

CONTROLE DETENSÃO E ÂNGULO DOS LOOPERSNO LAMINADOR DE TIRAS A QUENTE*

Alex Sandro dos Santos Dias¹
Américo Ferreira Neto²
Sergio Funayama de Castro³
Thiago de Oliveira Lima⁴

Resumo

O laminador de tiras a quente da Usiminas Cubatão possui dois modos de controle dos *loopers*: um convencional, Proporcional e Integral (PI) e outro Integral Linear Quadrático (ILQ), ambos inicialmente disponibilizados para uso da equipe operacional. Após um período, no qual o resultado de sucateamento no *finishingmill* apresentou melhoria, decidiu-se por implementar um modo de seleção dos controladores baseado nos melhores desempenhos dos *loopers* para as famílias de aço e suas dimensões. Com isso, foi possível reduzir significativamente as ocorrências de sucata no *finishingmill*, através dos modos de operação e também ajustes de ganho dos controladores e tensões unitárias para cada um dos *loopers*.

Palavras-chave: *Looper*; Trem Acabador; Laminador de Tiras a Quente.

LOOPER'S ANGLE AND TENSION CONTROL IN HOT STRIP MILL

Abstract

The UsiminasCubatão hot strip mill has two looper control modes, one conventional, Proportional and Integral (PI) and another Integral Linear Quadratic (ILQ), both initially available for operational use. During some period of mill stability, it was decided to develop a method to select the mode control based on the best rolling performances. By these means, it was possible to decrease the cobbles occurrence significantly in the finishing mill by operational selection modes and adjustments of controller gain and unit tension for each looper individually.

Keywords: Looper; Finishing Mill; Hot Strip Mill.

¹ Engenheiro Eletricista, Pós-Graduado em Automação Industrial e Controle de Processos - Mecatrônica, Engenheiro de Manutenção, Laminação a Quente, Usiminas, Cubatão, São Paulo - Brasil.

² Engenheiro Eletricista, Mestrando da POLI-USP-SP, Diretor Industrial, Usiminas, Cubatão, São Paulo - Brasil.

³ Engenheiro de Materiais, Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais, Gerente de Produção, Laminação a Quente, Usiminas, Cubatão, São Paulo-Brasil.

⁴ Engenheiro Mecânico, Pós-Graduado em Engenharia de Manutenção, Engenheiro de Manutenção, Laminação a Quente, Usiminas, Cubatão, São Paulo – Brasil.

1 INTRODUÇÃO

No processo de laminação de tiras a quente, cada cadeira é acionada por um motor de corrente alternada com velocidade controlada por um sistema ASR (*Automatic Speed Regulador*) ou regulador automático de velocidade. Nesta etapa, a estabilidade do processo entre as cadeiras é fundamental para garantia dimensional, qualidade superficial e disponibilidade do equipamento. Para que isso seja possível, a pressão ascendente da tira deve ser mantida, garantindo um correto fluxo de massa entre cada um dos pares de cadeiras de laminação através da utilização de um equipamento com sistema de controle, conforme mostrado na Figura 1.

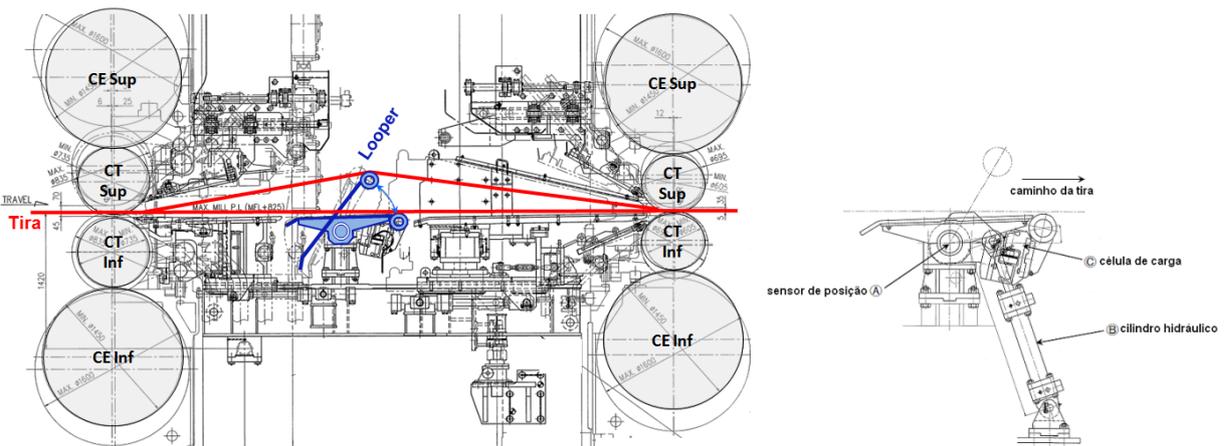


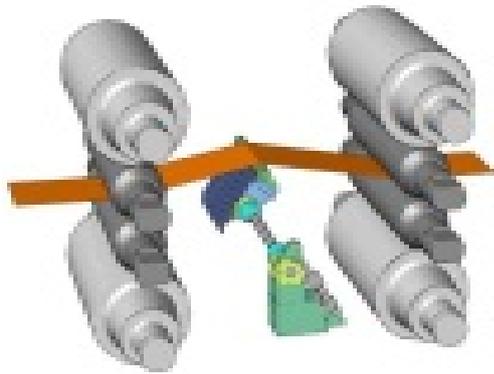
Figura 1. Looper e a geometria entre as cadeiras de laminação.

Este equipamento é denominado como *looper*, onde sua movimentação provoca variações no comprimento da tira entre as cadeiras para controlar o fluxo de massa e eventuais flutuações, que são provocadas por quatro principais motivos:

- Varição de força imposta nas cadeiras de laminação através do sistema de controle automático de espessura (AGC- *Automatic Gauge Control*);
- Heterogeneidade da temperatura ao longo do comprimento da tira oriunda de processos anteriores;
- Escorregamento provocado pela diferença de velocidade entre a tira e os cilindros de trabalho;
- Varição de espessura e resistência ao longo da tira provocada por heterogeneidades de composição química do aço.

Por exemplo, no caso de uma baixa tensão na tira entre as cadeiras, o ângulo do *looper* deve ser elevado para se obter um aumento da tensão na tira, conforme mostrado na Figura 2. Em contra partida, no caso de alta tensão entre as cadeiras, o ângulo do *looper* deve ser reduzido para obter uma redução de tensão conforme mostrado na Figura 2 [1].

I. Aumento de Ângulo (Baixa Tensão na Tira)



II. Redução de Ângulo (Alta Tensão na Tira)

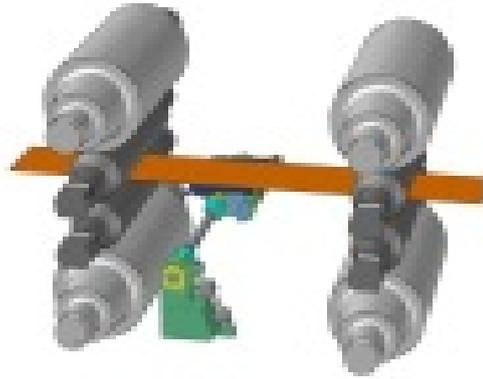


Figura 2. Variação do ângulo do looper em relação a tensão na tira durante processamento.

O perfeito controle do ângulo e do torque no *looper* são fatores críticos para a qualidade da tira e as operações do laminador acabador com sucesso. Devido a fatores como as incertezas dos parâmetros e perturbações de natureza não linear do sistema, fazem do ângulo e do torque no *looper* projetos de controle desafiadores.

Este artigo aplica um controlador de *feedback* adaptativo no circuito de controle da tensão na tira, levando em consideração as características dimensionais do produto e os tipos de aço que estão sendo laminados, combina os benefícios das duas técnicas, controle do ângulo e torque no *looper*, utilizando dados do laminador acabador, atuando de maneira preditiva e melhorando o desempenho global do sistema. Como resposta ao sistema de controle, utilizando os modos de controle ILQ e PI, que tem em suas variáveis principais de controle o ângulo e torque no *looper*, variações de posição através de um circuito hidráulico com uso de servoválvula e cilindro hidráulico. Até a implantação deste estudo no laminador de tiras a quente 2 da Usiminas Cubatão, o processo de laminação no trem acabador utilizava dois modos de controle:

- Inverse Linear Quadratic** (ILQ), modelo utiliza o ângulo no *looper* como variável principal do modelo de controle;
- Proportional Integral** (PI), convencional e não interativo, utiliza o torque no *looper* como variável principal do modelo de controle [1].

A relação destes modos era aleatória e totalmente baseada na experiência dos operadores, causando desvantagens ao processo como:

- Ocorrências de sucateamento de tira no processo de laminação no trem acabador pela incompatibilidade do *setup* definido pelo operador do equipamento;
- Interrupções constantes pela ocorrência das sucatas, diminuindo significativamente a disponibilidade do equipamento;
- Retrabalhos e desvios de produto devido ao não atendimento dos requisitos dimensionais.

1.1 Fatores de Impacto na Qualidade e Produção

O funcionamento incorreto do *looper* durante o desequilíbrio no fluxo de massa da tira que está sendo laminada entre as cadeiras do trem acabador, faz com que a tensão na tira se eleve ou diminua. Este desequilíbrio pode ser causado por quatro principais motivos já citados anteriormente, e quando isso ocorre, o operador de produção do trem acabador não possui condições suficientes para manter o sistema estável, causando defeitos de qualidade e impactos na produção.

Diversos autores relatam os principais defeitos de qualidade na tira, como: redução de largura da tira, ruptura da tira, dobras, estiramento e variações dimensionais da tira [2-8], onde os causadores devido a operação incorreta do *looper* são:

- a. Tensão baixa na tira laminada entre cadeiras de laminação: esta condição provoca elevação do ângulo do *looper* e conseqüentemente elevação da altura da tira entre as cadeiras de laminação, que causa uma dobra na tira de aço e posterior laminação da tira dobrada, quando essa laminação da tira de aço dobrada acontece, o processo é interrompido e em alguns casos, além da interrupção, ocorre a quebra do pescoço do cilindro de laminação.
- b. Tensão alta na tira laminada entre cadeiras de laminação: esta condição provoca diminuição do ângulo do *looper* e conseqüentemente redução da altura da tira entre as cadeiras de laminação, que causa o alongamento do material e ruptura da tira entre as cadeiras de laminação, causando interrupção do processo e em alguns casos, troca dos cilindros de laminação, sejam os de trabalho ou encosto, por incrustações e defeitos superficiais nos cilindros.

O mau funcionamento do *looper* causa perdas ao processo de laminação, onde pode ser citado:

- a. Perda de Utilização Efetiva: corresponde a porcentagem de tempo em que o equipamento efetivamente exerceu sua função, leva em consideração os tempos das paradas em emergência e exclui os tempos das paradas programadas, sejam as paradas para operação, manutenção ou outro responsável qualquer.
- b. Aumento de retrabalhos ou desvios do produto por não atender as especificações do cliente: as perdas de material que são produzidos em um equipamento ocorrem pelo não atendimento aos requisitos especificados pelo cliente e são conhecidas como desvios ou retrabalho.

1.1.1 Ocorrências de desvios de qualidade

As ocorrências de desvio de qualidade em bobinas no período ocorrem devido a presença de defeitos, principalmente como:

- a. Fora de Largura: as ocorrências de fora de largura, sejam para menos ou mais, em relação a largura nominal definida pelo pedido do cliente, ocorrem pela irregularidade obtida na tensão da tira entre as cadeiras de laminação do trem acabador.
- b. Troca de espessura: as trocas de espessura acontecem sempre após a uma parada em emergência para retirada de sucata, seja ela acontecida no trem

acabador, laminador esboçador ou bobinadeira, o tempo elevado para normalização do equipamento e a troca de cilindros de trabalho sempre necessárias após uma ocorrência de sucata, principalmente no trem acabador, afetam o ritmo de descarga no forno de reaquecimento de placas e eliminam o coroamento térmico dos cilindros de trabalho, sendo necessária uma nova sequência de laminação para que as características térmicas dos cilindros de trabalho sejam atingidas, bem como o ritmo de desenformamento das placas.

1.1.2 Ocorrências de retrabalho

As ocorrências de retrabalhos em bobinas no período ocorrem devido a presença de defeitos que são necessários recondicionar as bobinas devido:

- Fora de Largura:** faz-se necessário o descarte da região defeituosa em linhas de acabamento a quente, posteriores ao processo de laminação a quente, normalmente uma linha divisora, que por concepção, além de atender aos retrabalhos, divide o produto dentro da faixa de peso definida pelo cliente. Utilizamos então esta rota de processo de forma adicional, nos casos em que são necessários os retrabalhos, aumentando os custos de produção, porém visando a entrega do produto dentro das dimensões definidas no pedido do cliente.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Modelo de Tensão na Tira

O ajuste dos parâmetros dos controladores PI e ILQ são efetuados com base na determinação da tensão na tira de aço e do ângulo do *looper* obtido no modelo dinâmico e estático. As relações geométricas do *looper* são dadas na Figura 3 e suas nomenclaturas na Tabela 1.

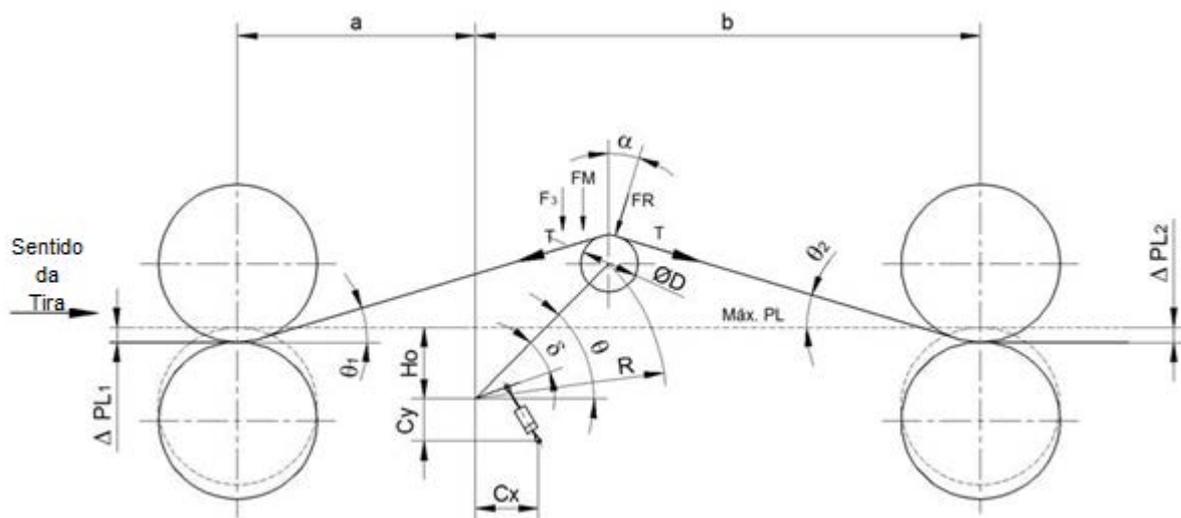


Figura 3. *Looper* e geometria entre as cadeiras de laminação.

Tabela 1. Nomenclaturas para geometria do *looper* das cadeiras de laminação

Símbolo	Unidade	Descrição
T	kg	Tensão da tira
FS	kg	Peso da tira
FM	kg	Força de flexão
R	mm	Comprimento do braço do <i>looper</i>
D	mm	Diâmetro do rolo <i>looper</i>
Ut	kg/mm	Unidade de tensão
W	mm	Largura da tira
t	mm	Espessura da tira
ρ	kg/mm ³	Densidade da tira
θ	graus	Ângulo do <i>looper</i>
θ_0	graus	Ângulo para ajuste da célula de carga
δ	graus	Ângulo entre o braço do <i>looper</i> e alavanca
C_x, C_y	mm	Distância da articulação do <i>looper</i> e distância da articulação cilindro
H_0	mm	Centro axial do <i>looper</i> - máxima distância em relação a linha de passe
H_{01}, H_{02}	mm	Centro axial do <i>looper</i> - posição esperada em relação a linha de passe
$\Delta PL_1, \Delta PL_2$	mm	Diferença entre a máxima e esperada distância em relação a linha de passe

2.1.1 Cálculo da tensão na tira

A tensão na tira pode ser calculada pela força do cilindro do *looper*. A força do cilindro é detectada pela pressão dos transdutores instalados nas cavidades no lado do êmbolo e haste do cilindro, calcula a tensão pelos transdutores e usa para o controle do ângulo do *looper*. A tensão calculada pela célula de carga da pressão será usada como *backup* ou visualização.

2.1.2 Modelo do *looper*

Aplicando a Lei de Newton dos movimentos, para o *looper*, temos as equações e variáveis conforme Tabela 2:

$$S = \frac{(C_Y + L_C) \cdot \text{sen}(\Theta - \delta)}{\cos(\varnothing)} - L_C \quad (1)$$

$$\Theta = \text{sen}^{-1} \left[\frac{L_3 \cdot \cos(\varnothing) - C_Y}{L_C} \right] - \delta \quad (2)$$

$$\varnothing = \text{tan}^{-1} \left[\frac{(C_X - L_C) \cdot \cos(\Theta - \delta)}{(C_Y + L_C) \cdot \text{sen}(\Theta - \delta)} \right] \quad (3)$$

$$\varnothing = \Theta_2 - \Theta_3 \quad (4)$$

$$\Theta_2 = \text{tan}^{-1} \left(\frac{C_X}{C_Y} \right) \quad (5)$$

$$\Theta_3 = \cos^{-1} \left(\frac{L_4^2 + L_3^2 - L_C^2}{2 \cdot L_4 \cdot L_3} \right) \quad (6)$$

Tabela 2. Nomenclaturas para dinâmicas do *looper*

Símbolo	Unidade	Descrição	Cadeiras 1 a 3	Cadeiras 4 a 5
θ	graus	Ângulo do <i>looper</i>	6,4 ~ 71,9	6,4 ~ 71,9
S	mm	Curso do cilindro	10 ~ 410	39,9 ~ 335,8
L_n	mm	Altura do <i>looper</i>	-44 ~ 469	-44 ~ 469
L_4	mm	Centro da manilha do cilindro	1260,5	1260,5
L_0	mm	Cilindro na posição de recuo	1111	1140,9
C_y	mm	Centro da manilha do cilindro no eixo Y	1080	1080
C_x	mm	Centro da manilha do cilindro no eixo X	650	650
L_C	mm	Comprimento da alavanca do cilindro	385	280
R	mm	Comprimento do braço	612	612
δ	graus	Ângulo do braço	6,58	6,58
H_0	mm	Linha de passe máxima no eixo Y	205	205
D	mm	Diâmetro do rolo <i>looper</i>	185	185
X_1	mm	Centro da manilha do cilindro no eixo Y	$X1 = L_C \cdot \text{sen}(\theta - \delta)$	
X_2	mm	Centro da manilha do cilindro no eixo X	$X2 = L_C \cdot \text{cos}(\theta - \delta)$	
ϕ	graus	Ângulo de movimento do cilindro	$\phi = \theta_2 - \theta_3$	
L_3	mm	Manilha do cilindro	$L_3 = L_0 + S$	

2.1.3 Distúrbios e dinâmicas não modeladas

Há distúrbios e dinâmicas não modeladas a partir de várias fontes que afetam o sistema do *looper* e tensão na tira. Para o circuito de tensão na tira, a perturbação principal vem da mudança de fluxo de massa causado pela ação rápida do sistema AGC (*Automatic Gauge Control*). Outro distúrbio é a incompatibilidade de *setup* no laminador acabador que cria uma perturbação constante. Além do deslizamento a frente e para trás, que são influenciados pela variável tensão no tempo, são incertos. Assim, uma velocidade de erro de 5% da velocidade nominal da tira é frequentemente encontrado. Para ângulo do *looper*, os distúrbios e não modelada dinâmica vem dos fenômenos de atrito vicioso do cilindro hidráulico, o torque no *looper* para *bending* na tira e assim por diante.

2.1.4 Sistema hidráulico do *looper*

O *looper* hidráulico tem seu princípio baseado na movimentação de um cilindro acionado por uma servoválvula de quatro vias e três posições. O princípio é mostrado na Figura 4.

O lado êmbolo do cilindro hidráulico está conectado à porta A da servoválvula e o lado haste do cilindro hidráulico está conectado à porta B da servoválvula, a pressão do lado êmbolo é indicada por P_{pst} e a pressão do lado haste é indicada por P_{rod} , a pressão do sistema é indicada por P_{sys} e a pressão de retorno do óleo é indicada por P_{tnk} , a área transversal de ambos os lados do cilindro hidráulico são indicadas por A_{pst} e A_{rod} , o coeficiente de descarga interno e externo estão representados por C_{in} e C_{ex} respectivamente, o deslocamento do cilindro hidráulico é representado por y , o coeficiente de viscosidade cinemática é indicado por B , o coeficiente de resistência elástica é indicado por G , a força de carga é indicada por f_{ld} e a massa equivalente do cilindro hidráulico e a carga é indicada por M , o módulo de *bulk* do óleo hidráulico é indicado por B_e .

Existem três tipos de fluxo de óleo no sistema cilindro hidráulico controlado por servoválvula, são eles:

- Fluxo dinâmico do cilindro hidráulico;
- Fluxo característico da servoválvula;
- Fluxo entre a servoválvula e cilindro hidráulico.

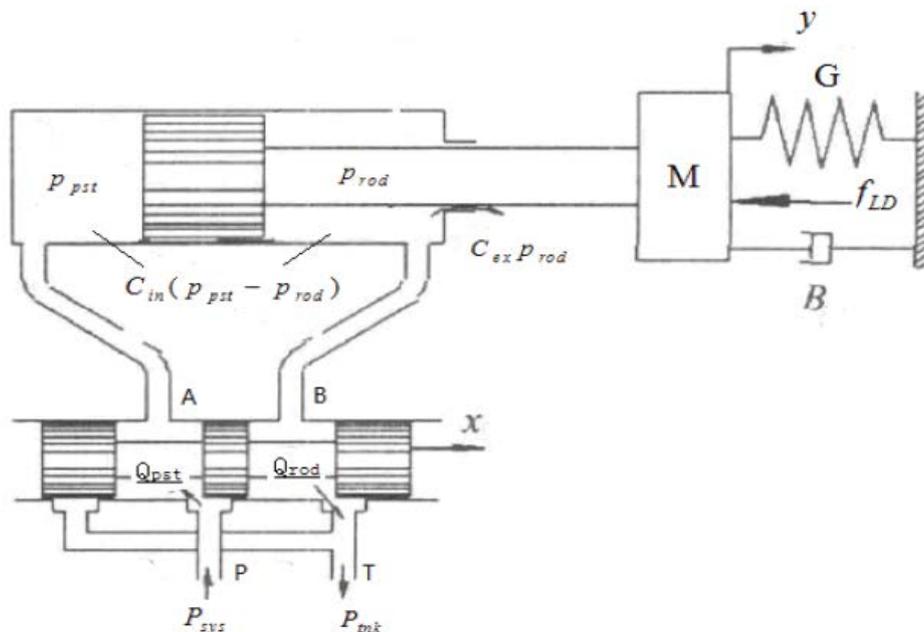


Figura 4. Conjunto cilindro hidráulico acionado por servoválvula.

2.2 Modos de Controle do Looper

2.2.1 Modo de controle ILQ

O controle ILQ consiste no controle de tensão e altura da tira no vão existente entre as cadeiras de laminação do laminador acabador. A tensão e altura da tira são mantidas nos valores definidos pela atuação do controlador que altera a velocidade da cadeira de laminação anterior e ângulo do *looper*.

A Figura 5 ilustra o diagrama de blocos do controle para cilindro hidráulico e motor principal dos motores das cadeiras de laminação em AC (corrente alternada), objeto de estudo deste artigo.

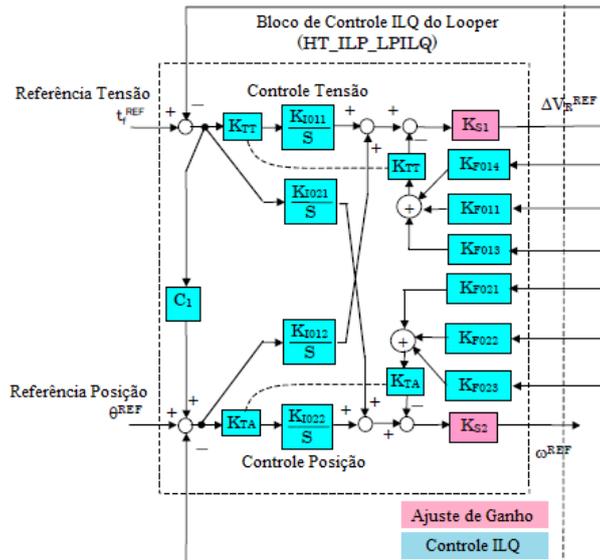


Figura 5. Diagrama de blocos do controle, utilizando posição do cilindro hidráulico no *loopere* motor das cadeiras de laminação AC.

2.2.2 Modo de controle PI

O controle PI, semelhante ao controle ILQ, consiste no controle de tensão e altura da tira no vão existente entre as cadeiras de laminação do laminador acabador. Neste modo, para manter a tensão e altura da tira nos valores definidos, o controlador atua na velocidade da cadeira de laminação anterior e o torque do *loopere*. O controle PI possui os mesmos blocos de controle do controlador ILQ.

A Figura 6 ilustra o diagrama de blocos do controle para cilindro hidráulico e motor principal dos motores das cadeiras de laminação em AC (corrente alternada), objeto de estudo deste artigo.

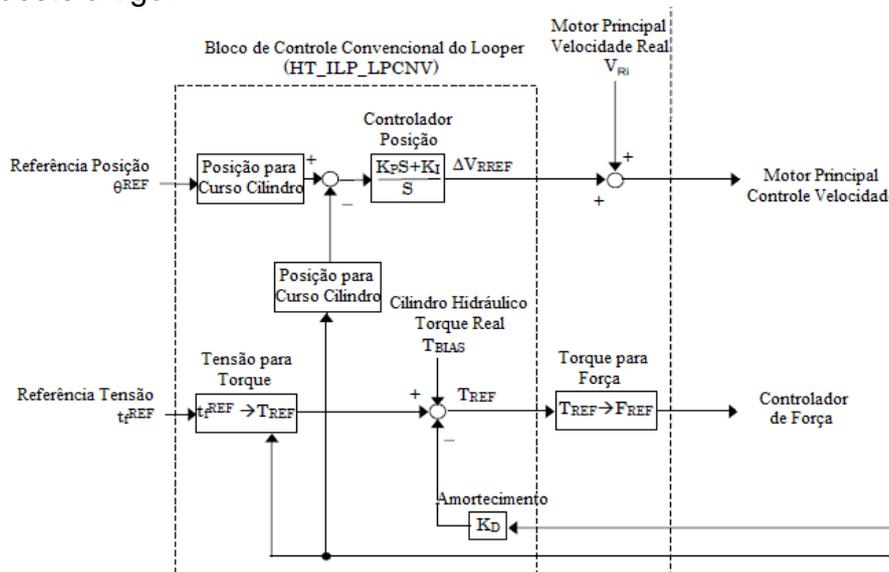


Figura 6. Diagrama de blocos do controle, utilizando torque do cilindro hidráulico no *loopere* motor das cadeiras de laminação AC.

2.2.3 Controladores PI e ILQ Preditivos

Este trabalho de otimização dos dois modos de controle do laminador não necessita da instalação de nenhum hardware ou software. A otimização e melhoria dos dois modos de controle foi efetuado em etapas, que por fim possibilitaram o ajuste dos parâmetros de controle dos dois modos de controle. Estas etapas foram:

- Coleta de dados da produção e das variáveis controladas da tira;
- Tensão unitária do Looper;
- Análise dos dados de produção;
- Nova parametrização dos modos de controle baseada nas etapas a,b,c e d;
- Análise dos resultados e ajustes na parametrização.

2.3 Coleta de Dados da Produção

Os aços possuem composições químicas específicas, definidas por tabela construída a partir da faixa de cada elemento químico que compõem esses aços e seus dimensionais variados, sejam os valores de largura ou espessura do produto final. Essas informações são fundamentais para obtenção de um controle correto do fluxo de massa no laminador acabador, através da seleção dos dois modos de controle do *looper* disponíveis para o operador de produção.

2.4 Tensão Unitária do Looper

Entre cada uma das cadeiras de laminação do laminador acabador um *looper* está instalado, conforme já apresentado no capítulo introdutório. Em função dos dimensionais, largura e espessura, dentro de cada uma das vinte famílias de aço, são definidas tensões unitárias para cada um dos *loopers*, estas tensões são uma das referências utilizadas pelos controladores com o propósito de manter o correto fluxo de massa entre cada uma das cadeiras de laminação do laminador acabador.

A Figura 7 mostra as tensões unitárias aplicadas antes da implementação deste artigo e na Figura 8 as tensões unitárias aplicadas após implementação deste artigo:

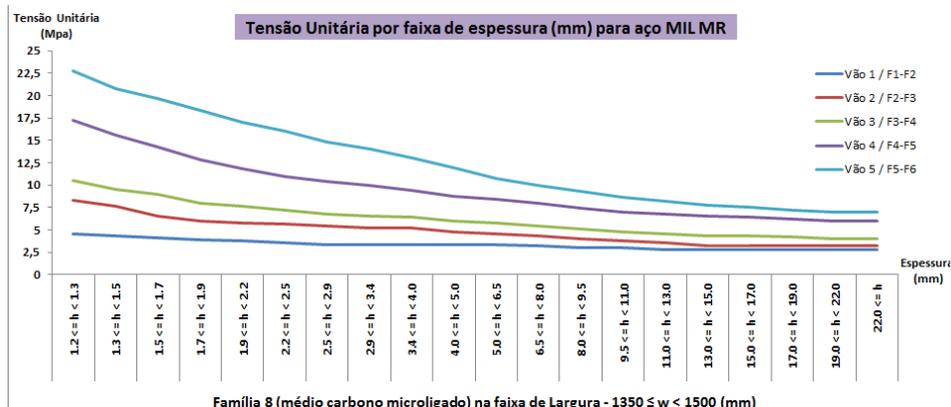


Figura 7. Tensões unitárias antes da implementação.

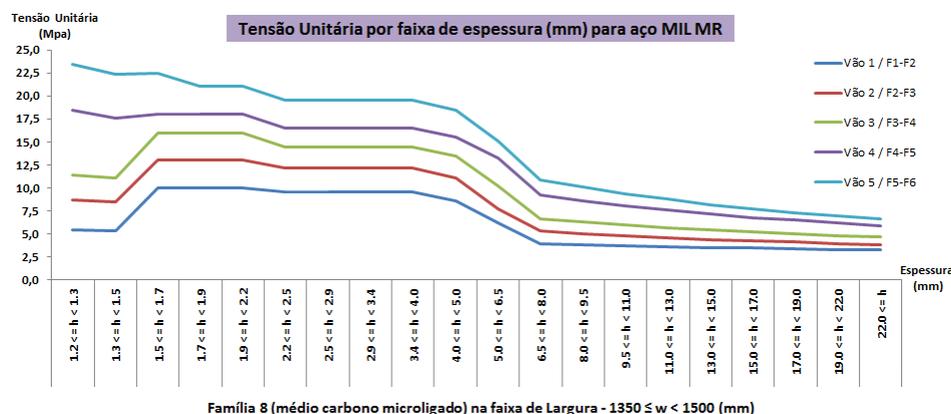


Figura 8. Tensões unitárias depois da implementação.

2.5 Análise dos Dados de Produção

Após implementação das novas tensões unitárias, utilizando as variáveis de consultas definidas nos itens anteriores, para validar o modo de operação adequado a cada uma das famílias de aço e seus dimensionais, dois grupos definem o modo de controle adequado a ser utilizado no *looper* para o operador de produção do laminador acabador. A seguir é apresentado na Tabela 3 um exemplo prático de seleção de modo de controle.

Tabela 3. Exemplos de modos de operação do *looper* para espessuras maiores que 6,0mm.

Modo de Operação		Vão Entre Cadeiras de Laminação				
		1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
Largura	> 1.500 mm	ILQ	ILQ	ILQ	PI	PI
	< 1.500 mm	ILQ	ILQ	ILQ	ILQ	ILQ

2.6 Nova Parametrização dos Modos de Controle

Os modelos foram acompanhados ao longo de um período, sofrendo ajustes e adaptações que melhor representavam o controle do *looper* durante o processo de laminação. Dados históricos foram acompanhados para que fossem possíveis as intervenções em laminação, evitando ocorrências durante o processo. As intervenções no modelo ILQ foram feitas nas duas principais variáveis de controle com alterações de seus ganhos na malha:

- Controle de tensão:** Ajuste no ganho das variáveis K_{TT} e K_{S1} , para as tensões entre as cadeiras de laminação, reduzindo ou aumentando a velocidade da cadeira anterior para garantir o correto fluxo de massa, conforme demonstrado no Item 2.2.1e Figura 5.
- Controle de posição:** Ajuste no ganho das variáveis K_{TA} e K_{S2} , para os ângulos do *looper*, diminuindo ou elevando a altura para garantir o correto fluxo de massa, conforme demonstrado no Item 2.2.1e Figura 5.

As intervenções no modelo PI foram feitas nas duas principais variáveis de controle com alterações de seus ganhos na malha:

- Controle de tensão:** Ajuste no ganho da variável K_{PS} , para as tensões entre as cadeiras de laminação, reduzindo ou aumentando a velocidade da cadeira anterior para garantir o correto fluxo de massa, conforme demonstrado Item 2.2.2 e Figura 6.
- Controle de torque:** Ajuste no ganho da variável K_D , para o torque do *looper*, diminuindo ou elevando a altura para garantir o correto fluxo de massa, conforme demonstrado no Item 2.2.2 e Figura 6.

2.7 Resultados Obtidos

Após as alterações implantadas nos modelos, foi possível obter melhorias significativas nos indicadores chave de processo no LTQ, principalmente:

- Utilização Efetiva:** aumento da disponibilidade do equipamento, alcançando índice superior a 84% por seis meses consecutivos, fato até então inédito no processo.
- Sucatas no Laminador Acabador:** redução expressiva nas ocorrências de sucata, com destaque aos meses de abril e setembro de 2017, com resultado zero ocorrências no *finishing mill*.

3. **Queda ou Desvio de Qualidade:** índice mensal inferior a 0,4% durante seis meses consecutivos, fato até então inédito no processo.
4. **Retrabalho:** índice inferior a 3,0% durante cinco meses consecutivos.
5. **OTIF:** média ao longo de 2017 de 96,57%.

3 CONCLUSÃO

O principal objetivo deste trabalho foi gerar um procedimento para os operadores de produção para tomada de decisão sobre o tipo de controlador a ser usado e dos parâmetros dos controladores a serem empregados (PI e ILQ). Este procedimento normativo visou eliminar significativamente os problemas de qualidade relatados, para tanto foi efetuada a modelagem dinâmica e estática do *looper* e também o obtido dos modos de controle do *looper*. Desta forma, o desenvolvimento e aplicação deste novo procedimento normativo contribuíram para a melhoria dos indicadores de produção. Como continuidade dos desenvolvimentos internos, sugere-se que esta relação do modo de controle PI ou ILQ e os respectivos ajustes de parâmetros sejam efetuados de maneira automática empregando técnicas de Inteligência Artificial, objetivando também a incorporação dos parâmetros da indústria 4.0 neste setor produtivo.

4 AGRADECIMENTOS

Supervisores de turno, técnicos operacionais e operadores da laminação a quente da Usiminas Cubatão pelo suporte dados durante a execução dos trabalhos. Todo o corpo técnico que colaboram para o êxito do trabalho, promovendo a sinergia entre as áreas, em especial aos engenheiros Marcos Roberto Soares Silva e Eduardo Amado Marconato pelas contribuições técnicas.

5 REFERÊNCIAS

- 1 I. S. CHOI, J. A. ROSSITER, AND P. J. FLEMING, "Looper and tension control in hot rolling mills: A survey," *Journal of Process Control*, vol. 17, pp.509–521, 2007.
- 2 Y. SEKI, K. SEKIGUCHI, Y. ANBE, K. FUKUSHIMA, Y. TSUJI, AND S. UENO, "Optimal Multivariable Looper Control for Hot Strip Finishing Mill," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 27, no. 1, pp. 124–130, January/February, 1991.
- 3 H. IMANARI, Y. MORIMATSU, K. SEKIGUCHI, H. EZURE, R. MATUOKA, A. TOKUDA AND H. OTOBE, "Looper H-Infinity Control for Hot-Strip Mills," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, no. 3, pp. 790–796, 1997.
- 4 G. HEARNS, AND M. J. GRIMBLE, "Robust Multivariable Control for Hot Strip Mills," *ISIJ International*, vol. 40, no. 10, pp. 995–1002, 2000.
- 5 F. A. CUZZOLA, "Multi-Objective Approach for the Control of Hot-Strip Mills," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 128, no. 2, pp. 856–868, December, 2006.
- 6 B. Q. LI, K. J. ZHANG, J. FU, AND Y. K. SUN, "Diagonal Recurrent Neural Network Decoupling Control on The Looper's Height and Tension System," in *Proceedings of the 6th World Congress on Control and Automation*, Dalian, China, June 21-23, 2006, pp. 2787–2791.
- 7 R. FURLAN, F. A. CUZZOLA, T. P. PARISINI, "Friction compensation in the interstand looper of hot strip mills: A sliding-mode control approach," *Control Engineering Practice*, vol. 16, pp. 214–225, 2008.
- 8 T. HESKETH, Y. A. JIANG, D. J. CLEMENTS, D. H. BUTLER, AND R. LAAN, "Controller Design for Hot Strip Finishing Mills," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 6, no. 2, pp. 208–219, 1998..