

MODELAGEM E CONTROLE DE UM TREM DE LAMINAÇÃO A QUENTE

Francisco G. Rossomando*, e Jose Denti Filho*

* LCI, DEL, CT, Universidade Federal do Espírito Santo
29060-900, Av. Fernando Ferrari, s/n, Vitória, ES, Brasil, +55-27-3335-2687
e-mail: frosoma@ele.ufes.br; jdenti@ele.ufes.br

Palavras Chave: controle ótimo, laminação a quente, espaço de estados.

Resumo. *O trabalho descrito neste artigo, prove uma aplicação real de controle ótimo ao processo de laminação a quente. É utilizada uma formulação do modelo em espaço de estados para minimizar a variação da espessura da tira. Os resultados do controle do modelo são testados e comparados 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.*

1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho apresenta-se uma proposta de controle de espessura de saída para a laminação de produtos planos. O esquema proposto leva em consideração o conhecimento do processo para a aplicação de técnicas de controle ótimo.

A versatilidade apresentada pelo ambiente de simulação desenvolvido motivou o seu emprego durante a fase da análise da cadeia na validação dos resultados.

É importante ressaltar que dentre outras características a simulação constitui-se num importante ferramental de análise da dinâmica simplificada da cadeia de laminação, permitindo a validação dos controladores projetados.

Ainda nesta introdução descreve-se o problema de controle e nos itens seguintes apresenta-se o controle convencional, a estrutura de controle ótimo, a estrutura de controle ótimo com ação integral proposta e a comparação dos resultados.

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, redução de espessura. As máquinas que promovem este processo, 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 fig. 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.

As cadeiras de laminação são constituídos por quatro cilindros, dois cilindros de trabalho dois de apoio ou encosto, Neste trabalho tem-se em conta o fenômeno físico da laminação feito por dois cilindros de trabalho.

Tomando como base a Fig. 1 passamos a discorrer brevemente sobre o funcionamento da cadeira.

A tira proveniente das cadeiras anteriores em forma de produto plano ou de uma bobina (material enrolado), é introduzida na abertura entre os cilindros de trabalho, que é menor que a espessura da tira, esta abertura (gap) é determinada pela posição dos parafusos que posicionam os cilindros.

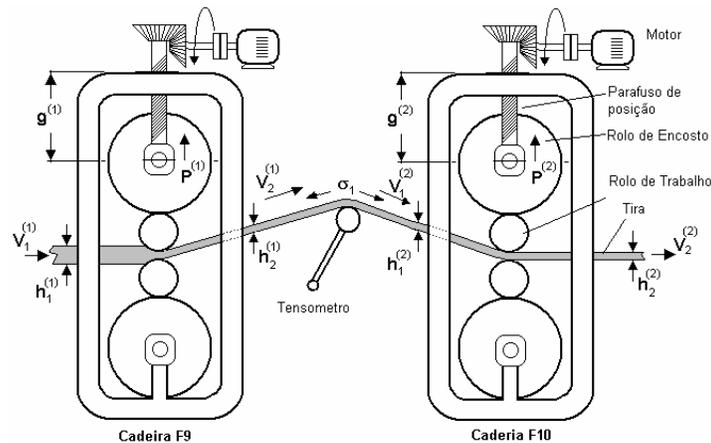


Fig. 1: Cadeiras de Laminação com dois rolos de trabalho e dois de encosto

Estes cilindros arrastam a tira para o interior da cadeira, promovendo uma redução de espessura na mesma. Esta tira deve sair e entrar na outra cadeira até obter a espessura desejada ou ser bobinada na saída da última cadeira.

Nossa principal motivação neste trabalho é a redução das variações da espessura de saída para qualquer perturbação das variáveis de entrada ao processo (Temperatura da tira ou espessura de entrada), a fig. 2 mostra três gráficos de um processo real de laminação nas quais observamos a presença de zonas frias pontos (indicados pela seta) fig. 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 fig. 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, vê-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 Fig. 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.

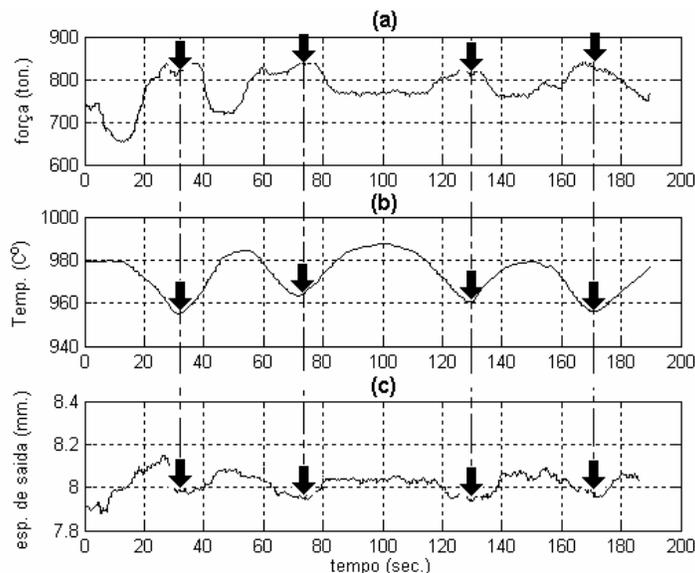


Fig. 2: Pontos frios na tira.

2 CONTROLE CONVENCIONAL - FORCE FEED FORWARD (FFF)

O sistema de controle de espessura *force feed forward* (FFF) é baseado na detecção de flutuações na resistência a deformação do material que está 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. O esquema é mostrado na fig. 3

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.

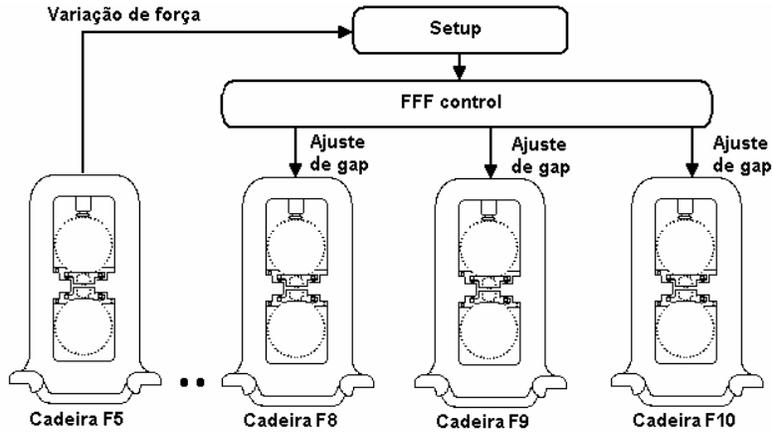


Fig. 3: Controle com Force Feed Forward

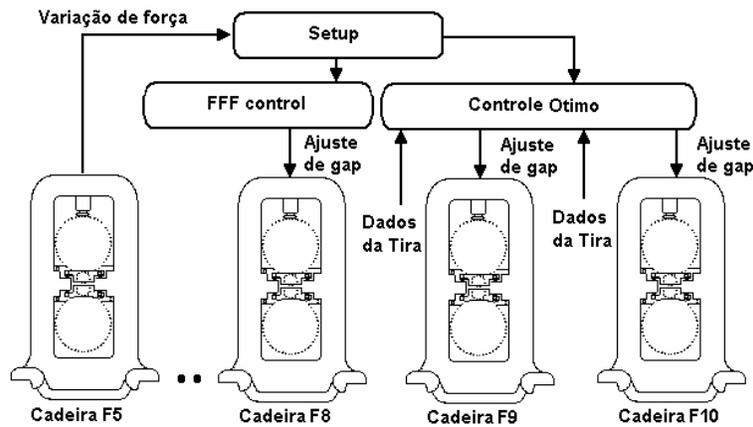


Fig. 4: Controle proposto com controle ótimo sobre as duas últimas cadeiras.

3 CONTROLE PROPOSTO

Para desenvolver o controle nas duas últimas cadeiras aplicamos técnicas de controle ótimo com ação integral ao modelo representado no espaço de estado. A fig. 4 mostra o esquema geral do controle proposto.

Para o sistema considerado nossas entradas de controle são $\Delta g_{in}^{(1)}$, $\Delta V_{in}^{(1)}$, $\Delta g_{in}^{(2)}$ as saídas controladas são $\Delta h_2^{(1)}$, $\Delta \sigma_1$, $\Delta h_2^{(2)}$, sendo as saídas medíveis $\Delta h_2^{(1)}$, $\Delta \sigma_1$, $\Delta h_2^{(2)}$, $\Delta P^{(1)}$ e $\Delta P^{(2)}$. O objetivo básico de controle é de manter a variação da espessura de saída da tira (Δh_2) o mais próximo possível do valor zero, para qualquer variação da temperatura, ou da espessura de entrada ao sistema.

Qualquer alteração nas variáveis de entrada são consideradas perturbações e o sistema de controle deve manter a variação da espessura o mais próximo do valor zero agindo sobre o gap (Δg), a qual é a nossa variável de controle da variação da espessura de saída (Δh_2).O

mesmo acontece para a variação de tensão que depende da quantidade da tira acumulada entre as cadeiras F9 e F10 e esta tensão é função das diferenças de velocidade de saída e de entrada da tira nas cadeiras F9 e F10 respectivamente, em nosso caso esta tensão é controlada pela variação da velocidade periférica dos rolos da cadeira F9

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.

Esses resultados são comparados com os valores reais medidos nas cadeiras de laminação controlados pelo controle FFF (*force feed forward*) (Bryant. et al 1973)¹ (Ginzburg et al. 1989)².

Para obter um modelo aproximado da cadeira de laminação, trabalho-se com as teorias de Orowan (Orowan et al 1944)³, e Alexander (Alexander et al 1972)⁴, 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 eq. (4) e o escorregamento pela eq. (5).

3.2 Equações básicas do modelo

O modelo matemático implementado leva em consideração a duas últimas cadeiras do processo, já que o controle FFF faz um ajuste da espessura nas duas últimas cadeiras. Em nosso caso fazemos o ajuste da espessura nas duas últimas cadeiras com as técnicas de controle ótimo, utilizando o modelamento matemático no espaço de estados.

A espessura de saída de cada cadeira é função do gap dos rolos e do estiramento da cadeira

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

Onde:

(i): Cadeira de laminação i=1 (F9), i=2 (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).

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

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

Onde:

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

E : Modulo de Young da tira. 21.000 N/m

L : Distancia de separação entre cadeiras (i). 5.486 m.

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

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

A continuidade de volume da tira no gap dos cilindros esta definida como:

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

A força de laminação esta representada pela equação:

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

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 na cadeira (i).

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

A função de escorregamento esta definida como:

$$f^{(i)} = f(h_1^{(i)}, h_2^{(i)}, \sigma_1^{(i)}) \quad (5)$$

3.3 Considerações básicas do modelo

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.

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

Consideramos também que a força de laminação função da espessura de entrada, espessura de saída temperatura e da tensão entre cadeiras (Denti,1994)⁵ e (Hoshino,1988)⁶. As curvas de sensibilidade representam a variação da força de laminação:

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

Onde os coeficientes da função linearizada são:

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \frac{\partial P^{(1)}}{\partial \sigma_1}; \beta_2 = \frac{\partial P^{(1)}}{\partial h_2^{(1)}}; \beta_3 = \frac{\partial P^{(1)}}{\partial h_1^{(1)}}; \beta_4 = \frac{\partial P^{(1)}}{\partial T^{(1)}} \\ \beta_5 &= \frac{\partial P^{(2)}}{\partial \sigma_1}; \beta_6 = \frac{\partial P^{(2)}}{\partial h_2^{(2)}}; \beta_7 = \frac{\partial P^{(2)}}{\partial h_1^{(2)}}; \beta_8 = \frac{\partial P^{(2)}}{\partial T^{(2)}} \end{aligned} \quad (7)$$

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

$$\begin{aligned}\Delta f^{(1)} &= \alpha_1 \cdot \Delta \sigma_1 + \alpha_2 \cdot \Delta h_2^{(1)} + \alpha_3 \cdot \Delta h_1^{(1)} \\ \Delta f^{(2)} &= \alpha_4 \cdot \Delta \sigma_1 + \alpha_5 \cdot \Delta h_2^{(2)} + \alpha_6 \cdot \Delta h_1^{(2)}\end{aligned}\quad (8)$$

Onde os coeficientes são:

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \frac{\partial f^{(1)}}{\partial \sigma_1}; \alpha_2 = \frac{\partial f^{(1)}}{\partial h_2^{(1)}}; \alpha_3 = \frac{\partial f^{(1)}}{\partial h_1^{(1)}} \\ \alpha_4 &= \frac{\partial f^{(2)}}{\partial \sigma_1}; \alpha_5 = \frac{\partial f^{(2)}}{\partial h_2^{(2)}}; \alpha_6 = \frac{\partial f^{(2)}}{\partial h_1^{(2)}}\end{aligned}\quad (9)$$

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

$$\begin{aligned}\Delta V_2^{(1)} &= (1 + f^{*(1)}) \cdot \Delta V^{(1)} + V^{*(1)} \cdot \Delta f^{(1)} \\ \Delta V_2^{(2)} &= (1 + f^{*(2)}) \cdot \Delta V^{(2)} + V^{*(2)} \cdot \Delta f^{(2)}\end{aligned}\quad (10)$$

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

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

$$T_g \frac{dg^{(i)}}{dt} = g_{in}^{(i)} - g^{(i)} \quad (11)$$

$$T_v \frac{dV^{(i)}}{dt} = V_{in}^{(i)} - V^{(i)} \quad (12)$$

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

A variação da espessura de saída da cadeira F9 é igual á variação da espessura de entrada da cadeira F10 então $\Delta h_2^{(1)} = \Delta h_1^{(2)}$:

A estrutura geral do modelo representado em espaço de estados é mostrada na equação (13)

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u} + \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{e} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{e} \\ \mathbf{w} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{E}_3 \cdot \mathbf{e} \end{cases} \quad (13)$$

Onde os vetores de entrada, de espaço de estado, de perturbação e de saída são:

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

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

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \left(\frac{K^{(1)}}{K^{(1)} - \beta_2} \right); \varepsilon_2 = \left(\frac{\beta_1}{K^{(1)} - \beta_2} \right); \varepsilon_3 = \left(\frac{\beta_3}{K^{(1)} - \beta_2} \right); \varepsilon_4 = \left(\frac{\beta_4}{K^{(1)} - \beta_2} \right) \\ \varepsilon_5 &= \left(\frac{K^{(2)}}{K^{(2)} - \beta_6} \right); \varepsilon_6 = \left(\frac{\beta_5}{K^{(2)} - \beta_6} \right); \varepsilon_7 = \left(\frac{\beta_7}{K^{(2)} - \beta_6} \right); \varepsilon_8 = \left(\frac{\beta_8}{K^{(2)} - \beta_6} \right) \\ T_\sigma &= -1 \left/ \left\{ \frac{E}{L} \left(V^{*(1)} \cdot \alpha_1 + V^{*(1)} \cdot \alpha_2 \cdot \varepsilon_2 \dots - V^{*(2)} \cdot \alpha_4 \cdot \frac{h_2^{*(2)}}{h_1^{*(2)}} - V^{*(2)} \cdot \alpha_5 \cdot \varepsilon_6 \cdot \frac{h_2^{*(2)}}{h_1^{*(2)}} - V^{*(2)} \cdot (\alpha_5 \cdot \varepsilon_7 + \alpha_6) \cdot \varepsilon_2 \cdot \frac{h_2^{*(2)}}{h_1^{*(2)}} \right) \right\} \right. \\ M_1 &= \frac{E}{L} \cdot \left(V^{*(1)} \cdot \alpha_2 \cdot \varepsilon_1 - V^{*(2)} \cdot (\alpha_5 \cdot \varepsilon_7 + \alpha_6) \cdot \frac{h_2^{*(2)}}{h_1^{*(2)}} \right) \cdot T_\sigma ; M_2 = -\frac{E}{L} \cdot \left(V^{*(2)} \cdot \alpha_5 \cdot \varepsilon_5 \cdot \frac{h_2^{*(2)}}{h_1^{*(2)}} \right) \cdot T_\sigma ; M_3 = \frac{E}{L} \cdot (1 + f^{*(1)}) \cdot T_\sigma \\ M_4 &= \frac{E}{L} \cdot \left(V^{*(1)} \cdot (\alpha_2 \cdot \varepsilon_3 + \alpha_3) - V^{*(2)} \cdot (\alpha_5 \cdot \varepsilon_7 + \alpha_6) \cdot \varepsilon_5 \cdot \frac{h_2^{*(2)}}{h_1^{*(2)}} \right) \cdot T_\sigma \\ M_5 &= \frac{E}{L} \cdot \left(V^{*(1)} \cdot \alpha_2 \cdot \varepsilon_4 - V^{*(2)} \cdot (\alpha_5 \cdot \varepsilon_7 + \alpha_6) \cdot \varepsilon_4 \cdot \frac{h_2^{*(2)}}{h_1^{*(2)}} \right) \cdot T_\sigma ; M_6 = -\frac{E}{L} \cdot \left(V^{*(2)} \cdot \alpha_5 \cdot \varepsilon_8 \cdot \frac{h_2^{*(2)}}{h_1^{*(2)}} \right) \cdot T_\sigma \end{aligned}$$

Os valores de A,B,C,F são:

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{pmatrix} -1/T_\sigma & M_1/T_\sigma & M_3/T_\sigma & M_2/T_\sigma \\ 0 & -1/T_g^{(1)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/T_v & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/T_g^{(2)} \end{pmatrix}; \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1/T_g^{(1)} & 0 & 0 \\ 0 & 1/T_v & 0 \\ 0 & 0 & 1/T_g^{(2)} \end{pmatrix} \\ \mathbf{C} &= \begin{pmatrix} \varepsilon_2 & \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ (\varepsilon_6 + \varepsilon_7 \cdot \varepsilon_3) & \varepsilon_7 \cdot \varepsilon_1 & 0 & \varepsilon_5 \end{pmatrix}; \mathbf{F} = \begin{pmatrix} (\beta_1 + \beta_2 \cdot \varepsilon_2) & \beta_2 \cdot \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ (\beta_5 + \beta_6 \cdot \varepsilon_6 + \beta_6 \cdot \varepsilon_7 \cdot \varepsilon_2 + \beta_7 \cdot \varepsilon_2) & (\beta_6 \cdot \varepsilon_7 + \beta_7) \cdot \varepsilon_1 & 0 & \beta_6 \cdot \varepsilon_5 \end{pmatrix} \\ \mathbf{E}_1 &= \begin{pmatrix} M_4/T_\sigma & M_5/T_\sigma & M_6/T_\sigma \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \mathbf{E}_2 = \begin{pmatrix} \varepsilon_3 & \varepsilon_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \varepsilon_7 \cdot \varepsilon_3 & \varepsilon_7 \cdot \varepsilon_4 & \varepsilon_8 \end{pmatrix} \\ \mathbf{E}_3 &= \begin{pmatrix} (\beta_3 + \beta_2 \cdot \varepsilon_3) & (\beta_4 + \beta_2 \cdot \varepsilon_4) & 0 \\ (\beta_7 + \beta_6 \cdot \varepsilon_7) & (\beta_7 + \beta_6 \cdot \varepsilon_7) \cdot \varepsilon_4 & (\beta_8 + \beta_6 \cdot \varepsilon_8) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

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

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}' \cdot \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}' \cdot \mathbf{u}(k) + \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{e}(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}' \cdot \mathbf{x}(k) + \mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{e}(k) \\ \mathbf{w}(k) = \mathbf{F} \cdot \mathbf{x}(k) + \mathbf{E}_3 \cdot \mathbf{e}(k) \end{cases} \quad (14)$$

Para demonstrar que o processo é completamente controlável construímos a matriz \mathbf{M}_c de controlabilidade. (Kuo, 1992)⁷, (Ogata, 1996)⁸ e (Kuchen et al. 2000)⁹ da forma:

$$\mathbf{M}_c = [\mathbf{B}' \quad \mathbf{A}' \cdot \mathbf{B}' \quad \mathbf{A}'^2 \cdot \mathbf{B}' \quad \mathbf{A}'^3 \cdot \mathbf{B}'] \quad (15)$$

e obtivemos que o posto da matriz \mathbf{M}_c é igual a ordem do processo demonstrando que o mesmo é completamente controlável.

Para provar que o sistema é completamente observável, ou seja, se o estado pode se

determinar a partir da medição da saída durante um intervalo de tempo finito. A matriz de observabilidade \mathbf{M}_o é definida como:

$$\mathbf{M}_o = [\mathbf{C}' \quad \mathbf{C}'\mathbf{A}' \quad \mathbf{C}'\mathbf{A}'^2 \quad \mathbf{C}'\mathbf{A}'^3]^T \quad (16)$$

Obtivemos que o posto da matriz \mathbf{M}_o é igual a ordem do processo sendo o mesmo completamente observável

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 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). Para esta nova ordem ampliada o modelo considerado continua sendo observável e controlável. O novo vetor de estado pode ser definido como $\xi(k) = [\mathbf{x}(k) \quad \mathbf{v}(k)]^T$, sendo o vetor $\mathbf{v}(k)$ a ação integral para as três variáveis realimentadas.

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

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} [\xi^T(k) \cdot \tilde{\mathbf{Q}} \cdot \xi(k) + \mathbf{u}^T(k) \cdot \tilde{\mathbf{R}} \cdot \mathbf{u}(k)] \quad (17)$$

As matrizes \mathbf{R} e \mathbf{Q} são duas matrizes simétricas e definidas positivas, com o objetivo de conferir o valor ótimo para o índice \mathbf{J} .

A estrutura da planta é a estabelecida no espaço de estado, e cálculo da matriz de ganho do controlador $\tilde{\mathbf{K}}$ deve-se fazer fora de linha, por meio do calculo da equação de Riccati. Resultando a equação de Riccati^{10,11} para estado estacionário da forma:

$$\tilde{\mathbf{P}} = \tilde{\mathbf{Q}} + \tilde{\mathbf{A}}'^T \cdot \tilde{\mathbf{P}} \cdot \tilde{\mathbf{A}}' - \tilde{\mathbf{A}}'^T \cdot \tilde{\mathbf{P}} \cdot \tilde{\mathbf{B}}' \cdot [\tilde{\mathbf{R}} + \tilde{\mathbf{B}}'^T \cdot \tilde{\mathbf{P}} \cdot \tilde{\mathbf{B}}']^{-1} \cdot \tilde{\mathbf{B}}'^T \cdot \tilde{\mathbf{P}} \cdot \tilde{\mathbf{A}}' \quad (18)$$

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

$$\tilde{\mathbf{K}} = [\tilde{\mathbf{R}} + \tilde{\mathbf{B}}'^T \cdot \tilde{\mathbf{P}} \cdot \tilde{\mathbf{B}}']^{-1} \cdot \tilde{\mathbf{B}}'^T \cdot \tilde{\mathbf{P}} \cdot \tilde{\mathbf{A}}' \quad (19)$$

Com o ganho $\tilde{\mathbf{K}}$ calculado com a equação (19), sendo $\tilde{\mathbf{K}} = [\mathbf{K} \quad -\mathbf{K}_i]$ para logo obter a lei de controle dada pela equação (20):

$$\mathbf{u}(k) = -\mathbf{K} \cdot \mathbf{x}(k) + \mathbf{K}_i \cdot \mathbf{v}(k) \quad (20)$$

O diagrama de blocos do controle ótimo de estado estacionário é mostrado na fig. 5, 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.

Com a retroalimentação de estados o sistema muda a um sistema autónomo, onde a dinâmica está regida pelos autovalores da matriz:

$$(\tilde{A}' + \tilde{B}'\tilde{K}) \quad (21)$$

Os autovalores encontram-se posicionados dentro do círculo unitario, tanto para o controlador otimo e para o controlador otimo com ação integral.

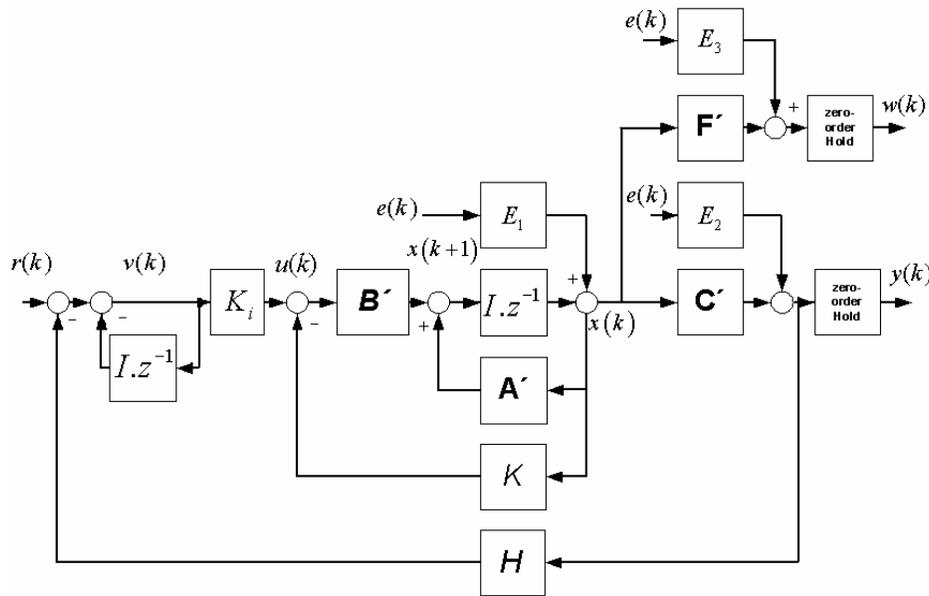


Fig. 5: Modelo de controle representado em espaço de estado.

Onde o vetor de referencia é $\mathbf{r}(k)=[0,0,0]^T$. e a matriz de realimentação $\mathbf{H}=[1\ 0\ 0; 0\ 1\ 0; 0\ 0\ 1]$

3.4 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 fig. 6 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 $\Delta h_2^{(2)}$) e as variações de tensão ($\Delta \sigma_1$), também é plotada a ação de controle para as duas cadeiras ($\Delta g^{(1)}$ $\Delta V^{(1)}$ $\Delta g^{(2)}$). Os resultados de controle são para um controlador ótimo e para um controlador ótimo com ação integral.

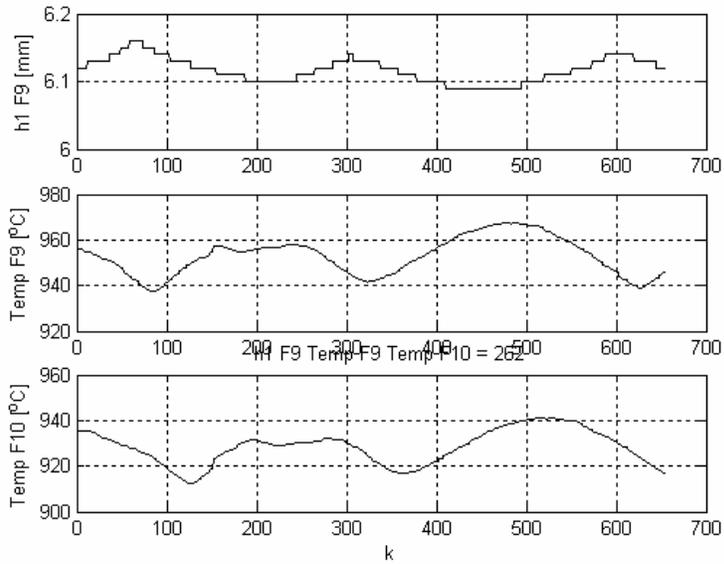


Fig. 6: Variação da espessura de entrada e de temperatura da tira nas Cadeiras F9 e F10. Espessura de Saida da Cadeira F9 para $T_s = 262$

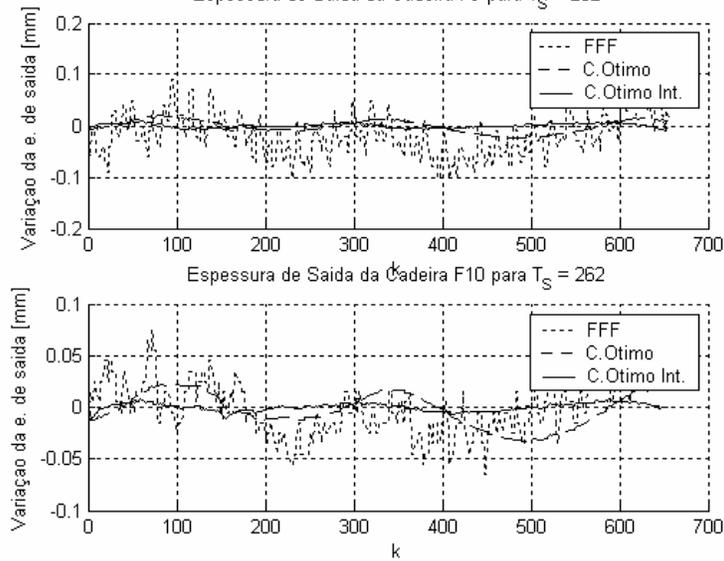


Fig. 7: Espessura de saída na cadeira F9 e F10 com FFF ,controle ótimo e controle ótimo com ação integral.

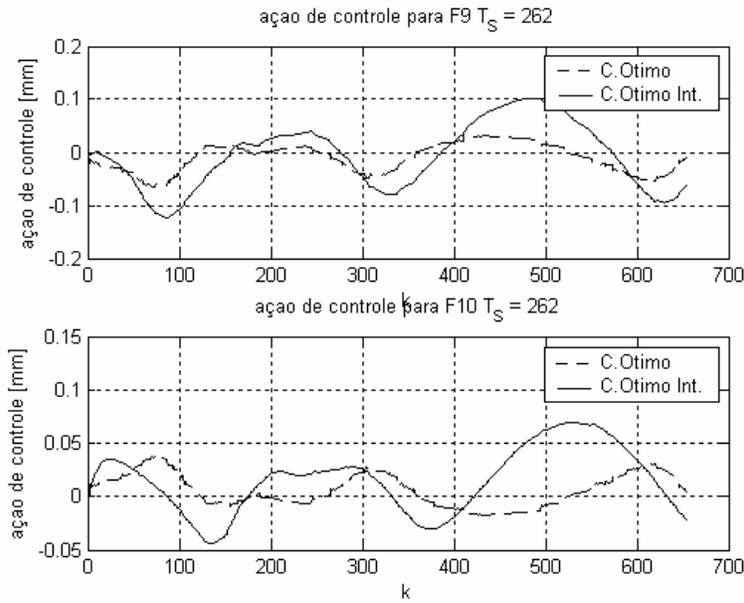


Fig. 8:variação do gap nas cadeiras F9 e F10 respectivamente.

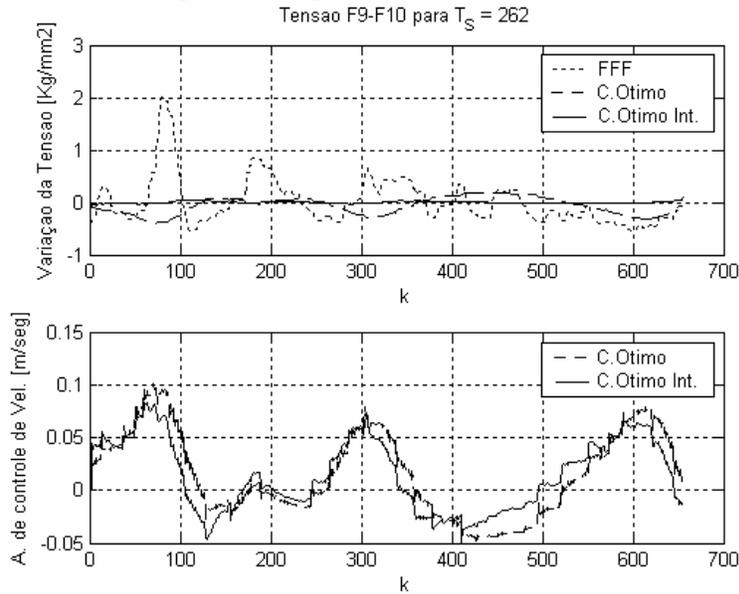


Fig. 9: variação da tensão da chapa e variação da velocidade de controle da cadeira F9.

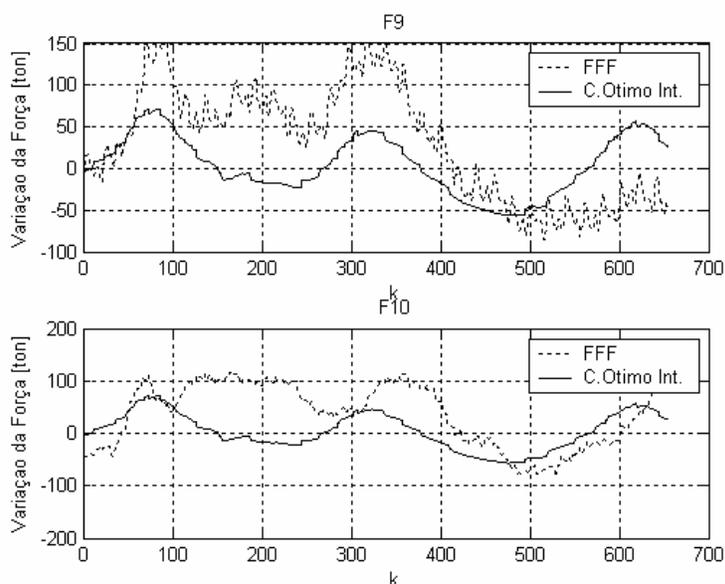


Fig. 10: Variação da carga de laminação com controle ótimo integral para as cadeiras F9 e F10 respectivamente.

A fig. 10 mostra o resultado da simulação para a carga de laminação para um controle FFF e com controle ótimo e na fig. 9 e plotada a tensão calculada pelo modelo, a variação da tensão real não é conhecida e foi estimada em função do ângulo do tensometro. A fig. 8. mostra a variação do gap nas cadeiras para as perturbações do modelo.

A fig. 7 mostram as variações da espessura de saída para as cadeiras F9 e F10, sendo a variação de referencia desejada para a saída igual a zero. O erro para controle ótimo é menor de 30 μm e no caso do controle convencional (FFF) chega até 100 μm . Obtiveram-se os mesmos resultados para diferentes dados obtidos no processo de laminação e o erro de espessura no caso de controle ótimo é sempre menor ao erro do controle FFF, que é o controlador real da planta.

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 e com os parâmetros fornecidos pela empresa Siderar S.A.. Depois fazendo a linearização do modelo em torno do 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 apresentou, por simulação

computacional, menor variação de espessura que o sistema force feed forward FFF real tomado como comparação, sendo que esta última técnica apresenta uma maior dispersão da espessura. O controlador ótimo, em contrapartida precisa da medição da temperatura e a espessura na entrada das duas últimas cadeiras. A técnica é simples de implementar e poderia ser usada em paralelo, para verificação de seu desempenho em condições reais de operação, visando uma possível substituição do sistema force feed forward (FFF) nas duas últimas cadeiras de laminação.

5 REFERÊNCIAS

- [1] Bryant. G. "The automation of tandem cold mills", The Iron Steel Institute, London, (1973).
- [2] Ginzburg "Steel Rolling Technology: Theory and Practice. Marcel Dekker. New York and Basel (1989).
- [3] Orowan, E.. "The Calculation of Roll Pressure in Hot and Cold Rolling"; *Proc. Inst. Of Mechanical Engineers*, 150,140-67, (1944).
- [4] Alexander, J.M.. "On the Theory of Rolling"; *Proc. R. Soc. London*, A. 326, p.535-63,(1972)
- [5] Denti Filho, J.. *Um método de Controle Dinâmico de Laminadores reversíveis*, UFMG, (1994)
- [6] Hoshino I.,Maekawa Y.,Fujimoto T., Kimura H.e Kimura H. "Observer-based multivariable control of the aluminium cold tandem mill". *Automatica*, **24** ,pp 741-758 (1988).
- [7] Kuo B., *Automatic Control Systems*. Prentice Hall Inc, fourth edition. (1992).
- [8] Ogata K., *Modern Control Engineering*. Prentice Hall Inc, third edition. (1996).
- [9] Kuchen B.,Carelli R.,Postigo J e Mut V., *Control Digital Avanzado*, Reporte interno Instituto de Automatica, UNSJ,. (2000)
- [10]Kuo B., *Automatic Control Systems*. Prentice Hall Inc, fourth edition. (1992)
- [11]Ogata K., *Modern Control Engineering*. Prentice Hall Inc, third edition. (1996).