

# ESTUDO PARA IMPLANTAÇÃO DE CONTROLE MULTIVARIÁVEL DE VELOCIDADE E TENSÃO DE UM LAMINADOR DE ENCRUAMENTO<sup>1</sup>

*Gilberto de Oliveira Novaes<sup>2</sup>  
Roberto Moura Sales<sup>3</sup>  
Carlos Thadeu Ávila Pires<sup>4</sup>  
Henrique Cezar Ferreira<sup>5</sup>*

## Resumo

Apesar do objetivo do laminador de encruamento ser a obtenção da têmpera da tira através do alongamento, na prática a maior dificuldade está na obtenção da qualidade superficial da tira e do aplainamento. Grande parte dos problemas tem origem nos processos de desenrolamento e re-enrolamento da tira. O desempenho do controle de velocidade e de tensões mecânicas tem grande influência na qualidade do produto final. Para os controles de tração mecânica e velocidade são utilizados sistemas de controle SISO, baseados em controle PID. Existem variações paramétricas relacionadas às inércias mecânicas a serem consideradas. Foi obtido um modelo matemático linear para o sistema de acionamento, escritas as equações diferenciais, e construídas as matrizes de representação do modelo em espaço de estados. A partir da obtenção do modelo e das equações e o contorno dos problemas de variação paramétrica, é possível o emprego de técnica de controle multivariável para o controle de velocidade e tensões mecânicas do laminador de encruamento. Com isso, pode-se usufruir dos benefícios de robustez e desempenho proporcionados pelas técnicas de controle multivariável. Em particular, é explorada a teoria LQG/LTR.

**Palavras-chave:** Laminação; Acionamento CC; Controle multivariável; LQG/LTR.

## STUDY TO DEVELOP A MULTIVARIABLE CONTROL OF SPEED AND TENSION IN A SKINPASS MILL

### Abstract

In spite of the objective of the skinpass mill is the steel tempering by means of strip elongation, in practice the main difficulty is in obtaining the surface quality of strip and flatness. Most of the problems are originated in the process of unwinding and re-winding of the strip. The performances of speed and mechanical tension controls have great influence on the quality of the final product. For the control of mechanical tension and speed are used SISO control systems based on PID control. There are parametric variations related to mechanical inertia to be considered. It was obtained a linear mathematical model for the drive system, wrote the differential equations, and constructed the matrices to represent the state-space model. Upon obtaining the model and the equations and outline the problems of parametric variation, it is possible the use of multivariable control technique to control speed and mechanical tensions of the skinpass mill. After that we can seize the benefits of robustness and performance provided by the techniques of multivariable control. In particular, it is explored the theory LQG / LTR.

**Key words:** Rolling; DC drive; Multivariable control; LQG / LTR.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 13º Seminário de Automação de Processos, 7 a 9 de outubro de 2009, São Paulo, SP.*

<sup>2</sup> *Membro da ABM, analista de manutenção da laminação a frio da Usiminas - Cubatão e mestrando da Escola Politécnica da USP.*

<sup>3</sup> *Professor doutor da Escola Politécnica da USP.*

<sup>4</sup> *Membro da ABM, especialista em laminação a frio, doutor em engenharia elétrica pela Escola Politécnica da USP.*

<sup>5</sup> *Professor universitário e pós-doutorando pela Escola Politécnica da USP.*

## 1 INTRODUÇÃO

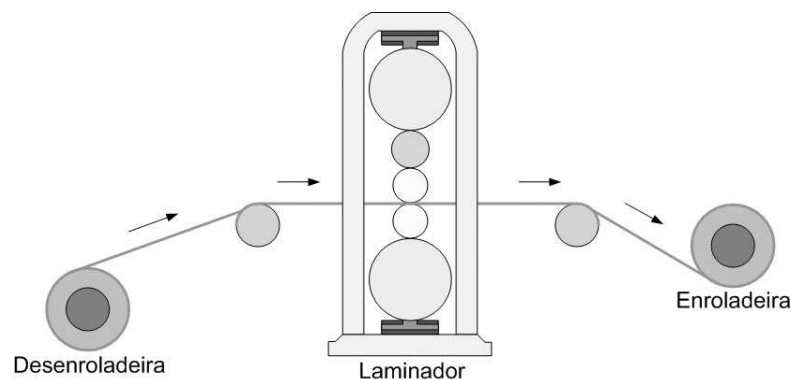
O processo de laminação a frio consiste em reduzir a espessura da tira para atender os requisitos dimensionais e as propriedades mecânicas solicitadas pelo cliente.

Os Laminadores de Encruamento tem a finalidade de proporcionar um endurecimento superficial à tira de aço por meio da aplicação de um alongamento (redução de espessura) controlado, para restaurar a têmpera do material recozido e prepará-lo a processos de estampagem. Se a tira de aço não passasse pelo laminador de encruamento haveria o aparecimento de linhas de distensão (ou linhas de Luder) quando o material fosse submetido a algum processo de estampagem.<sup>(1)</sup>

A laminação de encruamento é praticamente o processo de conformação final da tira e tem também a responsabilidade de imprimir a rugosidade final da tira, garantindo o aspecto e qualidade superficial.

Quando é utilizado o processo de recozimento em caixa é obrigatório que as tiras de aço sejam enroladas em bobinas no laminador de tiras a frio. Essas bobinas são encaminhadas para os fornos de recozimento onde são aquecidas e resfriadas de forma controlada e com atmosfera controlada. Após o resfriamento, as bobinas são encaminhadas ao laminador de encruamento.

No laminador de encruamento a bobina de aço é desenrolada com uma tensão mecânica controlada. A tira de aço passa por cilindros de laminação que a submetem a uma força de compressão. Em seguida, a tira é novamente enrolada com uma tensão mecânica, também, controlada, como visto na Figura 1. As tensões mecânicas são determinadas pelo controle dos torques aplicados aos motores da desenroladeira e da enroladeira.



**Figura 1.** Fluxo da tira de aço no laminador.

O laminador é acionado por um motor acoplado ao cilindro de laminação através de eixos articulados. O motor do laminador aplica a energia para a deformação da tira, sob os cilindros, e determina a velocidade da tira. As bobinas de aço são desenroladas e reenroladas sob tensão. Esse tensionamento mecânico é necessário à estabilização da tira no laminador, mas também é essencial ao processo de laminação a frio. As tensões aplicadas à tira, na entrada na saída dos cilindros de laminação contribuem para o processo de redução de espessura. Se não existissem essas tensões seria necessária uma força de laminação muito maior para produzir a mesma redução na espessura (alongamento) da tira. Se a tensão mecânica for muito alta poderá ocorrer o deslizamento entre espiras, ao passo que

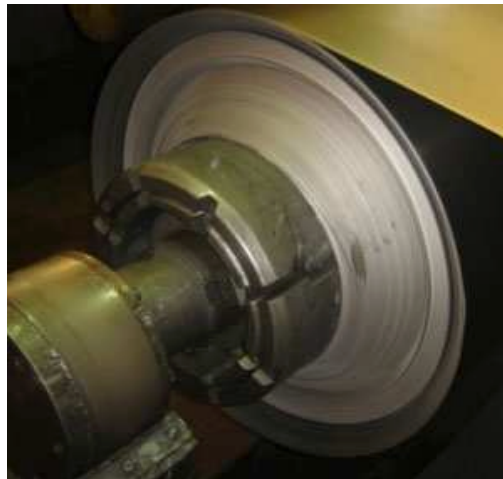
se a tensão mecânica for muito reduzida poderá desestabilizar a tira no laminador, causar a ruptura da tira ou provocar o defeito "quebra de superfície".<sup>(2)</sup>

No caso da enroladeira, se a tensão mecânica aplicada sobre a tira for muito alta, poderá ocorrer o colapso das espiras internas quando a bobina for removida do mandril. Por outro lado, se a tensão mecânica for muito baixa poderá haver deslizamento entre espiras durante o desenrolamento no processo seguinte.

Um fenômeno que não pode ser negligenciado é a introdução de defeitos na tira devido tanto à aplicação de baixas tensões quanto à aplicação de altas tensões de bobinamento.

Outros defeitos também podem surgir se a tira de aço for desbobinada com uma tensão inferior à tensão na qual ela foi bobinada no processo anterior. Esses fenômenos são relatados por Domanti, McInnes e Hesling<sup>(2)</sup> e Vathaire e Faessel.<sup>(3)</sup>

Na Figura 2 vê-se um exemplo do fenômeno bacía, ou telescópio, relatado por Edwards e Boulton.<sup>(4)</sup> Esse deslocamento entre as espiras provoca riscos na tira de aço que afetam gravemente o aspecto superficial da tira. Isso inviabiliza a aplicação do produto em partes expostas, muito comuns nas indústrias de eletrodomésticos e automobilística.



**Figura 2.** Defeito "Bacia" provocado em experimento controlado.

Este problema em particular é resultado de um experimento realizado por Oliveira e Novaes<sup>(5)</sup> e foi causado pela incompatibilidade entre a tensão mecânica de enrolamento no laminador de tiras a frio e a tensão mecânica de desenrolamento no laminador de encruamento.

Para que as tensões sejam mantidas nos valores definidos pela referência (não obrigatoriamente constantes), durante todo o processo, é importante que haja um controle eficiente, principalmente, durante os transitórios de aceleração e desaceleração do laminador.

## **2 LAMINADOR DE ENCRUAMENTO DA USINA DE CUBATÃO**

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados dados reais de um laminador de encruamento da Usina 2 da Usiminas, planta de Cubatão. Trata-se de um laminador fabricado pela Hitachi que possui uma configuração de cinco cilindros de laminação denominada 5MB (*multi-bending*). O acionamento da cadeia de laminação é feito por um único motor, através dos cilindros de trabalho acoplados por meio de eixos flutuantes e engrenagens.

**Tabela 1.** Dados do laminador

Dados do laminador	
Fabricação	Hitachi
Start-up	Abr./2000
Espessura da tira	0,38 mm a 3,00 mm
Largura da tira	600 mm a 1.600 mm
Velocidade máxima	20 m/seg.
Diâmetro máximo da bobina	1.931 mm
Peso máximo da Bobina	30 toneladas

Os acionamentos principais são feitos por meio de motores de corrente contínua, cujas características são mostradas na Tabela 2.

**Tabela 2.** Dados dos acionamentos principais<sup>(6)</sup>

Dados dos acionamentos principais			
	Desenroladeira	Laminador	Enroladeira
Tensão de armadura (V)	850	850	850
Corrente armadura (A)	960	1352	960
Potência (KW)	780	1.100	1.300
Rotação máxima (rpm)	590	900	630

### 3 EQUAÇÕES DO SISTEMA

Para projetar o controle LQG/LTR é preciso modelar o conjunto mecânico acoplado pela tira e o acionamento elétrico. O acionamento elétrico é composto pelos conversores tiristorizados e os motores de corrente contínua.

Segundo Garcia<sup>(7)</sup> e Lima,<sup>(8)</sup> um motor de corrente contínua pode ser modelado pelas equações 1 e 2.

$$V_m = e_a + L_a \cdot \frac{di_a}{dt} + R_a \cdot i_a \quad (1)$$

$$T_m = J_m \cdot \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \cdot \omega_m + T_c \quad (2)$$

A relação entre a força eletromotriz  $e_a$  e a velocidade angular do motor  $\omega_m$  é dada pela equação 3 e a relação entre o torque produzido pelo motor  $T_m$  e a corrente de armadura  $i_a$  é dada pela equação 4.

$$e_a = K_V \cdot \phi \cdot \omega_m \quad (3)$$

$$T_m = K_T \cdot \phi_a \cdot i_a \quad (4)$$

As constantes  $K_V$  e  $K_T$  dependem do projeto da máquina elétrica. Segundo Garcia,<sup>(8)</sup> se forem utilizadas unidades consistentes essas constante serão numericamente iguais.

A equação 5 descreve o comportamento do torque requerido para acelerar a carga, na qual  $J_c$  corresponde à inércia e  $B_c$  ao atrito viscoso da carga.

$$T_c = J_c \cdot \frac{d\omega}{dt} + B_c \cdot \omega_c \quad (5)$$

Substituindo-se as equações 3, 4 e 5 em 1 e 2 são obtidas as equações 6 e 7 que representam o conjunto motor-carga.

$$V_m = K_v \cdot \phi \cdot \omega_m + L_a \cdot \frac{di_a}{dt} + R_a \cdot i_a \quad (6)$$

$$K_T \cdot \phi \cdot I_a = J_m \cdot \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \cdot \omega_m + J_c \cdot \frac{d\omega_c}{dt} + B_c \cdot \omega_c \quad (7)$$

Transformando-se por Laplace as equações 6 e 7, aplicando algumas manipulações, e considerando que a relação de transmissão entre o acionamento e a carga é unitária, tem-se respectivamente as equações 8 e 9. Sendo que  $J = J_m + J_c$  e  $B = B_m + B_c$ .

$$I_a(s) = \frac{1}{(L_a \cdot s + R_a)} \cdot (V_m(s) - K_v \cdot \phi \cdot \omega_m(s)) \quad (8)$$

$$\omega_m(s) = \frac{1}{(J \cdot s + B)} \cdot K_T \cdot \phi \cdot I_a(s) \quad (9)$$

Substituindo-se a equação 8 em 9, é obtida a equação 10, que descreve o comportamento dinâmico do acionamento.

$$\omega_m(s) = \frac{1}{(1 + K_v \cdot \phi)} \cdot \frac{1}{(J \cdot s + B)} \cdot K_T \cdot \phi \cdot \frac{1}{(L_a \cdot s + R_a)} \cdot V_m(s) \quad (10)$$

#### 4 MODELO MATEMÁTICO LINEAR DO LAMINADOR

O modelo de um acionamento motor-carga, conforme a equação 10, é apresentado na Figura 3. No diagrama,  $V_m$  é a tensão elétrica aplicada ao circuito de armadura do motor,  $I_a$  é a corrente de armadura,  $T_m$  é o torque produzido pelo motor,  $\omega_m$  é a velocidade angular do motor e  $\mathcal{E}$  é a força eletromotriz da armadura do motor.

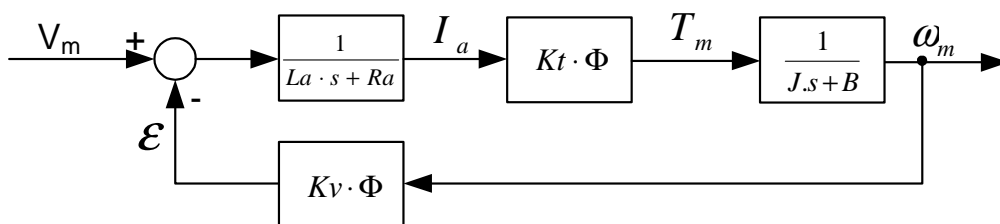


Figura 3 – Acionamento motor carga.

De acordo com Buxbaum,<sup>(9)</sup> a dinâmica dos conversores tiristorizados pode ser representada por um atraso de tempo. Em face das demais constantes de tempo do sistema essa dinâmica torna-se desprezível.

O equacionamento de todo o sistema segue a mesma sistemática, mas é um tanto mais extenso e mais complexo, não sendo viável a sua apresentação neste texto.

Após o desenvolvimento das equações, é obtido o modelo completo da Figura 9, com 3 entradas, 3 saídas e 4 estados internos:

Entradas:

$U_1$ = referência para o conversor da desenroladeira

$U_2$ = referência para o conversor do laminador

$U_3$ = referência para o conversor da enroladeira

Saídas

$Y_1$ = corrente da desenroladeira

$Y_2$ = velocidade do laminador

$Y_3$ = corrente da enroladeira

Estados Internos:

$X_1$ =corrente de armadura do motor do laminador

$X_2$ =velocidade do laminador

$X_3$ =corrente de armadura do motor da desenroladeira

$X_4$ =corrente de armadura do motor da enroladeira

É importante considerar que não há medição direta de tensões de desbobinamento e de bobinamento, de modo que ela é feita indiretamente, a partir do conhecimento dos fluxos dos campos e das correntes de armadura dos motores. Por esse motivo as variáveis de saída para o controle de tensão ( $Y_1$  e  $Y_3$ ) são correntes.

A equação 11 faz o balanço de torque da enroladeira. Considere-se que o fluxo  $\phi$  é proporcional ao diâmetro da bobina  $D_{coil}$ . Por ela nota-se a proporcionalidade entre a tração na tira  $F_{coil}$  e a corrente de armadura, a menos das parcelas correspondentes ao atrito viscoso  $B$ , as perdas mecânicas  $T_{loss}$  e a inércia do conjunto  $J$ .

$$F_{coil} \cdot \frac{D_{coil}}{2} = K_T \cdot \phi \cdot I_a - B \cdot \omega_m - T_{loss} - J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (11)$$

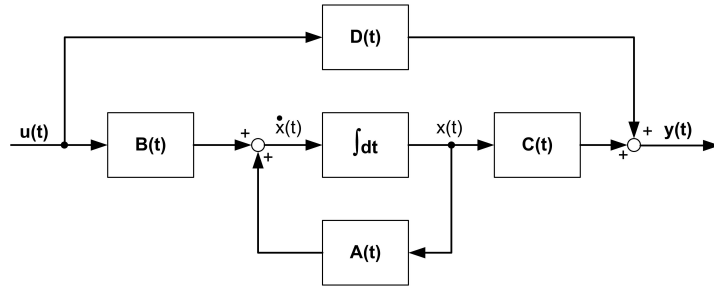
Malhas feedforward independentes devem ser fornecidas para prover as devidas compensações de inércia (e perdas) para a desenroladeira e enroladeira. Tomado esse cuidado, podem-se controlar as tensões mecânicas a partir das correntes de armaduras dos motores principais. Outros fatores precisam ser considerados, mas permanecem invariantes durante o processo, como o diâmetro dos cilindros de laminação  $D_{cil}$ , os escorregamentos avante  $\gamma_F$  e à ré  $\gamma_R$ .<sup>(10)</sup>

## 5 MODELO EM ESPAÇO DE ESTADOS

A representação em espaços de estado é conveniente nos casos onde há um sistema com várias entradas e saídas e um inter-relacionamento complexo entre elas.<sup>(11)</sup> Para representar um sistema em espaço de estados é necessário arranjar as equações diferenciais e reescrevê-las na forma das equações, nas quais  $A(n \times n)$ ,  $B(n \times m)$ ,  $C(l \times n)$  e  $D(l \times m)$  são respectivamente a matriz de estado, matriz de entrada, matriz de saída e matriz de transmissão direta.

$$\dot{x}(s) = A \cdot x(s) + B \cdot u(s) \quad (12)$$

$$y(s) = C \cdot x(s) + D \cdot u(s) \quad (13)$$



**Figura 4** – Diagrama de blocos representando as equações de estado e de saída.

As matrizes  $An$ ,  $Bn$ ,  $Cn$  e  $Dn$  foram obtidas para a planta nominal, a partir do modelo desenvolvido, mostrado no diagrama da Figura 9.

$$An = \begin{bmatrix} -\frac{Ra_2}{La_2} & -\frac{(Kv_2 \cdot \phi_2)}{La_2} & 0 & 0 \\ \frac{Kt_2 \cdot \phi_2}{Jtot} & -\frac{Btot}{Jtot} & -\frac{(1-\gamma_R) \cdot D_{cil} \cdot Kt_1 \cdot \phi_1}{Jtot \cdot D_{pcoil}} & \frac{(1+\gamma_F) \cdot D_{cil} \cdot Kt_3 \cdot \phi_3}{Jtot \cdot D_{tcoil}} \\ 0 & -\frac{(1-\gamma_R) \cdot D_{cil} \cdot Kv_1 \cdot \phi_1}{La_1 \cdot D_{pcoil}} & -\frac{Ra_1}{La_1} & 0 \\ 0 & -\frac{(1+\gamma_F) \cdot D_{cil} \cdot (Kv_3 \cdot \phi_3)}{La_3 \cdot D_{tcoil}} & 0 & -\frac{Ra_3}{La_3} \end{bmatrix}$$

$$Bn = \begin{bmatrix} 0 & \frac{Kd_2}{La_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{Kd_1}{La_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{Kd_3}{La_3} & 0 \end{bmatrix} \quad Cn = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{D_{cil}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad Dn = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

## 6 O CONTROLADOR LQG/LTR.

O controlador LQG (Linear Quadratic Gaussian) com malha de recuperação LTR (Loop Transfer Recovery) surgiu no início da década de 80 com o estudo publicado por Doyle e Stein.<sup>(12)</sup> As vantagens do controle LQG/LTR são a robustez do controlador, o projeto é de natureza sistemática, o número de parâmetros de projeto é relativamente pequeno e é possível a utilização de software de apoio para o desenvolvimento do projeto.

O procedimento de projeto LQG/LTR presume que o modelo nominal da planta seja conhecido, seja linear e seja representado por equações diferenciais de estado e equações de saída, nas quais  $x(t)$  é o estado da planta,  $u(t)$  a entrada da planta,  $y(t)$  a saída da planta e  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$  sejam matrizes reais constantes de dimensões apropriadas. O procedimento de projeto tenta construir o ganho linear de realimentação de estados  $G$  que opera em estimativas dos estados da planta, fornecidos por um filtro linear para satisfazer as restrições de desempenho e robustez.<sup>(13)</sup> O controlador tem sempre a forma da Figura 5 e depende de duas matrizes:  $G$  (ganho do regulador) e  $H$  (ganho do estimador). Na técnica de projeto LQG/LTR esses parâmetros são calculados usando mecanismos formais do regulador linear quadrático (LQR) e o Filtro de Kalman (KF).

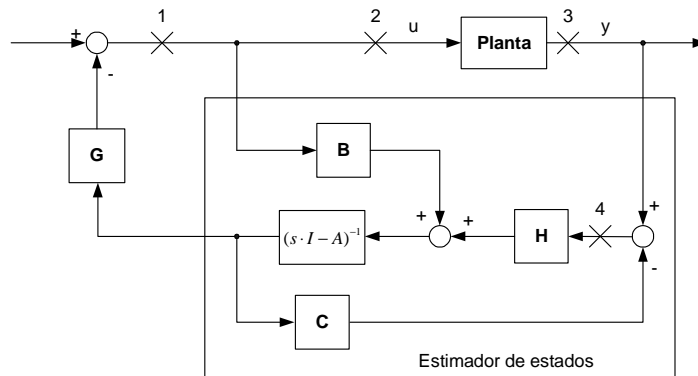


Figura 5 – Estrutura do compensador interno LQG/LTR.

Para a aplicação do controlador na planta do laminador é necessário remover a parcela variante no tempo correspondente à inércia das bobinas na desenroladeira e na enroladeira, devido à mudança nos diâmetros. Isso é feito, desconsiderando as parcelas dos blocos  $[Jp \cdot s + Bp]$  e  $[Jt \cdot s + Bt]$  no modelo utilizado para a síntese do controlador. A ausência dessas parcelas é compensada com um tratamento da referência no qual são introduzidas as malhas feedforward, como nas Figuras 6 e 7.

Apesar dessa simplificação as demais interações entre os canais do controle multivariável são mantidas e vão contribuir para o melhor desempenho do controlador.

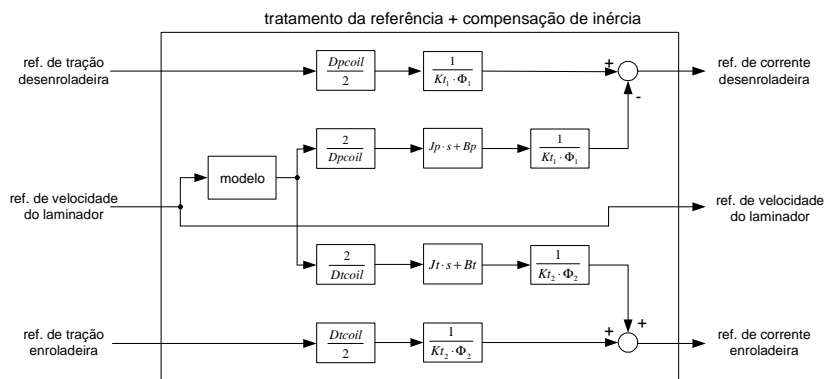


Figura 6 – Tratamento das referências e malhas feedforward.

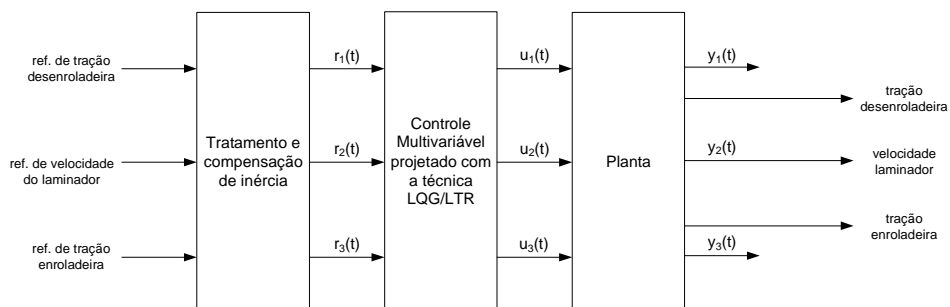


Figura 7 – Diagrama da implementação do controle.

## 7 PROCEDIMENTO DE PROJETO DO CONTROLADOR LQG/LTR

Cruz,<sup>(14)</sup> em seu livro, estabelece um roteiro para a aplicação de uma metodologia de projeto de controlador LQG/LTR. De posse das matrizes que

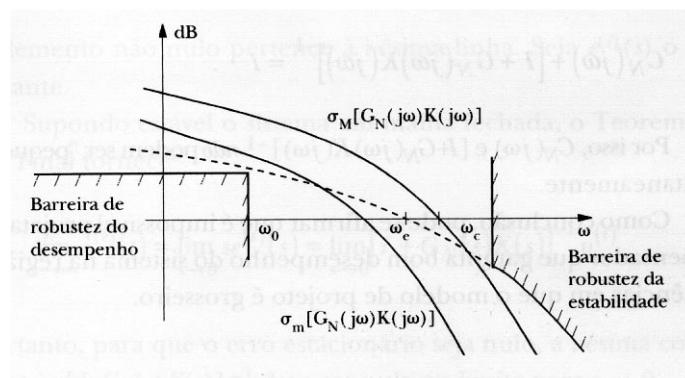


representam a planta em espaço de estados, com base nos requisitos de projeto, devem ser definidas as barreiras de desempenho e de estabilidade.

De forma resumida, pela metodologia proposta é determinado um parâmetro  $\mu$  e uma matriz L, de modo que os valores singulares da expressão 14 obedecem as barreiras de desempenho e estabilidade definidas no projeto, como na figura 8.

$$\sigma_i \cdot \left[ \frac{1}{\sqrt{\mu}} \cdot C \cdot (j\omega \cdot I - A)^{-1} \cdot L \right] \quad (14)$$

A matriz L deve ser escolhida de modo que haja o casamento dos valores singulares, na faixa de frequência de interesse. Seguindo a metodologia proposta matriz L é determinada automaticamente.



**Figura 8** – Diagrama de Bode com as barreiras de desempenho e de estabilidade.<sup>(3)</sup>

Determinadas a constante  $\mu$  e a matriz L, é resolvida a equação algébrica de Riccati da equação 15, com auxílio do programa MATLAB, para a obtenção de  $\Sigma$ .

$$0 = A \cdot \Sigma + \Sigma \cdot A' + L \cdot L' - \frac{1}{\mu} \cdot \Sigma \cdot C' \cdot C \cdot \Sigma \quad (15)$$

Após a obtenção de  $\Sigma$ , calcula-se a matriz de ganhos do filtro de Kalman H, da equação 16.

$$H = \frac{1}{\mu} \cdot \Sigma \cdot C' \quad (16)$$

Resolve-se, agora, a equação de Riccati em 17, obtendo a matriz K.

$$0 = -K \cdot A - A \cdot K - C' \cdot C + \frac{1}{\rho} \cdot K \cdot B \cdot B' \cdot K \quad (17)$$

Calcula-se a matriz de ganho de realimentação de estados G.

$$G = \frac{1}{\rho} \cdot B' \cdot K \quad (18)$$

Finalmente, calcula-se a função de transferência do compensador K(s).

$$K(s) = G \cdot (sI - A + B \cdot G + H \cdot C)^{-1} \cdot H \quad (19)$$

MODELO DO ACIONAMENTO DO LAMINADOR

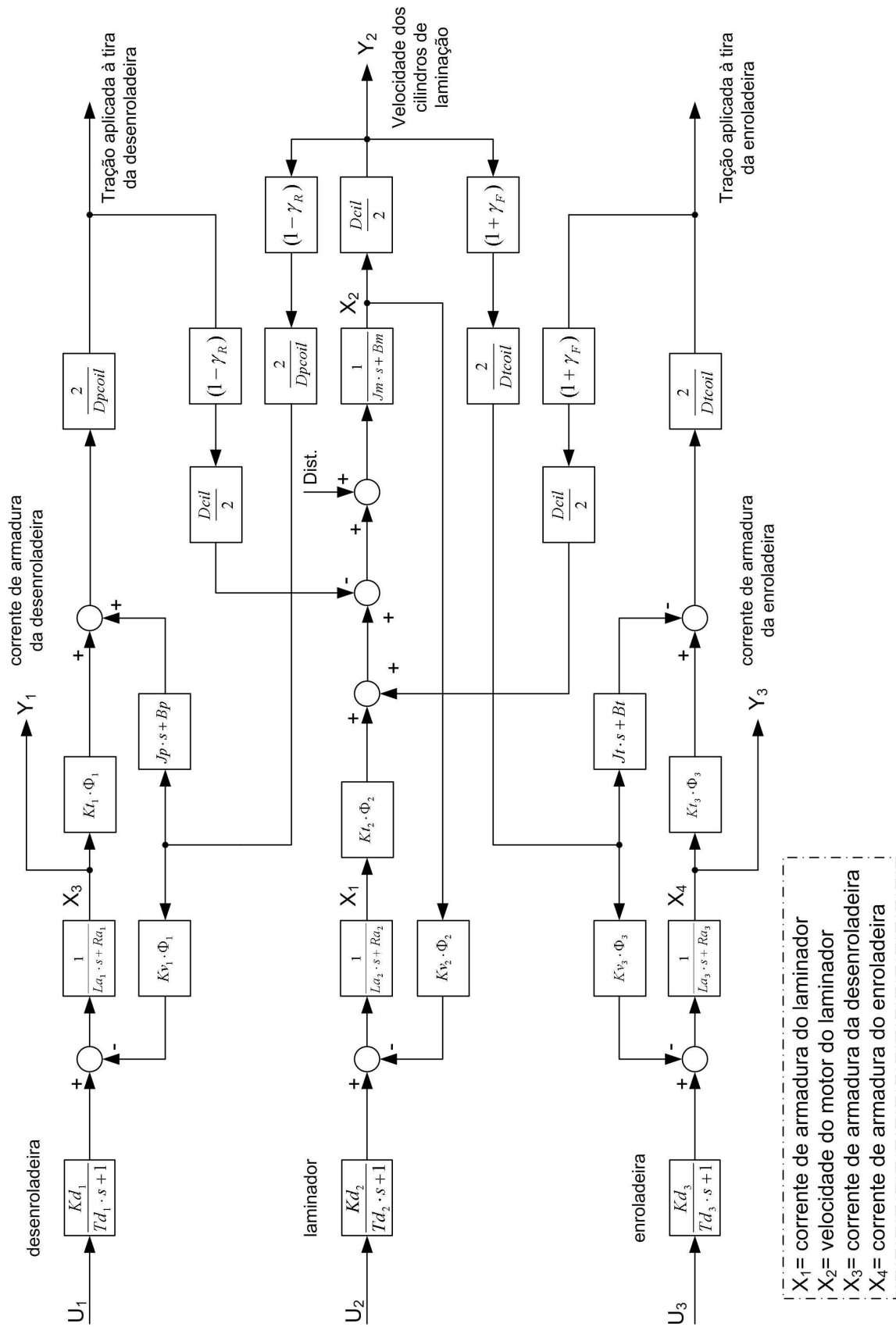


Figura 9 – Modelo completo do laminador.

## 8 CONCLUSÃO

O fato da técnica de controle LQG/LTR estar restrita a sistemas de controle linear invariante no tempo cria um obstáculo inicial ao projeto de um controlador para o acionamento do laminador. Com a elaboração de alguns artifícios é possível superar essas restrições. Foi possível a obtenção de um modelo linear multivariável correspondente à planta nominal a ser controlada. A partir do modelo foram construídas as matrizes de representação do sistema em espaço de estados.

Estabelecendo as barreiras dadas pelos requisitos de controle, é possível aplicar a metodologia LQG/LTR para o projeto do controlador. Comparado ao controle clássico, baseado em controladores PID, o controle multivariável exige o conhecimento mais avançado tanto das teorias de controle quanto da álgebra e cálculo diferencial. Esse é provavelmente o motivo pelo qual o controle PID ainda continua sendo muito utilizado. Com a crescente evolução dos recursos de processamento e métodos computacionais, o controle multivariável tende a se tornar mais presente nas aplicações industriais, trazendo consigo os benefícios de robustez e desempenho.

## REFERÊNCIAS

- 1 GINZBURG, V.B. Steel-Rolling Technology – Theory and Practice. New York: Marcel Dekker, 1989. 791p.
- 2 DOMANTI, S.A.; McINNES, C.; HESLING, S. Analysis of the stress fields in a coil during batch annealing. AISE Steel Technology, nov/dec. p.57-64,2003.
- 3 VATHAIRE, M.; FAESSEL A. Contraintes internes dans les bobines de tôles laminées à froid. Revue de Métallurgie – CIT p.405-419, Mai 1981.
- 4 EDWARDS,W.J.; BOULTON J.G.; The Science of Coil Winding. AISE Steel Technology, p.24-33, nov 2001.
- 5 OLIVEIRA, A.F.; NOVAES, G.O. Redução do defeito marca de deslizamento no laminador de encruamento 2. In: SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO PROCESSOS E PRODUTOS LAMINADOS E REVESTIDOS, 45o, 2008, Porto de Galinhas – PE Anais do 45º Seminário de Laminação Processos e Produtos Laminados e Revestidos - Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 2008. p.
- 6 UCHIDA, M. COSIPA's No.2 Skippass Mill Commissioning Report Order N). 1130-5620 HITACHI,Ltd.,Power&Industrial System - 2000, 29 July.
- 7 GARCIA, C. Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Eletromecânicos. 2ª Edição, São Paulo: EDUSP, 2005. 678p.
- 8 LIMA, F. Modelagem, Análise e Controle de um Sistema de Bobinamento de Tiras de Aço. São Carlos, 2001. 128p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- 9 BUXBAUM, A. (Ed.) Design of Control Systems for DC Drives. : Springer Verlag, 1990. 237p.
- 10 ROBERTS, W.L. Cold Rolling of Steel. New York: Marcel Decker, 1978. 800p.
- 11 D'AZZO, J.J.; HOUPIS, C.H. Linear Control System – Analysis and Design. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 1995. 763p.
- 12 DOYLE, C.J.; STEIN, G. Multivariable Feedback Design: Concepts for a Classic/Modern Synthesis. IEEE transactions on automatic control, v.26, n.1, p.4-16, 1981.
- 13 BIRDWELL, J.D. Evolution of a Design Methodology for LQG/LTR. IEEE control system magazine, v.9, n.3, p.73-78, 1989.
- 14 CRUZ, J.J. Controle Robusto Multivariável. São Paulo: EDUSP, 1996.163p.