

MODELAGEM E CONTROLE ÓTIMO DE UM TREM DE LAMINAÇÃO A QUENTE¹

*Francisco Guido Rossomando²
Jose Denti Filho³*

Resumo

O trabalho descrito neste artigo, prove uma aplicação de controle ótimo ao processo de laminação a quente utilizando dados reais. É utilizada uma formulação do modelo em variáveis de estado sendo o objetivo do controle de minimizar a variação da espessura da tira. Os resultados do controle são testados e comparados dentro do ambiente de simulação desenvolvido para apoio a validação da estratégia de controle, com os dados reais obtidos no processo controlado por uma técnica convencional. Os resultados da técnica de controle ótimo produziram uma menor variação da espessura de saída.

Palavras-chave: Controle ótimo; Laminação a quente; Espaço de estados.

¹ *Contribuição Técnica para o 42º Seminário de Laminação Processos e Produtos Laminados e Revestidos – Santos – SP, 25 a 28 de outubro de 2005.*

² *Universidade Federal do Espírito Santo – Ppgee - Ufes – estudante de doutorado, M.Sc. – laboratório de controle e instrumentação (LCI) – Vitória-ES-Brasil*

³ *Universidade Federal do Espírito Santo – Ppgee - Ufes – professor adjunto, D.Sc. – Laboratório de controle e instrumentação (LCI) – Vitória-ES-Brasil*

1 INTRODUÇÃO

O processo de laminação de planos consiste em submeter uma placa de metal a um conjunto de cilindros rotativos que imprimirão nesta placa uma deformação permanente, isto é, a redução de espessura. As máquinas que promovem esta deformação, nas quais se encontram os conjuntos de cilindros rotativos, são as cadeiras de laminação. Um conjunto de cadeiras de laminação constitui um trem de laminação. Na Figura 1 tem-se um esquema de duas cadeiras de laminação simples com quatro cilindros cada uma e com sistemas de ajuste de espessura (parafuso). Os cilindros em contato com a tira imprimindo-lhe deformação desejada são os cilindros de trabalho. No processo de laminação normalmente temos 6 cadeiras, onde nas 4 primeiras o objetivo de controle é de manter o esforço aplicado constante, deixando para as duas últimas o ajuste da espessura desejada de tira, por isso neste trabalho levamos em conta somente as duas últimas cadeiras do trem de laminação. As cadeiras de laminação são constituídas por quatro cilindros, dois cilindros de trabalho e dois de apoio ou encosto,

Nossa principal motivação neste trabalho é a redução das variações da espessura de saída para qualquer de duas perturbações das variáveis de entrada do processo (Temperatura da tira ou espessura de entrada). A Figura 2 mostra três gráficos de um processo real de laminação nas quais observamos a presença de zonas frias pontos (indicados pela seta) Figura 2 (b), que são pontos de contato com os roletes refrigerados dos fornos de aquecimento. Estas zonas tem maior resistência a deformação o que produz um aumento da força de separação na cadeira de laminação Figura 2 (a). Estas variações da força de separação produzem variações no estiramento da cadeira de laminação, produzindo variações na espessura de saída da cadeira.

Observando a temperatura na saída do laminador, vêm-se zonas localizadas de temperatura mais baixas que são as marcas dos roletes anteriormente mencionadas, Por outro lado observa-se uma queda de temperatura do início ao fim. Esta perda térmica, produz aumentos proporcionais na força de separação e conseqüentemente na espessura Figura 2 (c), sendo principalmente as variações da temperatura e da espessura de entrada as que produzem variações na força de separação alterando a espessura de saída.

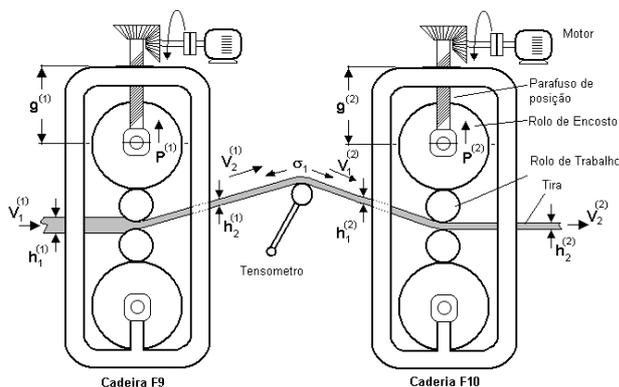


Figura 1. Cadeiras de Laminação com dois rolos de trabalho e dois de encosto

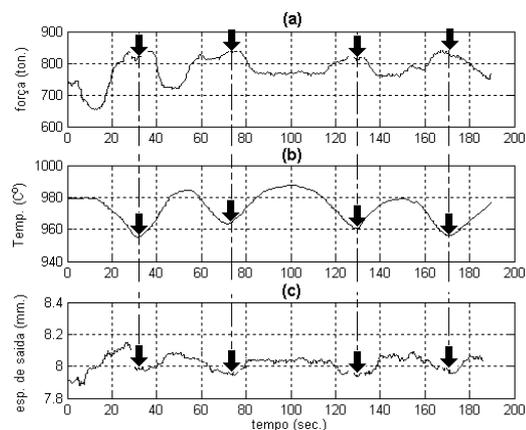


Figura 2. Pontos frios na tira.

2 CONTROLE CONVENCIONAL - FORCE FEED FORWARD (FFF)

O sistema de controle de espessura *force feed forward* (FFF)⁽¹⁾ e ⁽²⁾ é baseado na detecção de flutuações na resistência a deformação do material que esta sendo laminado na primeira cadeira sendo esta informação enviada ao modelo de setup.

Mantendo constante o gap em cada cadeira, as diferenças na resistência a deformação são refletidas sobre a carga de laminação. O material laminado é monitorado continuamente, e é possível ajustar o gap das próximas cadeiras antes da chegada de distúrbios.

Os cálculos são feitos considerando a divisão da tira em fatias. Para cada fatia de tira na primeira cadeira, a carga de laminação é lida. A resistência de deformação atual e a evolução térmica sobre o trem de laminação são usadas para calcular a espessura que a tira deveria ter na saída de cada cadeira. As espessuras são avaliadas sendo as menores correspondentes aos pedaços mais frios e as maiores a os pedaços da tira mais quente. Finalmente, as variações medidas na carga são usadas para ajustar os cálculos e para poder agir sobre o gap nas últimas duas cadeiras de laminação.

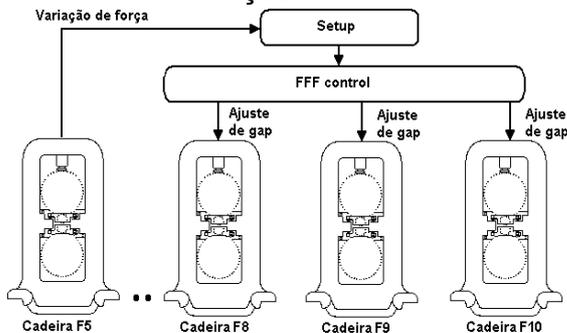


Figura 3: Controle com o sistema Force Feed Forward (FFF)

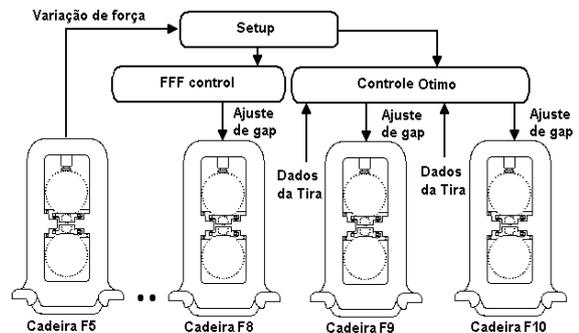


Figura 4: Controle proposto com controle ótimo sobre as duas últimas cadeiras.

3 CONTROLE PROPOSTO

Para desenvolver o controle aplicamos técnicas de controle ótimo nas duas últimas cadeiras ao modelo matemático do processo representado em espaço de estado.

3.1 Modelagem Analítica do Processo

Neste trabalho apresentamos um modelo matemático das duas últimas cadeiras F9 e F10 do trem de laminação, para poder avaliar a técnica de controle proposta. (O sistema FFF faz o ajuste de espessura nas duas últimas cadeiras), o modelamento analítico aqui utilizado destina-se tão somente a permitir a validação, via simulação, dos resultados obtidos. Os quais são comparados com os valores reais medidos nas cadeiras de laminação, controlados pelo controle FFF (*force feed forward*). Para obter um modelo aproximado da cadeira de laminação, trabalho-se com as teorias de Orowan⁽³⁾, e Alexander⁽⁴⁾, e Fleck e Johnson⁽⁵⁾ as quais aparecem como as mais confiáveis para a obtenção da carga de laminação, podendo usá-las numa ampla faixa de condições de laminação. O modelo matemático foi ajustado e calibrado com valores reais medidos no processo, obtendo uma resposta muito próxima ao valor de carga real, este modelo esta. representado de forma geral pela Equação (4) incluindo o escorregamento.

3.2 Equações Básicas do Modelo

O modelo matemático implementado leva em consideração a duas ultimas cadeiras do processo. utilizando a representação matemática no espaço de estados. A espessura de saída de cada cadeira é função do gap dos rolos e do estiramento da cadeira:

$$h_2^{(i)} = g^{(i)} + \frac{P^{(i)}}{K^{(i)}} \quad (1)$$

A tensão entre as cadeiras: de laminação é função da diferença da velocidade de saída chapa da cadeira F9 menos velocidade de entrada para a cadeira F10.

$$\frac{d\sigma_1}{dt} = \frac{E}{L} (V_2^{(1)} - V_1^{(2)}) \quad (2)$$

E a continuidade de volume da tira no gap dos cilindros estão definidas como:

$$V_1^{(i)} h_1^{(i)} = V_2^{(i)} h_2^{(i)} \quad (3)$$

Onde as variáveis são:

(i): Sobrescrito indicativo da cadeira (i=1, para F9 e i=2, para F10).

$h_2^{(i)}$: Espessura de saída da cadeira (i).

$g^{(i)}$: gap dos rolos para a cadeira (i)

$P^{(i)}$: Carga de laminação na cadeira (i).

$K^{(i)}$: Índice de elasticidade da cadeira (i).

σ_1 : tensão da tira entre a cadeira F9 e F10.

E : Modulo de Young da tira

L : distancia de separação entre cadeiras (i).

$V_2^{(1)}$: Velocidade de saída da tira na cadeira F9.

$V_1^{(2)}$: Velocidade de entrada da tira na cadeira F10.

A força de laminação e a função de escorregamento, estão representadas pelas equações $P^{(i)}$ e $f^{(i)}$ respectivamente:

$$P^{(i)} = P(h_1^{(i)}, h_2^{(i)}, \sigma_1^{(i)}, \sigma_2^{(i)}, S^{(i)}, \mu^{(i)}, T^{(i)}); f^{(i)} = f(h_1^{(i)}, h_2^{(i)}, \sigma_1^{(i)}) \quad (4)$$

Onde:

$\sigma_2^{(i)}$: tensão a frente para a cadeira (i)

$g^{(i)}$: gap dos rolos para a cadeira (i)

$\mu^{(i)}$: Coeficiente de atrito da cadeira (i)

$S^{(i)}$: Tensão de escoamento da cadeira (i)

3.3 Considerações Básicas do Modelo

i) A principal consideração é que o controle é aplicado só quando existe tira entre as duas cadeiras, ou seja, não é considerado o momento anterior à entrada da tira na ultima cadeira.

ii) Consideramos as variações infinitesimais dos valores nominais. Por exemplo a variável x, sendo Δx a variação infinitesimal e x^* o valor nominal.

iii) Consideramos também que a força de laminação função da espessura de entrada, espessura de saída temperatura e da tensão entre cadeiras. As curvas de sensibilidade representam a variação da força de laminação ⁽⁶⁻⁸⁾ sendo:

$$\begin{aligned}\Delta P^{(1)} &= \beta_1 \cdot \Delta \sigma_1 + \beta_2 \cdot \Delta h_2^{(1)} + \beta_3 \cdot \Delta h_1^{(1)} + \beta_4 \cdot \Delta T^{(1)} \\ \Delta P^{(2)} &= \beta_5 \cdot \Delta \sigma_1 + \beta_6 \cdot \Delta h_2^{(2)} + \beta_7 \cdot \Delta h_1^{(2)} + \beta_8 \cdot \Delta T^{(2)}\end{aligned}\quad (5)$$

Onde os coeficientes da função linearizada são:

$$\begin{aligned}\beta_1 &= \frac{\partial P^{(1)}}{\partial \sigma_1}; \beta_2 = \frac{\partial P^{(1)}}{\partial h_2^{(1)}}; \beta_3 = \frac{\partial P^{(1)}}{\partial h_1^{(1)}}; \beta_4 = \frac{\partial P^{(1)}}{\partial T^{(1)}} \\ \beta_5 &= \frac{\partial P^{(2)}}{\partial \sigma_1}; \beta_6 = \frac{\partial P^{(2)}}{\partial h_2^{(2)}}; \beta_7 = \frac{\partial P^{(2)}}{\partial h_1^{(2)}}; \beta_8 = \frac{\partial P^{(2)}}{\partial T^{(2)}}\end{aligned}\quad (6)$$

A variação do resvalamento é função da espessura de entrada a espessura de saída e da tensão da tira e esta representado pelas equações:

$$\Delta f^{(1)} = \alpha_1 \cdot \Delta \sigma_1 + \alpha_2 \cdot \Delta h_2^{(1)} + \alpha_3 \cdot \Delta h_1^{(1)}; \quad \Delta f^{(2)} = \alpha_4 \cdot \Delta \sigma_1 + \alpha_5 \cdot \Delta h_2^{(2)} + \alpha_6 \cdot \Delta h_1^{(2)}\quad (7)$$

Onde os coeficientes são:

$$\alpha_1 = \frac{\partial f^{(1)}}{\partial \sigma_1}; \alpha_2 = \frac{\partial f^{(1)}}{\partial h_2^{(1)}}; \alpha_3 = \frac{\partial f^{(1)}}{\partial h_1^{(1)}}; \quad \alpha_4 = \frac{\partial f^{(2)}}{\partial \sigma_1}; \alpha_5 = \frac{\partial f^{(2)}}{\partial h_2^{(2)}}; \alpha_6 = \frac{\partial f^{(2)}}{\partial h_1^{(2)}}\quad (8)$$

A variação das velocidades de saída da tira são expressadas pela variação do coeficiente de escorregamento e pela velocidade periférica do rolo:

$$\Delta V_2^{(1)} = (1 + f^{*(1)}) \cdot \Delta V^{(1)} + V^{*(1)} \cdot \Delta f^{(1)} \quad \Delta V_2^{(2)} = (1 + f^{*(2)}) \cdot \Delta V^{(2)} + V^{*(2)} \cdot \Delta f^{(2)}\quad (9)$$

iv) As variáveis controladas não são diretamente afetadas pela velocidade periférica da ultima cadeira. Então fazemos $\Delta V_2 = 0$.

v) Cada atuador tem uma dinâmica que pode ser aproximada a um sistema da primeira ordem descrita como:

$$T_g \frac{dg^{(i)}}{dt} = g_{in}^{(i)} - g^{(i)} \quad \text{e} \quad T_v \frac{dV^{(i)}}{dt} = V_{in}^{(i)} - V^{(i)}\quad (10)$$

vi) As variáveis $\Delta h_1^{(1)}$, $\Delta T^{(1)}$ e $\Delta T^{(2)}$ serão consideradas perturbações para o sistema:

vii) A variação da espessura de saída da cadeira F9 é igual á variação da espessura de entrada da cadeira F10 com um tempo de retardo definido:

$$T_d = L / (V^{*(1)} + \Delta V^{(1)}).$$

A estrutura geral do modelo representado em espaço de estados é mostrada na Equação (11).

$$\begin{cases} \dot{x} = A \cdot x + B \cdot u + E_1 \cdot e \\ y = C \cdot x + E_2 \cdot e \\ w = F \cdot x + E_3 \cdot e \end{cases}\quad (11)$$

Onde os vetores de entrada, o vetor de variáveis de estado, o vetor de perturbação e de saída são:

$$x = \begin{pmatrix} \Delta\sigma_1 \\ \Delta g^{(1)} \\ \Delta V^{(1)} \\ \Delta g^{(2)} \end{pmatrix}; y = \begin{pmatrix} \Delta h_2^{(1)} \\ \Delta\sigma_1 \\ \Delta h_2^{(2)} \end{pmatrix}; e = \begin{pmatrix} \Delta h_1^{(1)} \\ \Delta T^{(1)} \\ \Delta h_1^{(2)} \\ \Delta T^{(2)} \end{pmatrix}; u = \begin{pmatrix} \Delta g_{in}^{(1)} \\ \Delta V_{in}^{(1)} \\ \Delta g_{in}^{(2)} \end{pmatrix}; w = \begin{pmatrix} \Delta P^{(1)} \\ \Delta P^{(2)} \end{pmatrix}$$

Os coeficientes obtidos para construir as matrizes de espaço de estado são:

$$\varepsilon_1 = \left(\frac{K^{(1)}}{K^{(1)} - \beta_2} \right); \varepsilon_2 = \left(\frac{\beta_1}{K^{(1)} - \beta_2} \right); \varepsilon_3 = \left(\frac{\beta_3}{K^{(1)} - \beta_2} \right); \varepsilon_4 = \left(\frac{\beta_4}{K^{(1)} - \beta_2} \right)$$

$$\varepsilon_5 = \left(\frac{K^{(2)}}{K^{(2)} - \beta_6} \right); \varepsilon_6 = \left(\frac{\beta_5}{K^{(2)} - \beta_6} \right); \varepsilon_7 = \left(\frac{\beta_7}{K^{(2)} - \beta_6} \right); \varepsilon_8 = \left(\frac{\beta_8}{K^{(2)} - \beta_6} \right)$$

$$T_\sigma = -1 / \left\{ \frac{E}{L} \cdot \left(V^{*(1)} \cdot (\alpha_1 + \alpha_2 \cdot \varepsilon_2) - V^{*(2)} \cdot (\alpha_4 + \alpha_5 \cdot \varepsilon_6) \cdot \frac{h_2^{*(2)}}{h_1^{*(2)}} \right) \right\}; M_1 = \frac{E}{L} \cdot \left(V^{*(1)} \cdot \alpha_2 \cdot \varepsilon_1 \right) \cdot T_\sigma$$

$$M_2 = -\frac{E}{L} \cdot \left(V^{*(2)} \cdot \alpha_5 \cdot \varepsilon_5 \cdot \frac{h_2^{*(2)}}{h_1^{*(2)}} \right) \cdot T_\sigma; M_3 = \frac{E}{L} \cdot \left(1 + f^{*(1)} \right) \cdot T_\sigma; p_1 = \frac{E}{L} \cdot \left(V^{*(1)} \cdot (\alpha_2 \cdot \varepsilon_3 + \alpha_3) \right) \cdot T_\sigma$$

$$p_2 = \frac{E}{L} \cdot \left(V^{*(1)} \cdot \alpha_2 \cdot \varepsilon_4 \right) \cdot T_\sigma; p_3 = -\frac{E}{L} \cdot \left(\frac{h_2^{*(2)}}{h_1^{*(2)}} \cdot V^{*(2)} \cdot (\alpha_5 \cdot \varepsilon_7 + \alpha_6) \right) \cdot T_\sigma; p_4 = -\frac{E}{L} \cdot \left(\frac{h_2^{*(2)}}{h_1^{*(2)}} \cdot V^{*(2)} \cdot \alpha_2 \cdot \varepsilon_4 \right) \cdot T_\sigma$$

Os valores de A,B,C,F são:

$$A = \begin{pmatrix} -1/T_\sigma & M_1/T_\sigma & M_3/T_\sigma & M_2/T_\sigma \\ 0 & -1/T_g^{(1)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/T_v & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/T_g^{(2)} \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1/T_g^{(1)} & 0 & 0 \\ 0 & 1/T_v & 0 \\ 0 & 0 & 1/T_g^{(2)} \end{pmatrix}; C = \begin{pmatrix} \varepsilon_2 & \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ \varepsilon_6 & 0 & 0 & \varepsilon_5 \end{pmatrix};$$

$$F = \begin{pmatrix} \beta_1 & \beta_2 \cdot \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ \beta_5 & 0 & 0 & \beta_6 \cdot \varepsilon_5 \end{pmatrix}$$

As Matrizes E₁; E₂ e E₃ são as matrizes de perturbação do sistema:

$$E_1 = \begin{pmatrix} p_1/T_\sigma & p_2/T_\sigma & p_3/T_\sigma & p_4/T_\sigma \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; E_2 = \begin{pmatrix} \varepsilon_3 & \varepsilon_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_7 & \varepsilon_8 \end{pmatrix}; E_3 = \begin{pmatrix} \beta_3 & \beta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta_7 & \beta_8 \end{pmatrix}$$

O modelo anterior é convertido a espaço de estado em tempo discreto com um tempo de amostragem t₀=0.4 seg. sendo mesmo período de amostragem dos dados.

$$\begin{cases} x(k+1) = A' \cdot x(k) + B' \cdot u(k) + E_1 \cdot e(k) \\ y(k) = C' \cdot x(k) + E_2 \cdot e(k) \\ w(k) = F \cdot x(k) + E_3 \cdot e(k) \end{cases} \quad (12)$$

Para demonstrar que o processo é completamente controlável construímos a matriz M_C de controlabilidade, Para provar que o sistema é completamente observável, construímos a matriz M_O:

$$M_C = [B' \quad A' \cdot B' \quad A'^2 \cdot B' \quad A'^3 \cdot B']; M_O = [C' \quad C' \cdot A' \quad C' \cdot A'^2 \quad C' \cdot A'^3]^T \quad (13)$$

e obtivemos que o posto da matriz M_C é igual a ordem do processo demonstrando que o mesmo é completamente controlável e também obtivemos que o posto da

matriz M_0 é igual a ordem do processo sendo o mesmo completamente observável ou seja, se o estado pode se determinar a partir da medição da saída durante um intervalo de tempo finito. A simulação do controle foi feito com o software Matlab.⁽⁹⁾

3.4 Projeto do Controlador Linear Ótimo Integral

Para o projeto do controlador procura-se obter uma matriz de realimentação do vetor de estados para obter a melhor resposta possível do processo com uma adição de uma ação integral para diminuir o erro de estado estacionário do processo.

A inclusão da ação integral aumenta a ordem do sistema, se o sistema é da ordem 4 (matriz A') e o numero de variáveis realimentadas com ação integral é 3 a nova ordem do sistema será (4+3) e novo vetor de estado para o calculo do regulador ótimo integral e terá uma dimensão (4+3) (matriz \tilde{A}'). Para esta nova ordem ampliada o modelo considerado continua sendo observável e controlável. O novo vetor de estado pode ser definido como $\xi(k) = [x(k) \ v(k)]^T$, sendo o vetor $v(k)$ a ação integral para as três variáveis realimentadas.

O índice de desempenho proposto para o controlador ótimo integral é:

$$J = \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} [\xi^T(k) \cdot \tilde{Q} \cdot \xi(k) + u^T(k) \cdot \tilde{R} \cdot u(k)] \quad (14)$$

As matrizes R e Q devem ser simétricas e definidas positivas, com o objetivo de conferir o valor ótimo para o índice J . A estrutura da planta é a estabelecida no espaço de estado, e cálculo da matriz de ganho do controlador \tilde{K} deve-se fazer fora de linha, por meio do calculo da equação de Riccati.⁽¹⁰⁻¹⁵⁾ Resultando a equação de Riccati para estado estacionário da forma:

$$\tilde{P} = \tilde{Q} + \tilde{A}'^T \cdot \tilde{P} \cdot \tilde{A}' - \tilde{A}'^T \cdot \tilde{P} \cdot \tilde{B}' \cdot [\tilde{R} + \tilde{B}'^T \cdot \tilde{P} \cdot \tilde{B}']^{-1} \cdot \tilde{B}'^T \cdot \tilde{P} \cdot \tilde{A}' \quad (15)$$

Do valor de \tilde{P} obtém-se a matriz de ganho K .

$$\tilde{K} = [\tilde{R} + \tilde{B}'^T \cdot \tilde{P} \cdot \tilde{B}']^{-1} \cdot \tilde{B}'^T \cdot \tilde{P} \cdot \tilde{A}' \quad (16)$$

Com o ganho \tilde{K} calculado com a equação (16), sendo $\tilde{K} = [K \ -K_i]$ para logo obter a lei de controle dada pela Equação (17):

$$u(k) = -K \cdot x(k) + K_i \cdot v(k) \quad (17)$$

O diagrama de blocos do controle ótimo de estado estacionário é mostrado na Figura 9, onde se assume que todos os estados encontram se disponíveis. Devem se posicionar dentro do circulo unitário, Essas raízes são as raízes características ou autovalores.

3.5 Validação dos resultados do controle

Para fazer a avaliação da técnica de controle usaram-se dados reais obtidos da laminação da bobina de aço N° 982 1612 feita na planta de SIDERAR S.A. na Argentina. Na figura 5 mostra a espessura de entrada a variação da temperatura medidas no processo de laminação real e que são aplicadas ao modelo para testar o controle proposto. Só são introduzidas as variações com respeito a ponto de operação. Mas na simulação só são plotadas as variações de espessura de saída

$(\Delta h_2^{(1)})$ e $(\Delta h_2^{(2)})$ figura 6 e também a ação de controle para as duas cadeiras ($\Delta g_{in}^{(1)}$, $\Delta g_{in}^{(2)}$) (figura 7). Os resultados de controle são para um controlador ótimo e para um controlador ótimo com ação integral.

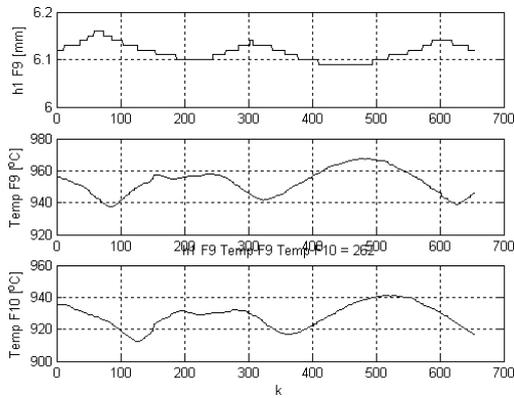


Figura 5. Variação da espessura de entrada e de temperatura da tira nas Cadeiras F9 e F10.

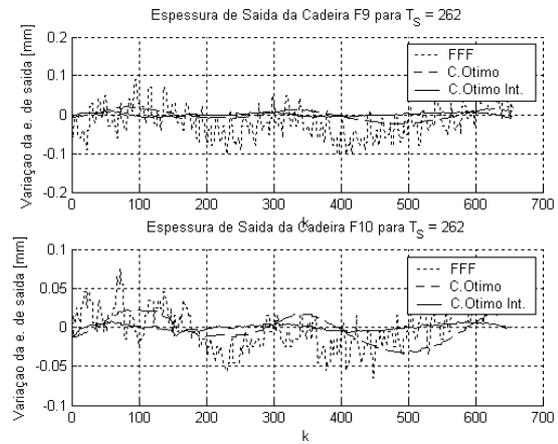


Figura 6. Espessura de saída na cadeira F9 e F10 com FFF, controle ótimo e controle ótimo com ação integral.

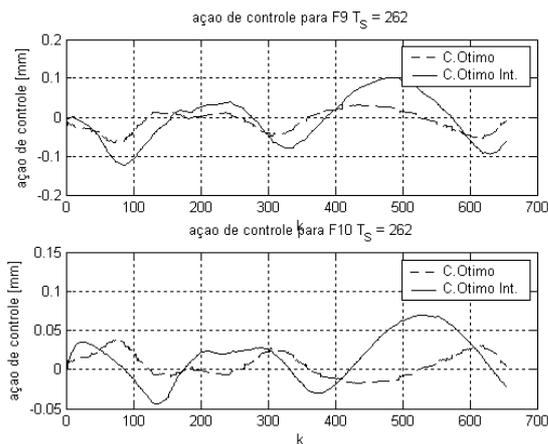


Figura 7. Variação do gap nas cadeiras F9 e F10 respectivamente.

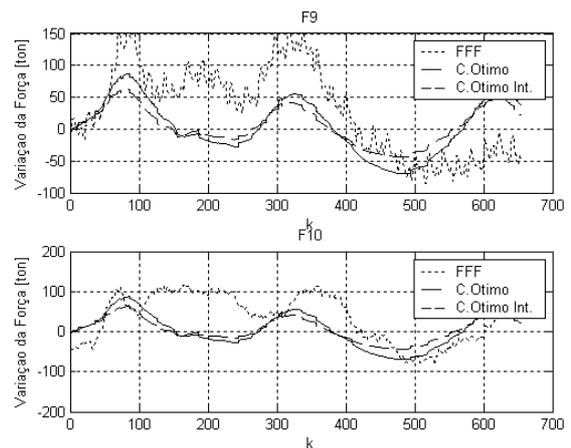


Figura 8. Variação da carga de laminação com os diferentes controladores para as cadeiras F9 e F10 respectivamente.

A Figura 8 mostra o resultado da simulação para a carga de laminação para um controle FFF e com controle ótimo. O diagrama de blocos do controle ótimo de estado estacionário é mostrado na Figura 9, onde se assume que todos os estados encontram-se disponíveis.

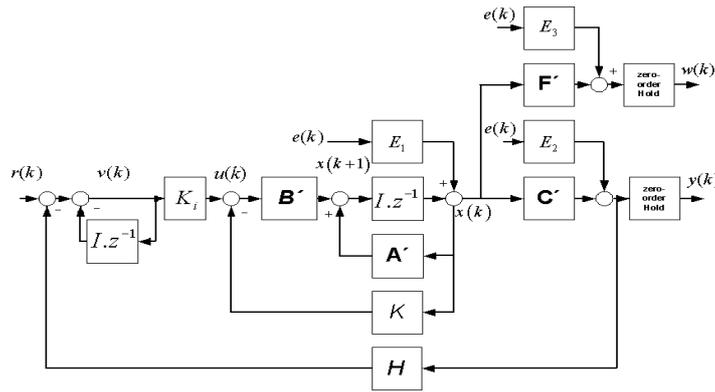


Figura 9. Modelo de controle representado em espaço de estado. Onde o vetor de referencia é $r(k)=[0,0,0]^T$. e a matriz $H=[1\ 0\ 0; 0\ 1\ 0; 0\ 0\ 1]$.

4 CONCLUSÕES

O modelo de laminação apresentado neste artigo é baseado no modelo de laminação dinâmico calibrado com valores reais medidos no processo de laminação. Depois fazendo a linearização do modelo no ponto de operação construímos o modelo representado em espaço de estados. Desta forma possuímos um modelo dinâmico para as duas ultimas cadeiras de laminação com um comportamento muito similar ao processo real dentro da faixa de operação que foi considerada.

Os resultado que se observam as variações de espessura comparando as duas técnicas de controle, o processo controlado com técnicas de controle ótimo teve menor variação de espessura que o sistema force feed forward FFF sendo esta ultima técnica possui uma maior dispersão da espessura. O controlador ótimo, em contrapartida precisa da medição da temperatura e a espessura na entrada das duas ultimas cadeiras. A técnica é simples de implementar e poderia ser usada em paralelo ou em troca do sistema Force feed forward (FFF) nas duas ultimas cadeiras de laminação

REFERÊNCIAS

- 1 GINZBURG , (1989).. “Steel Rolling Technology: Theory and Practice. Marcel Dekker. New York and Basel
- 2 BRYANT. G. , (1973).”The automation of tandem cold mills”, The Iron Steel Institute, London
- 3 OROWAN, E.. *The Calculation of Roll Pressure in Hot and Cold Rolling* ; Proc. Inst. Of Mechanical Engineers, 150,140-67, february/1944.
- 4 ALEXANDER, J.M.. *On the Theory of Rolling*; Proc. R. Soc. London, A. 326, p.535-63,1972.
- 5 FLECK,N.A., JOHNSON,K.L., “Towards a New Theory of Cold Rolling Thin Foil”, Int. J. Mech. Sci., Vol.29, No.7,1987, pp.507-524.
- 6 DENTI FILHO, J.. *Um método de Controle Dinâmico de Laminadores reversíveis*, Doctoral tesis, UFMG, abril 1994.
- 7 HOSHINO I.,MAEKAWA Y.,FUJIMOTO T., KIMURA H.E KIMURA H., (1988), “Observer-based multivariable control of the aluminium cold tandem mill”. *Automatica*, **24** ,pp 741-758.

- 8 ETCHECHOURY, M., SOLSONA, J. E MURAVCHIK, C. (2001). Feedback Linearization via State Transformation Using Estimated States. *Int. J. Syst. Science*, 32(1):1-7.
- 9 MathWorks (1998). MATLAB: User's Guide, The MathWorks, Inc., Natick, MA.
- 10 KUO B., (1992). *Automatic Control Systems*. Prentice Hall Inc, fourth edition
- 11 OGATA K., (1996).. *Modern Control Engineering*. Prentice Hall Inc, third edition.
- 12 KUCHEN B., CARELLI R., POSTIGO J E MUT V., (2000)., *Control Digital Avanzado*, Reporte interno Instituto de Automatica, UNSJ.
- 13 SLOTINE, J. E. e LI, W. (1991). *Applied Nonlinear Control*, Prentice-Hall, NJ.
- 14 ESFANDIARI, F. e KHALIL, H. K. (1992). Output Feedback Stabilization of Fully Linearizable Systems. *Int. J. Contr.*, 56(5):1007-1037.
- 15 ROJAS MORENO A, . (2001). *Control Avanzado*. Editorial Maguiña, Cap.4

MODELING AND OPTIMAL CONTROL OF A HOT ROLLING MILL¹

*Francisco Guido Rossomando²
Jose Denti Filho³*

Abstract

In this article, we describe an application of optimal control to the strip rolling process. The models are presented in the state variable notation and the control objective is to minimize the exit strip thickness variation. It was used real data from rolling process. The control results are tested and compared inside the simulation environment developed to support the validation of the control strategy, using the real data from a system controlled by a conventional technic. The optimal control strategy adopted results in exit thickness variation lesser then that obtained with the conventional technic.

Key words: Hot rolling; Optimal control; State space.

¹ *Technical contribution for 42nd Rolling Seminar - Processes, Rolled and Coated Products da ABM- , Santos – SP, October 25 to 28, 2005.*

² *Universidade federal do espírito santo – Ppgee-Ufes – estudante de doutorado, M.Sc. – laboratório de controle e instrumentação (lci) – Vitória-ES-Brasil*

³ *Universidade federal do espírito santo – Ppgee-Ufes – professor adjunto , D.Sc. – laboratório de controle e instrumentação (lci) – Vitória-ES-Brasil*