha a forma do sinal de validação e sua amplitude é inferior a da faixa de tolerância.

Na Figura 9 dos sinais de validação e simulados apresentam boa concordância.

$$A(q)y(t) = B(q)U(t) + e(t)$$

$$A(q) = a_{11}q^0 + a_{12}q^{-1} + a_{13}q^{-2} + a_{14}q^{-3} + a_{15}q^{-4}$$

$$B_1(q) = b_{11}q^{-1} + b_{12}q^{-2} + b_{13}q^{-3} + b_{14}q^{-4}$$

$$B_2(q) = b_{21}q^{-1} + b_{13}q^{-2} + b_{14}q^{-3} + a_{15}q^{-4}$$

$$B_3(q) = b_{31}q^{-7} + b_{32}q^{-8} + b_{33}q^{-9} + b_{34}q^{-10}$$

$$B_4(q) = b_{41}q^{-1} + b_{42}q^{-2} + b_{43}q^{-3} + b_{44}q^{-4}$$

$$B_5(q) = b_{51}q^{-1} + b_{52}q^{-2} + b_{53}q^{-3} + b_{54}q^{-4}$$

$$B_6(q) = b_{61}q^{-1} + b_{62}q^{-2} + b_{63}q^{-3} + b_{64}q^{-4}$$
(9)

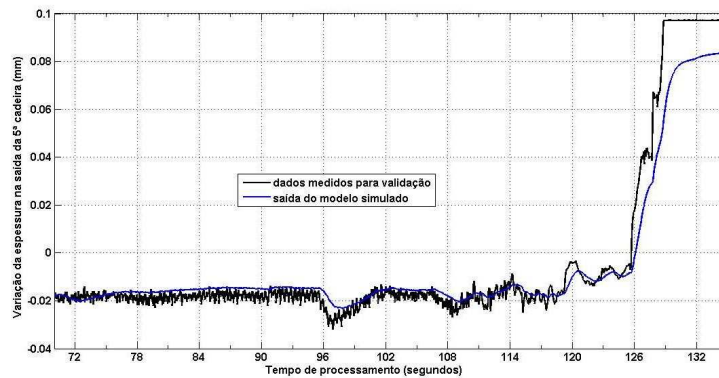


Figura 9. Comparação dos novos sinais medidos e simulados, 5ª cadeira.

Foi estimado o tempo de atraso de transporte na medição de espessura na quinta cadeira, assim na Figura 10a está atraso contínuo e a estimativa do tempo discreto é dada na Figura 10b. O tempo de atraso na cadeira quinta é menor que na primeira cadeira, isto pode ser explicado pelo aumento da velocidade.

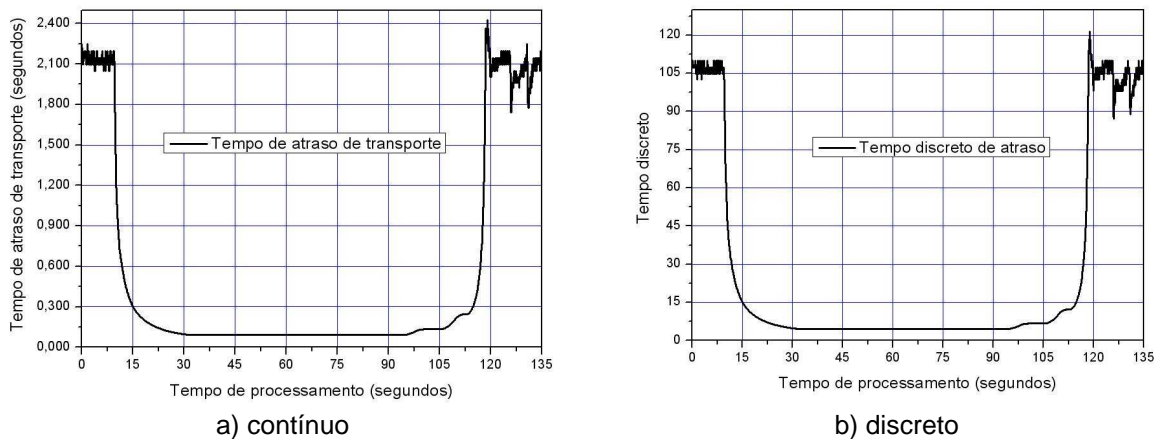


Figura 10. Estimativa do tempo de atraso na medição de espessura (5ª cadeira)

4 RESUMO DO PROCESSO COM A BOBINA IDENTIFICADA

O processo de laminação a frio (Figura 1), tem uma descrição particular e pode ser mostrado no diagrama esquemático de blocos da Figura 11, onde h é a espessura e S a tensão de escoamento da tira.⁽⁷⁾

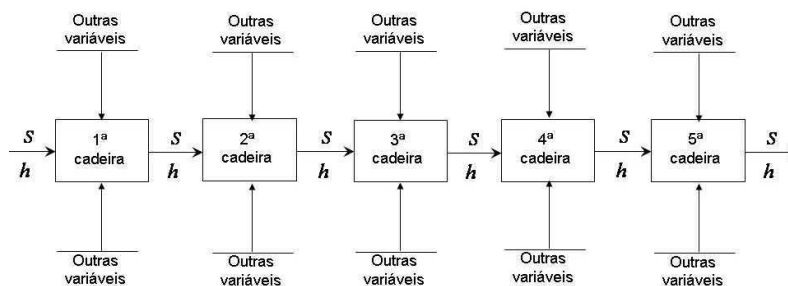


Figura 11. Diagrama de blocos do processo de laminação de tiras a frio.

A presença dos ruídos nos sinais pode ser explicada pela utilização dos dados aquisitados pela instrumentação dos laminadores sem filtragem. Ainda, mesmo sendo automatizado, o processo de laminação a frio nestes laminadores não é em malha totalmente fechada, necessita intervenções dos operadores para corrigir o processo quando apresentam pontos de singularidades, ou perda do controle da espessura desejada. Mas, a técnica de identificação foi capaz de mostrar uma função comportamental para o processo.

5 ANÁLISE DAS MODELAGENS

Analisando-se as modelagens realizadas no domínio das variáveis importantes para laminação a frio, foram notadas boas concordâncias dos valores calculados como prediz a literatura e os dados do processo.

A dificuldade foi explicitar as tensões avante entre a desbobinadora e a primeira cadeira. A solução foi a medida indireta com a tensão elétrica e a intensidade de corrente elétrica no motor da desbobinadora; a velocidade periférica dos cilindros e a área da seção transversal da tira na entrada da primeira cadeira. Na quinta cadeira a dificuldade foi a tensão a ré na tira entre a quinta cadeira e a bobinadora. Então, foi usada a mesma metodologia da primeira cadeira, porém, usando os dados elétricos da enroladora e a velocidade periférica dos cilindros da quinta cadeira.

Há nos modelos identificados a grande presença de ruído por aquisitar os dados com a instrumentação do laminador sem filtragem para não interferir no processo.

Um modelo identificado é bom se alcança ajuste maior que 75% com os dados de validação e se o modelo for estável. Assim, os modelos obtidos são bons. Alguns coeficientes das equações que descrevem os modelos são pequenos e parece que a variável influencia menos a espessura final, mas é importante lembrar que a variação da espessura analisada está na casa dos micrometros enquanto as tensões estão MPa, assim os pequenos coeficiente ajustam estas diferenças.

6 CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

Após executar uma revisão sobre métodos e técnicas de modelagem chegou-se a identificação de sistemas, descrita em inglês por Ljung,⁽⁸⁾ posteriormente também descrita em português de modo simplificado e didático por Coelho e Coelho⁽⁵⁾ e ainda em português de modo mais abrangente extensivo aos modelos não lineares por Aguirre.⁽⁹⁾ Esta técnica pode gerar modelos comportamentais do sistema, descrevendo como este evolui no tempo. Assim, no processo de laminação a frio os dados são aquisitados em tempo discretos com uma taxa de amostragem, então a técnica de identificação de sistemas se ajusta perfeitamente a este caso.

No laminador analisado a instrumentação não permite medir a velocidade na entrada e na saída tira de cada cadeira de laminação. Também não permite medir a espessura na entrada da primeira cadeira, na saída da segunda cadeira, na entrada e na saída da terceira cadeira, na entrada e na saída da quarta cadeira. Foi notado que os valores das tensões avante e ré são estimativas devido a limitações da instrumentação. Isto inviabiliza a aplicação direta do fluxo de massa.⁽¹⁰⁻¹³⁾

Resumindo, os laminadores são antigos, operaram desde 1982, mas com as intervenções dos operadores os desvios das variáveis de interesse são corrigidos e o processo de laminação nestes laminadores atende as especificações do mercado. Então, os laminadores não são totalmente automatizados.

Apesar de todos os problemas encontrados, a identificação descreveu bem o processo de laminação possibilitando utilizar os modelos gerados com alguns ajustes no controle do processo. Deve-se ressaltar que a identificação de sistemas é uma técnica para o regime estacionário, não se adequando bem na parte transiente.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Companhia Siderúrgica Nacional pela liberação dos dados operacionais sem os quais não seria possível a execução deste artigo.

REFERENCIAS

- 1 Helman e Cetlin, "Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais", Editora Guanabara dois, Rio de Janeiro – RJ, 1983.
- 2 CIMM (2006), "Material Didático – Conformação", Centro de Informações Metal – Mecânica. www.cimm.com.br. 2006.
- 3 Ginzburg, V.B.: High-Quality Steel Rolling, Marcel Dekker Editor , 249p, 1998.
- 4 Assis, A. M., "Identificação de Sistemas e Espessura Final na laminação a Frio", Tese de Doutorado, Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda RJ, 2008 178 páginas.
- 5 Coelho, A. A. R. ; Coelho, L. S.. Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares. 1. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2004. v. 1. 181 p.
- 6 MathWorks Inc, "Matlab User Guide", 13th version, 2005.
- 7 Ogata, K., "Engenharia de Controle Moderno", 3ª Edição, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro RJ. Brasil, 2002, pág.1 a 813.
- 8 Ljung, L., "System Identification: Theory for the Use", Second Edition. Prentice Hall Information and System Sciences Series, Prentice Hall PTR. Sweden, 1999.
- 9 Aguirre, L. A., "Intrudução à identificação de sistemas – Técnicas lineares e não lineares aplicadas a sistemas reais", 2ª Edição Revisada e ampliada, Editora UFMG, Belo Horizonte M G, Brasil, 2004, 659 páginas.
- 10 Roberts, W. L., "Cold rolling Steel", Marcel Dekker Editor. New York, USA. 1978.
- 11 Formánek, I. "Modern Control Systems of Cold Rolling Mills", XXIX ASR '2004 Seminar Instruments and Control, Ostrava, April 30, 2004 pp 53 a 59
- 12 Rath, G.. "Model Based Thickness Control of the Cold Strip Rolling Process", Doctoral Thesis, Department of Automation, University of Leoben, Leoben. Austria, April 2000.
- 13 Kugi, A.; Novak, R; Schlacher, K.; Aistleitner, K. "A Flatness Based Approach for the Thickness Control in Rolling Mills"; in Proceedings of the Fourteenth International Symposium of Mathematical Theory of Networks and Systems, 6-2000