

OTIMIZAÇÃO DE PRESETS PARA LAMINADORES A FRIO – ESTUDO DE UM CASO¹

Carlos Thadeu de Ávila Pires²

Roberto Moura Sales³

Mateus Alexandre da Silva⁴

Henrique Cezar Ferreira⁵

Resumo: O presente trabalho mostra a geração de presets otimizados para um laminador de tiras a frio de 4 cadeiras recentemente modernizado, localizado na planta da Companhia Siderúrgica Paulista - Cosipa. É apresentado um novo enfoque para cálculo de presets baseado no algoritmo do fator beta proposta por Guo (1997) e no algoritmo de otimização Simplex proposto por Nelder e Mead (1965). O algoritmo do fator beta foi inicialmente introduzido para ser aplicado em laminadores de uma cadeira, com o objetivo de calcular a redução adequada em cada passe como uma função dos limites de redução máxima e mínima especificados para o passe. Este conceito poderá, da mesma forma, ser aplicado para laminadores de tiras a frio de múltiplas cadeiras, considerando o limite superior e inferior de redução de cada cadeira. O algoritmo de otimização utilizado é o método Simplex proposto por Nelder e Mead o qual considera a minimização de uma função não linear, sem a necessidade de determinação de suas derivadas. É apresentado um modelo de função objetivo o qual poderá ser parametrizado visando à obtenção de maior produtividade e melhor qualidade das chapas processadas em laminadores a frio.

Palavras-Chave: Laminador de tiras a frio, Otimização de presets, Algoritmo Simplex.

¹ Artigo a ser apresentado no VIII Seminário de Automação de Processos da ABM, 6 a 8 de Outubro de 2004, Belo Horizonte – MG – Brasil.

² Sócio da ABM. Engenheiro Elétrico, Mestre, Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Frio da Companhia Siderúrgica Paulista-Cosipa, Cubatão SP. carlospires@cosipa.com.br.

³ Engenheiro Elétrico. Professor Titular da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. roberto@lac.usp.br.

⁴ Sócio da ABM. Engenheiro Metalurgista, Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Frio da Companhia Siderúrgica Paulista-Cosipa, Cubatão SP. mateussilva@cosipa.com.br

⁵ Engenheiro Elétrico e mestrando pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. henrique.ferreira@poli.usp.br.

1. Introdução

A geração de presets para laminadores a frio tem sido largamente empregada nos últimos anos em função dos benefícios que os mesmos podem proporcionar em termos de qualidade e produtividade. A importância desta geração de presets já foi apontada por Bryant (1973) e tem sido objeto de diversos trabalhos recentes como em Guo (1997). No presente trabalho serão incluídos desenvolvimentos recentes relativos à geração de presets, implantados no laminador de tiras a frio de 4 cadeiras da Companhia Siderúrgica Paulista - Cosipa, o qual foi totalmente modernizado em 1998. A figura 1 mostra a foto do laminador e a figura 2 mostra a arquitetura do sistema de automação implantado neste laminador.

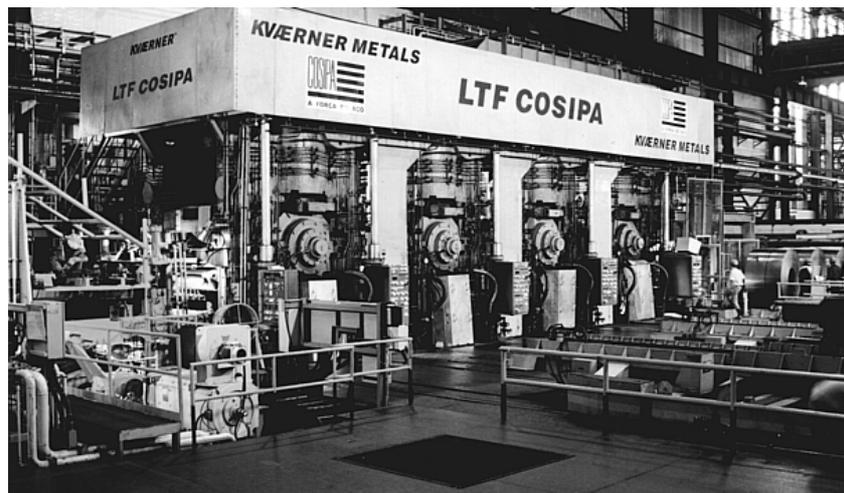


Figura 1 - Laminador de Tiras a Frio de 4 cadeiras da Cosipa

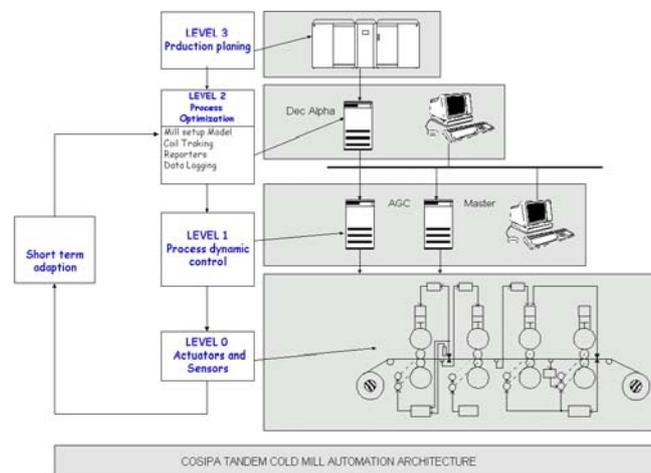


Figura 2 - Arquitetura do Laminador de Tiras a Frio da Cosipa

Neste trabalho, modelos serão classificados em duas categorias: modelos estáticos, os quais representam o processo, e modelos dinâmicos, utilizados para controlar o processo (MACALISTER, 1989). O modelo dinâmico e o modelo estático são funções complementares no qual o primeiro ajusta o esquema de reduções e o outro mantém o laminador neste esquema (BRYANT, 1973). Pensando neste princípio, é importante iniciar a laminação com presets calculados próximos aos valores que o modelo dinâmico utilizará para controlar com precisão a espessura da chapa. Com este objetivo, Guo (1997) propõe uma técnica iterativa denominada

algoritmo do fator beta, para a escolha de um conjunto de reduções. No presente trabalho, é proposta uma técnica não iterativa para determinação deste fator, mais adequada a cálculos on-line e que apresenta resultados mais precisos.

O termo preset é aqui empregado para designar os valores iniciais de ajuste das variáveis de processo que permitam obter o material com a qualidade e a produtividade desejadas (BOLON, 1996). O modelo estático calcula também os ganhos dos reguladores utilizados pelo modelo dinâmico, tendo, portanto, grande influência sobre o desempenho das malhas de controle do processo de laminação.

O cálculo otimizado de presets proposto neste trabalho é composto de duas etapas. A primeira etapa determina uma distribuição de reduções entre as cadeiras de laminação, função das reduções máxima e mínima definidas para cada cadeira. A etapa seguinte, chamada de otimização, considera a minimização de uma função objetivo que contenha os principais parâmetros relacionadas à qualidade e produtividade. É nesta segunda etapa que laminadores com maiores recursos computacionais podem utilizar técnicas de otimização para obter ganhos de qualidade e produtividade consideráveis. No laminador de tiras a frio da Cosipa, a primeira etapa de geração de presets é seguida pela etapa de otimização. Na figura 2, as duas etapas de geração de presets estão caracterizadas pelo item otimização de presets do nível 2.

Na etapa de otimização, é empregado o algoritmo de Nelder e Mead (1965) o qual otimiza os presets minimizando uma função objetivo composta por parâmetros relacionados à qualidade e produtividade como força, potência e tensão.

2. Sistema de Controle do Laminador de Tiras a Frio da Cosipa

O laminador de tiras a frio da Cosipa possui 4 cadeiras, cada uma delas compreendendo 2 cilindros de apoio e 2 cilindros de trabalho, estes últimos acoplados a motores de corrente contínua controlados por reguladores digitais de velocidade e por um sistema de controle de espessura como mostra a figura 3. Duas cápsulas de aperto hidráulicas, instaladas no topo de cada cadeira, completam o conjunto de redução de cada cadeira.

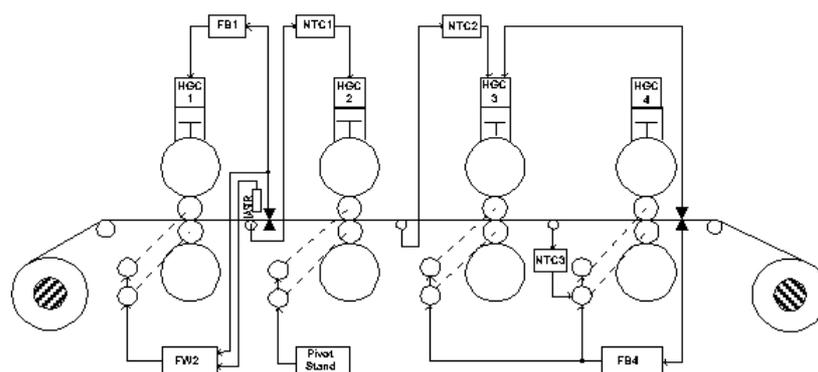


Figura 3 - Modelo dinâmico do Laminador de Tiras a Frio da Cosipa

Na região de deformação, situada entre os cilindros de trabalho, a chapa passa e sofre redução por efeito de compressão das cápsulas de aperto hidráulico e de tração devido à tensão existente entre duas cadeiras adjacentes. Todo o conjunto é comandado por um sistema de controle, cuja arquitetura é mostrada na figura 2.

Este trabalho está focado nos seguintes objetivos:

- Mínima variação de espessura.
- Perfil original da chapa inalterado.
- Máxima velocidade da tira.

3. Estratégias de ajuste de Presets

Nesta seção são detalhadas as etapas de inicialização e otimização. Relativamente à etapa de inicialização são apresentados o algoritmo iterativo de Guo (1997) e um novo algoritmo não iterativo. Além da etapa de inicialização, é brevemente descrito o algoritmo de Nelder e Mead (1965) utilizado na etapa de otimização.

3.1. Algoritmo Iterativo

O algoritmo do fator beta proposta por Guo (1997) foi desenvolvida para assegurar que a redução em cada passe, em um laminador reversível de uma cadeira, esteja dentro de limites superior e inferior de redução estabelecido para o passe. Este conceito pode, da mesma forma, ser aplicado para os laminadores tandem de várias cadeiras.

Uma curva de redução, obedecendo a um padrão randômico, não será adequadamente usada em um algoritmo de otimização. Portanto, uma família de curvas de redução pode ser definida de modo que a redução de cada passe obedeça à seguinte equação:

$$r_i = \beta \cdot r_{ui} + (1 - \beta) \cdot r_{li} \quad (1)$$

O fator beta é simplesmente um fator de interpolação entre os limites superior e inferior de redução. A redução total, para qualquer esquema de passes dentro da família, pode ser calculada por:

$$r_t = 1 - \frac{h_n}{h_o} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - r_i) \quad (2)$$

O fator beta pode então ser determinado a partir das equações (1) e (2). A solução desta equação é obtida por Guo (1997) pelo método iterativo de Newton-Raphson, através da seguinte expressão para beta:

$$\beta^{(n+1)} = \beta^{(n)} - \frac{\prod_{i=1}^N (\delta_i - \beta^{(n)} \cdot \Delta_i) - \frac{h_N}{h_o}}{\sum_{j=1}^N \Delta_j \cdot \prod_{i=1, i \neq j}^N (\delta_i - \beta^{(n)} \cdot \Delta_i)} \quad (3)$$

Portanto, conhecendo a espessura de entrada e a espessura de saída da chapa, e fixando os valores máximo e mínimo de redução para cada uma das cadeiras, a redução ideal destas cadeiras poderá ser calculada pelo fator beta de modo que a curva de redução estará dentro dos limites estabelecidos.

A solução de Newton-Raphson proposta por Guo (1997) para a determinação do fator β apresenta o inconveniente de ser uma solução iterativa, que requer uma aproximação inicial suficientemente próxima da solução.

3.2. O algoritmo não iterativo

O algoritmo do fator beta proposto Guo (1997) prevê a determinação de uma família de curvas cuja redução em cada passe obedeça à equação (1). Usando a mesma expressão, porém empregando reduções logarítmicas, teremos:

$$\varepsilon_i = \beta \cdot \varepsilon_{ui} + (1 - \beta) \cdot \varepsilon_{li} \quad i = 1,2,3,4 \quad (4)$$

Onde a redução logarítmica na cadeira i é dada por:

$$\varepsilon_i = \ln \frac{1}{1 - r_i} \quad (5)$$

A redução logarítmica máxima na cadeira i é dada por:

$$\varepsilon_{ui} = \ln \frac{1}{1 - r_{ui}} \quad (6)$$

Da mesma forma, a redução logarítmica mínima na cadeira i é dada por:

$$\varepsilon_{li} = \ln \frac{1}{1 - r_{li}} \quad (7)$$

Considerando a soma destas reduções, teremos:

$$\sum_{i=1}^N \varepsilon_i = \beta \cdot \sum_{i=1}^N \varepsilon_{ui} + (1 - \beta) \cdot \sum_{i=1}^N \varepsilon_{li} \quad (8)$$

Considerando que a redução logarítmica aplicada ao material ao longo de todo o laminador é dada por:

$$\sum_{i=1}^N \varepsilon_i = \varepsilon_m \quad (9)$$

teremos então:

$$\varepsilon_m = \beta \cdot \sum_{i=1}^N \varepsilon_{ui} + \sum_{i=1}^N \varepsilon_{li} - \beta \cdot \sum_{i=1}^N \varepsilon_{li} \quad (10)$$

Resolvendo em relação β , teremos:

$$\beta = \frac{\varepsilon_m - \sum_{i=1}^N \varepsilon_{li}}{\sum_{i=1}^N \varepsilon_{ui} - \sum_{i=1}^N \varepsilon_{li}} \quad (11)$$

Conhecido o valor de β , determinaremos agora o valor da redução logarítmica em cada cadeira, através da equação:

$$\varepsilon_i = \beta \cdot \varepsilon_{ui} + (1 - \beta) \cdot \varepsilon_{ji} \quad (12)$$

Determinados os valores de redução logarítmica das cadeiras, poderemos encontrar os valores de redução convencional, utilizando a expressão a seguir:

$$r_i = 1 - \frac{1}{\exp \varepsilon_i} \quad (13)$$

Para determinarmos as espessuras na saída das cadeiras, faremos:

$$h_{i+1} = (1 - r_i) \cdot h_i \quad (14)$$

Assim, ficam determinadas todas as reduções nas cadeiras e, como consequência, as espessuras nas zonas localizadas entre as cadeiras. A figura 4 é um exemplo do algoritmo não-iterativo do fator beta, considerando material com espessura de entrada de 3.00 mm e espessura de saída de 0.91 mm. Este conjunto de reduções deverá representar os vértices iniciais do simplex de otimização descrito a seguir e age como um ponto de referência para a geração dos demais vértices deste algoritmo (WALTERS, 1991).

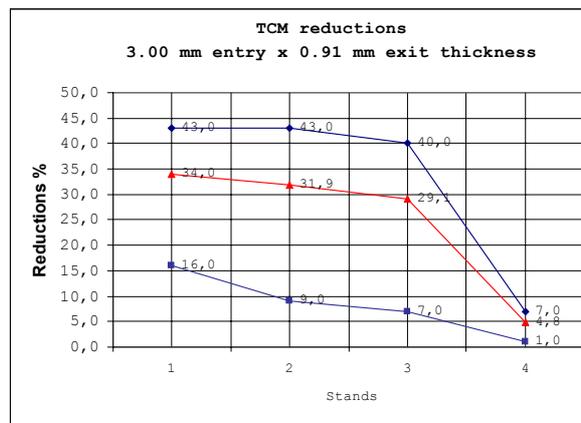


Figura 4 - Curva de redução para material 3.00 x 0.91 mm

3.3. Algoritmo de Otimização: O método Simplex de Nelder e Mead

O método Simplex, inicialmente proposto por Nelder e Mead (1965), considera a minimização de uma função não linear de n variáveis, sem a necessidade de determinação de suas derivadas. O passo de minimização é variável e se adapta à função. Em (WALTERS, 1991) pode ser encontrada uma descrição detalhada dos movimentos do simplex de passo variável. Dado o valor inicial y_i da função, são provocadas perturbações nas variáveis x_i e calculados os novos valores desta função, correspondentes a cada perturbação, como mostra a figura 5.

São então determinados os valores x_W , x_N e x_B para os quais a função y atinge o valor máximo y_W , o segundo maior valor y_N , e o valor mínimo y_B ,

respectivamente. O valor médio, ou centróide x_P , é determinado a partir da média de todos os pontos x_i , com a exceção de x_W . A cada estágio do processo, x_W será substituído por um novo valor. Três operações são possíveis - reflexão, contração e expansão.

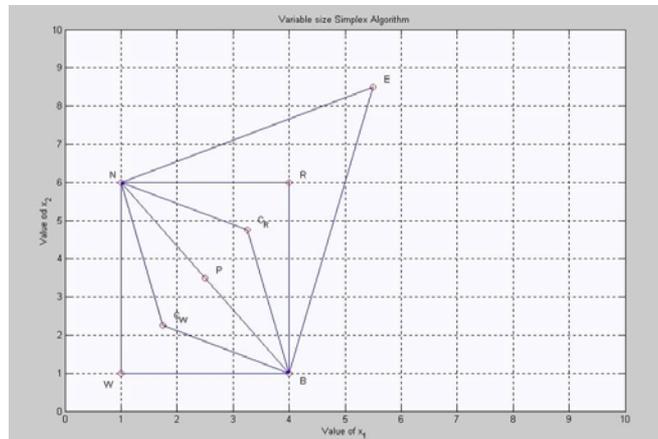


Figura 5 - Movimentos do algoritmo Simplex de passo variável

Reflexão - A reflexão do ponto x_W , em relação ao ponto x_P , é conhecida como x_R . Se y_R estiver entre y_B e y_W , então x_W será substituído por x_R e será dado início a um novo processo.

Expansão - Se $y_R < y_B$, isto é, a reflexão produziu um novo mínimo, então será feita uma expansão de x_R para x_E em relação à x_P . Se $y_E < y_B$, então x_W será substituído por x_E e será reiniciado o processo. Mas se $y_E > y_B$, a expansão falhou e x_W deverá ser substituído por x_R antes do reinício do processo.

Contração - Se na reflexão de x_W para x_R obtém-se $y_R > y_B$ para todo $i \neq W$, então define-se o novo x_W como sendo o antigo x_W ou o x_R (aquele que tiver o menor valor de y).

3.4. Função Objetivo

A função objetivo aqui considerada segue a estrutura proposta em (WALTERS, 1991), a qual consiste de uma função exponencial dada por:

$$d_j = \exp[-(|y_j'|)^n] \quad (15)$$

onde \exp é a função exponencial, n é um número positivo ($0 < n < \infty$, não necessariamente inteiro), y_j' é uma transformada linear da variável de saída, y_j , tal que $y_j' = -1$ quando y_j é igual ao limite inferior especificado, y_{j-} , e $y_j' = +1$ quando y_j é igual ao limite superior especificado, y_{j+} , isto é:

$$y_j' = \frac{y_j - \frac{(y_{j+} + y_{j-})}{2}}{\frac{(y_{j+} - y_{j-})}{2}} \quad (16)$$

O valor de y_j' mede o quão afastado y_j se encontra do valor ideal, isto é, quão afastado y_j se encontra do ponto médio entre os valores máximo e mínimo

especificados, em unidades de distância entre estes valores limites e o valor ideal (valor nominal). Como variáveis $y_j, j=1,2,3$, são utilizadas força, tensão e potência.

4. Resultados principais

O algoritmo do fator beta permite que se calculem os presets de qualquer laminador tandem, sendo necessário somente fornecer as reduções máxima e mínima de cada cadeira. Com o conhecimento do analista de processo, será possível desta maneira fornecer condições aceitáveis de redução e, no caso de haver uma etapa posterior de otimização iterativa, dar condições iniciais mais adequadas para este algoritmo.

Nas tabelas 1 e 2 são mostradas as reduções iniciais propostas para um laminador de tiras a frio, considerando material com espessura de entrada 3.00 mm de e saída 0.91 mm, utilizando o algoritmo do fator beta com solução iterativa e com solução não iterativa. As reduções máximas e mínimas, em porcentagem, estabelecidas para as cadeiras do laminador foram:

Reduções máximas = [43% 43% 40% 7%]

Reduções mínimas = [16% 9% 7% 1%]

Tabela 1 - Valores de reduções utilizando solução iterativa.

Solução iterativa, beta = 0.669, N° iterações = 124			
Zona	Espessura	Redução	Red. Total
0	3.00		
1	1.978	34.1	34.1
2	1.351	31.7	55.0
3	0.958	29.1	68.1
4	0.910	5.0	69.7

Tabela 2 - Valores de reduções utilizando solução não iterativa.

Solução não iterativa, beta = 0.668			
Zona	Espessura	Redução	Red. Total
0	3.00		
1	1.981	34.0	34.0
2	1.349	31.9	55.0
3	0.956	29.1	68.1
4	0.910	4.8	69.7

Embora os valores obtidos nas Tabelas 1 e 2, para as reduções em cada cadeira sejam bastante parecidos, são comuns situações em que certas condições iniciais dadas para o algoritmo iterativo produzem valores inadequados em um número limitado de iterações.

5. Conclusões

O trabalho mostra a geração em duas etapas de presets otimizados para um laminador de tiras a frio de quatro cadeiras recentemente modernizado, localizado na planta da Companhia Siderúrgica Paulista. Para a geração dos presets iniciais, foi utilizado o algoritmo iterativo do fator beta proposto por Guo (1997) e modificado pelos autores, para uma forma não iterativa de cálculo. Na fase seguinte de otimização, foi utilizado o algoritmo Simplex de passo variável proposto por Nelder e Mead (1965), que mostrou ser perfeitamente adequado para a aplicação on line, pois é rápido e converge satisfatoriamente bem, desde que seja escolhida a função objetivo adequada. Esta função deverá, portanto, levar em consideração e dar o devido peso às variáveis do processo que afetam a qualidade e a produtividade do laminador. No caso específico do laminador de tiras a frio da Cosipa foi considerada potência como fator predominante para a produtividade e força e tensão, para a qualidade.

6. Nomenclatura

h_N = espessura final.

h_0 = espessura inicial.

n = número de iterações.

N = número total de cadeiras.

i = número da cadeira.

r_i = redução convencional na cadeira i .

r_t = redução convencional total no Laminador.

ε_i = redução logaritmo na cadeira i .

ε_m = redução logaritmo total no Laminador.

r_{ij} = redução convencional mínima na cadeira i .

r_{ui} = redução convencional máxima na cadeira i .

ε_{ji} = redução logaritmo mínima na cadeira i .

ε_{ui} = redução logaritmo máxima na cadeira i .

β = Fator beta

$\delta_i = 1 - r_i$

Referências

GUO, R. M., Application of PC LAN for a level 2 setup model of a single-stand reversing mill. **Iron and Steel Engineer**, pp. 41-46, August 1997.

BRYANT, G.F., **Automation of Tandem Mills**. The Iron and Steel Institute, 1973.

WALTERS, F.H., PARKER, L.R., MORGAN, S.L., DEMING, S.N. **Sequential Simplex Optimization**. CRC Press, Boca Raton, FL, 1991.

MACALISTER, A. F., **Modeling and adaptive techniques for rolling mill automation**. Iron and Steel Engineer, pp. 38-46, December 1989.

NELDER, J. A., MEAD R., **A simplex method for function minimization**. Computer Journal, 7, pp. 308-313, 1965.

BOLON P. L., **Corum Tandem Cold Mill Setup Model: Cosipa Implementation**. Davy-Clecim, 1996, (Documento Interno K 10671 – Cosipa).

PRESETS OPTIMIZATION FOR TANDEM COLD MILLS – A CASE STUDY¹

*Carlos Thadeu de Ávila Pires²
Roberto Moura Sales³
Mateus Alexandre da Silva⁴
Henrique Cezar Ferreira⁵*

Abstract: A new approach to presets calculation for a tandem cold mill is proposed based on the beta factor algorithm introduced by Guo. This theory was first developed to be applied in a single stand cold mill, in order to calculate the optimized reduction of each pass as a function of the upper and lower limits of reductions specified for that pass. This concept can be applied, in the same manner, to a tandem cold mill, considering the upper and lower limits of reduction of each stand. The optimization algorithm used is the Simplex method proposed by Nelder and Mead which considers the minimization of a non linear function without the need to find its derived. An objective function model is presented which can be parametrized, aiming to reach maximum productivity and better quality of the coils processed in the rolling mill. The proposed approach was implemented in the four stand tandem cold mill at a Brazilian company - Cosipa

Key-word: Cold mill; Set-up model; Presets optimization.

¹ Paper to be presented on 8th Seminar on Process Automation of Brazilian Society for Metallurgical and Materials (ABM), Belo Horizonte, MG, Brazil, October, 6th to 8th 2004.

² ABM member. Electrical Engineer, MSc, Tandem Cold Mill Cosipa. carlospires@cosipa.com.br

³ Electrical Engineer, Professor, Telecommunication and control Engineering Department - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

⁴ ABM member. Metallurgist Engineer, Tandem Cold Mill Cosipa. mateussilva@cosipa.com.br

⁵ Electrical Enginner, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.