HENRIQUE CEZAR FERREIRA

**GERAÇÃO DE REFERÊNCIAS PARA AS MALHAS DE
CONTROLE DE UM LAMINADOR DE TIRAS A FRIO**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica

São Paulo

2004

HENRIQUE CEZAR FERREIRA

**GERAÇÃO DE REFERÊNCIAS PARA AS MALHAS DE
CONTROLE DE UM LAMINADOR DE TIRAS A FRIO**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica

Área de Concentração:
Engenharia de Sistemas

Orientador:
Prof. Dr. Roberto Moura Sales

São Paulo

2004

Aos meus pais.

Agradecimentos

Ao meu orientador, prof. Dr. Roberto Moura Sales, pelas diretrizes seguras, disponibilidade e apoio.

Ao engenheiro de processos da equipe de suporte técnico da Cosipa, mestre e doutorando Carlos Thadeu de Ávila Pires, que com sua vasta experiência sobre o processo de laminação a frio, muito ajudou na definição e desenvolvimento desse projeto.

Ao amigo e mestrando Cleber Daniel Jacintho, por sua ajuda na fase inicial desse trabalho.

E a todos os que de alguma forma contribuíram nesta caminhada, meus sinceros agradecimentos.

Resumo

Sistemas de geração de referências para as malhas de controle de laminadores a frio têm proporcionado elevados níveis de produtividade e de qualidade do material processado. No caso de falha da unidade de processamento responsável pela execução do sistema de geração de referências, a operação do laminador fica comprometida e necessita-se de um modo de operação emergencial. Nesse trabalho é desenvolvido um sistema alternativo para geração de referências que visa substituir o modo de operação de emergência de consulta a tabelas de referências pré-calculadas da planta em questão. O sistema de geração de referências desenvolvido, assim como o sistema usado em condições normais de operação, é composto por uma função custo que avalia o nível de produtividade e de qualidade que um conjunto de referências pode proporcionar. A função custo é minimizada pelo método simplex de Nelder e Mead e as variáveis do processo envolvidas na função custo são avaliadas por um modelo de laminação a frio composto somente por equações algébricas, enquanto que o sistema usado em condições normais de operação usa um modelo clássico, composto por equações algébricas e integrais. A comparação entre o sistema usado em condições normais de operação e o sistema desenvolvido mostrou que apesar desse sistema ser mais simples, menos preciso e robusto, as referências por ele calculadas são aceitáveis e podem proporcionar resultados superiores que o modo de operação de emergência baseado na consulta a tabelas.

Abstract

Setup generation systems for cold Mill control loops have provided rolling mill operation with high levels of quality and productivity. In case of malfunctioning in the process unit responsible to execute the setup generation system, the normal procedure for the operation of the mill is interrupted, being necessary the use of an emergency operation mode. This work develops an alternative system for references generation which aims to replace the current emergency operation mode based on pre-calculated, not continuous, setup tables for the rolling mill. The developed references generation system, like the normal system used during mill operation, is composed by a cost function which evaluated the mill quality and productivity operation level which a set of references may propose. The cost function is minimized using the Nelder and Mead simplex method and the process variables involved in the cost function are evaluated by a cold rolling mill model composed only by algebraic equations, while the normal operation system uses a classical model, made up by integrals and algebraic equations. Comparing the existing main setup system to the developed reference system it was observed that, despite its simplicity, less accuracy and less robustness, references calculated using this system were accurate enough to achieve better results than the one emergency table mode has provided.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivo	1
1.2	Justificativa	2
1.3	Metodologia	3
1.4	Revisão bibliográfica	6
1.5	Estrutura da dissertação	9
2	O Processo de Laminação a Frio	11
2.1	Descrição do processo	11
2.2	O laminador de tiras a frio da Cosipa	15
2.2.1	Arquitetura de automação	17
2.2.2	Principais funções do nível 2 de automação	18
2.3	O sistema de controle	19
2.3.1	A fase estática	19
2.3.2	A fase dinâmica	21
2.4	Operação do laminador	24
2.4.1	Descrição do modo normal de operação	24
2.4.2	Descrição do modo de operação emergencial	25
3	O Modelo do Processo	27
3.1	Escolha do modelo	27
3.2	O modelo de laminação a frio	28
3.2.1	Modelo de força	28
3.2.2	Modelo de torque, escorregamento e ângulo neutro	31

3.2.3	Fluxo de massa, velocidade e potência	32
3.3	Inicialização do modelo do processo	34
3.3.1	Inicialização das espessuras	35
3.3.2	Inicialização das tensões	38
4	Otimização das Referências	40
4.1	A função custo	40
4.1.1	Função custo de potência	41
4.1.2	Função custo de força de laminação	43
4.1.3	Função custo de tensão	44
4.1.4	Escolha dos coeficientes da função custo	44
4.2	O método de minimização da função custo	46
4.3	Imposição de limites e restrições	49
4.3.1	Uso da potência total disponível	50
4.3.2	Limites de potência e correntes dos motores	51
4.3.3	Limite de velocidade do processo	52
5	Resultados	53
5.1	Referências para uma dada bobina	53
5.2	Resultados para um conjunto de bobinas	56
5.3	Justificativa para os resultados	60
6	Conclusões	63
6.1	Considerações finais	63
6.2	Futuras linhas de pesquisa	64

Lista de Figuras

2.1	Esquema do laminador de tiras a frio da Cosipa	16
2.2	Estrutura dos nível de automação do laminador	18
2.3	Fluxograma da fase estática da estratégia de controle	21
2.4	Diagrama da fase dinâmica da estratégia de controle	23
3.1	Variáveis na região de deformação	29
3.2	Curva de redução para material com 3 mm de entrada e 0,91 mm de saída	37
3.3	Curva tensão entre cadeiras <i>versus</i> espessura de saída	39
4.1	Função custo relativa à potência	43
4.2	Reflexão, expansão e contração em um simplex bidimensional . . .	48
4.3	Contração maciça em um simplex bidimensional	48
5.1	Evolução da função custo durante a fase de otimização	54

Lista de Tabelas

2.1	Características do laminador de tiras a frio da Cosipa	16
3.1	Espessura de saída e tensão entre cadeiras	39
4.1	Parâmetros da função custo de potência	42
4.2	Parâmetros da função custo de força	44
5.1	Referências obtidas para a bobina 89666 pelo <i>MillSetUp</i> e pelo <i>Corum</i>	55
5.2	Diferença percentual média entre as referências calculadas pelo <i>MillSetUp</i> e pelo <i>Corum</i> para 20 bobinas	57
5.3	Diferença percentual média entre as referências calculadas e as desejadas para 20 bobinas	59

Capítulo 1

Introdução

1.1 Objetivo

A geração de referências é um importante aspecto na operação de laminadores de tiras a frio, definindo as espessuras, tensões, forças, potências e velocidades que devem ser alcançadas pelas malhas de controle dinâmico do processo.

A Companhia Siderúrgica Paulista (Cosipa) utiliza um sistema que calcula conjuntos de referências para os controladores de seu laminador a frio que proporcionam maior qualidade do produto e produtividade do processo, respeitando os limites operacionais dos equipamentos. No entanto, em caso de falha do *hardware* que executa esse sistema, as referências para o processo são obtidas por consulta a tabelas de valores pré-calculados, o que impõe severas limitações à operação da planta.

Neste trabalho, o objetivo é descrever o desenvolvimento de um sistema alternativo para a geração de referências para o laminador de tiras a frio da Cosipa. Esse sistema se destina a substituir a estratégia operacional de emergência baseada na consulta a tabelas. Os resultados esperados com a implantação do sistema são:

- Aumento da disponibilidade do laminador.
- Maior confiabilidade do sistema de geração de referências.

- Maior precisão na geração das referências durante a operação de emergência, o que se traduz numa maior qualidade do produto.
- Maior segurança na geração das referências durante a operação de emergência, o que proporciona menores riscos operacionais e maior produtividade do laminador.

1.2 Justificativa

Para acompanhar o competitivo mercado global, muitas companhias siderúrgicas estão empenhadas em melhorar a qualidade de seus produtos, aumentar a produtividade e reduzir os custos e perdas de material [1, 2, 3, 4]. A geração de referências, que ao serem alcançadas pelas malhas de controle dinâmico, proporcionam uma maior produtividade do processo e uma maior qualidade do produto, é essencial para esse fim.

A Cosipa concluiu em janeiro de 1998 uma ampla reforma em seu laminador de tiras a frio, obtendo uma expressiva melhora de desempenho. Sendo anteriormente operado de modo manual, recebendo seu programa de produção através de listagens impressas e obtendo as referências para o processo por meio de tabelas, o equipamento após a reforma passou a ter uma operação quase que totalmente automática.

A geração de referências, objeto de estudo deste trabalho, é realizada no nível 2¹ da arquitetura do sistema de automação do laminador. Em condições normais de operação, a partir de dados do laminador e do material a ser processado, um sistema baseado em um modelo estático do processo e em um método de otimização, calcula as referências para as malhas de controle.

Como o controle dinâmico é executado por controladores localizados no nível 1 da arquitetura de automação, o projeto foi concebido de tal forma que a planta continue em operação mesmo em caso de falha do computador responsável pela

¹Maiores detalhes sobre os níveis de automação serão apresentados na seção 2.2.1

geração das referências. Numa eventualidade como essa, as referências passam a ser obtidas por meio de pesquisa a tabelas que apresentam os valores que melhor se adaptam às características da tira a ser laminada.

A pesquisa a tabelas representa uma significativa degradação em relação ao modo normal de operação. Como a laminação tem características de processo em batelada, sempre é possível que as características da tira a ser produzida não constem nas tabelas armazenadas. Nesse caso, o operador escolhe entre o registro das tabelas o que mais se aproxima do produto desejado, o que significa que as referências não serão as mais adequadas. Além disso, o processo de consulta a tabelas é manual, demandando digitação por parte do operador. Assim, o tempo gasto é significativamente superior ao cálculo normal.

O sistema de geração de referências em condições normais de operação, além de ter como entrada as características mecânicas e dimensionais da tira, também tem como entrada características do laminador, como raio dos cilindros de laminação, e do processo, como coeficientes de atrito, que mudam no decorrer da produção. Como as tabelas são geradas em condições de operação diferentes daqueles em que elas serão usadas, isso gera mais uma fonte de erros. Em suma, o método de operação alternativo original do sistema está longe de ser considerado satisfatório.

Considerando o preço médio do produto do laminador (US\$ 315,00 por tonelada) e a sua produção (nominalmente um milhão de toneladas anuais) chega-se ao valor aproximado da hora parada do equipamento: US\$ 36000,00. Logo um método alternativo para o cálculo de referências que possibilite agilizar a operação e que possua maior confiabilidade que a consulta a tabelas é amplamente justificável.

1.3 Metodologia

Para obtenção de uma forma mais eficiente de operar o laminador quando o modo de operação normal estiver inacessível, as seguintes alternativas podem ser

consideradas:

- Tornar mais detalhada a tabela de operação e automatizar sua utilização.
- Utilizar redes neurais artificiais para generalizar os dados contidos nas tabelas para diferentes tipos de produtos.
- Implantar redundância ou manutenção preditiva no hardware crítico.
- Adaptar o sistema usado em condições normais de operação para ser executado em outra CPU.
- Desenvolver um sistema de geração de referências para ser usado em outra CPU.

Analisando essas alternativas, pode-se concluir que um maior detalhamento da tabela de operação, além de ainda não conseguir englobar todos os possíveis tipos de produto, teria ainda a desvantagem de aumentar o tempo de consulta. A utilização de redes neurais artificiais, além de ter um caráter caixa-preta, o que reduz sua confiabilidade, não reflete as condições instantâneas de operação do equipamento. O alto custo de implantação de redundância não seria justificado, visto que o laminador opera em modo emergencial por cerca de 4 horas por ano, em média. A adaptação do sistema usado em condições normais de operação, além das dificuldades técnicas, esbarra no direito de propriedade do fornecedor do sistema.

Nesse trabalho optou-se pelo desenvolvimento de um sistema de geração de referências em Matlab [5] semelhante ao sistema que é usado em condições normais de operação, implementado em linguagem C, conforme descrito por Bolon [6]. Modelos de laminação a frio têm sido desenvolvidos por mais de meio século e descrevem razoavelmente bem o processo [7]. Métodos de otimização, como o método simplex empregado no sistema usado pela Cosipa, minimizam com sucesso funções custo relacionadas à geração de referências. Esses dois fatores justificam a opção escolhida dentre as que foram consideradas.

O método simplex proposto por Nelder e Mead [8] foi utilizado para minimização de uma função custo composta por variáveis relacionadas à qualidade do produto e à produtividade do processo. Para cálculo das variáveis do processo envolvidas na função custo utilizou-se um modelo simplificado para o processo, proposto por Bryant e Osborn [9, 10]. O sistema de geração de referências usado pela Cosipa adota um modelo de laminação a frio mais complexo proposto por Ford, Ellis e Bland [11], Ford e Ellis [12] e Bland e Ford [13].

Modelos térmicos, de planicidade e de cedagem completam o sistema usado pela Cosipa em condições normais de operação. O modelo de cedagem calcula a abertura efetiva entre os cilindros de laminação. Como a correção da abertura entre os cilindros de laminação é pequena e o sistema desenvolvido seria usado por pouco tempo, em situações emergenciais, optou-se não implementar esse modelo. O modelo de planicidade e o modelo térmico calculam as forças de coroamento a serem aplicadas nos cilindros de laminação para obter-se uma tira com um perfil determinado, levando em conta imperfeições na forma do cilindro e sua dilatação térmica. No sistema desenvolvido esses modelos não foram implementados, visto que durante o processo a prioridade é o controle de espessura e que malhas como de controle de planicidade podem ser desconsideradas em situações emergenciais.

Em condições normais de operação, o sistema de geração de referências usado pela Cosipa ainda tem uma fase de adaptação, onde parâmetros como coeficientes de atrito e limites de escoamento são recalculados a cada nova bobina a ser processada de acordo com as condições reais do processo. Para o sistema desenvolvido optou-se por não implementar essa função de adaptação, pois a variação desses parâmetros não é significativa durante o período em que o sistema seria usado. Os coeficientes de atrito e limites de escoamento poderiam ser ajustados com valores médios calculados pela fase de adaptação do sistema usado em condições normais de operação e assim, não se justificaria implementar a fase de adaptação em um sistema de geração de referências com os objetivos propostos.

1.4 Revisão bibliográfica

Como é o caso de muitos outros importantes processos, a origem da laminação é um tanto incerta. De acordo com Roberts [14], embora a conformação mecânica a frio de tiras de aço com o uso de laminadores seja realizada desde o século XV, somente em 1892, numa usina na Tchecoslováquia, esse processo passou a ser realizado pela operação conjunta de múltiplas cadeiras, a chamada operação em *tandem*.

A maioria das teorias clássicas de laminação a frio derivam do trabalho de Orowan [15]. Contribuições notáveis para modelagem do processo de laminação a frio foram feitas por Ford e seus associados [11, 12, 13]. Eles assumiram novas suposições para linearizar e integrar a equação diferencial de força de laminação. Os resultados obtidos tiveram boa concordância com a teoria de Orowan e com resultados experimentais. Modelos que incluíram fenômenos secundários presentes no processo [16] e outros métodos de descrição do processo [17] foram posteriormente desenvolvidos. Contudo, todos esses modelos exigem grande esforço computacional e o desenvolvimento de algoritmos numericamente robustos. Bryant e Osborn [9, 10] propuseram um modelo que simplifica a teoria clássica de Ford e seus associados sem grande perda de precisão.

De acordo com Edwards [7], os primeiros controladores de espessura e tensão apareceram em meados da década de 1950. Inicialmente, esses controladores tinham suas referências ajustadas de acordo com a experiência dos operadores. Com o desenvolvimento de modelos para o processo, as referências passaram a ser calculadas e tabeladas para cada tipo de produto e especificação. No início da década de 1960, computadores digitais foram introduzidos no cálculo das referências dos controladores do processo. Os computadores executavam modelos do processo, gerando as referências de acordo com as especificações do produto.

O aperfeiçoamento dos computadores digitais permitiu a implementação de controladores baseados em modelos dinâmicos do processo [2], o que proporcionou atingir os valores das referências dos controladores com maior rapidez, precisão e

menor sensibilidade à perturbações como observado por Misaka [18], Smith [19], King e Sills [20], Bryant e Higham [21] e Edwards [7].

O processo de laminação a frio envolve um grande número de variáveis, e devido às peculiaridades das interações entre elas, existe mais de um conjunto de referências que proporciona ao produto a ser laminado as características mecânicas e dimensionais desejadas. Bryant [1] destacou a importância da geração de um conjunto de referências que aumentasse a produtividade do processo e proporcionasse melhor qualidade ao produto.

Fiebig e Zander [22] descreveram um sistema de geração de referências ótimas para um laminador a frio. Uma função custo que envolvia potência dos motores era minimizada empregando o método simplex. Esse trabalho ainda descreve uma função de adaptação do modelo de laminação. A cada bobina processada alguns parâmetros do processo eram recalculados de acordo com os valores obtidos durante o processo e o modelo de laminação usado tinha esses parâmetros atualizados. A função de adaptação foi descrita por Edwards [7] e usada em muitos outros trabalhos desenvolvidos desde então, como em [23, 24, 25, 26, 27, 28].

Ozsoy, Ruddle e Crawley [3] desenvolveram um sistema de geração de referências ótimas para um laminador a quente. Uma função composta por variáveis relacionadas à qualidade do produto e à produtividade do processo era minimizada empregando o método de Rosenbrock de programação não linear. A solução do problema de otimização através desse método se mostrou sensível à condição inicial. Assim, uma dificuldade adicional seria desenvolver uma metodologia para gerar as condições iniciais adequadas para o algoritmo de otimização. Nesse trabalho, as condições iniciais foram dadas pela experiência dos autores no processo de laminação.

Michetti, Lebrun e Maisonneuve [27] usaram outro método de programação não linear, a programação seqüencial quadrática, para encontrar o mínimo de uma função custo composta por variáveis consideradas importantes para um processo de laminação a frio. Assim como o método simplex, a programação seqüencial

quadrática pode convergir em mínimos locais e não há garantia de convergência. A programação seqüencial quadrática tem a desvantagem adicional de ser necessário o cálculo de derivadas da função custo, que dependendo de sua complexidade, pode ser um problema de difícil solução.

Wang et al. [4] desenvolveram um sistema de geração de referências ótimas cuja função custo que envolve potência dos motores, tensões entre cadeiras e características de forma da tira era minimizada por algoritmos genéticos. Esse método é adequado para minimização de funções onde os métodos de programação tradicionais não funcionam, apresentando freqüentes problemas de não convergência ou convergindo freqüentemente em mínimos locais. Isso porque os algoritmos genéticos exigem um esforço computacional bem maior que os métodos de minimização tradicionais e conseqüentemente consomem um tempo de processamento superior, o que pode comprometer o ritmo de produção de uma linha de laminação, onde seriam empregados.

Bolon [6] descreve o sistema de geração de referências utilizado pela Cosipa desde 1998. A prática operacional mostrou a eficácia desse sistema, que dificilmente apresentou problemas de convergência, mostrando que o método simplex de Nelder e Mead [8] empregado para minimização da função custo é adequado. A escolha da estrutura e das variáveis envolvidas na função custo usada mostrou-se adequada, proporcionando aumento da produtividade e melhora da qualidade do produto. Finalmente, os valores das variáveis medidas durante o processo ficam próximos dos valores estimados pelo modelo de laminação proposto por Ford, Ellis e Bland [11], Ford e Ellis [12] e Bland e Ford [13].

Santos Filho [29] propôs um sistema alternativo para geração das referências do laminador a frio da Cosipa em caso de falha no computador que executa o sistema de geração de referências atualmente usado. Esse sistema alternativo, baseado em redes neurais artificiais, generaliza valores de referências calculadas pelo sistema usado em condições normais de operação para produtos com especificações diversas. No entanto, além das redes neurais possuírem um caráter caixa-preta, o que reduz sua confiabilidade, Jansen et al. [30] afirmam que redes

neurais nunca devem substituir completamente modelos físicos e analíticos na automação e controle do processo de laminação, o que aconteceria com a geração de referências durante a situação emergencial. Como existem precisos modelos de laminação a frio e métodos de minimização de funções bem conhecidos é preferível o uso de um sistema de geração de referências baseado nos mesmos.

1.5 Estrutura da dissertação

Este trabalho foi organizado em seis capítulos. A seguir é apresentada uma breve descrição de cada um deles.

No capítulo 1 são apresentados os objetivos do trabalho, as justificativas que levaram ao seu desenvolvimento e a metodologia empregada em seu desenvolvimento. Uma revisão bibliográfica acerca das principais publicações relacionadas ao tema da dissertação completa este capítulo.

No capítulo 2 é descrito o processo de laminação a frio, o laminador de tiras a frio da Cosipa e sua arquitetura de automação. É apresentada a estratégia de controle do processo enfatizando o relacionamento entre os níveis de otimização (fase estática) e de controle (fase dinâmica), concluindo com a descrição dos modos de operação do laminador.

No capítulo 3 justifica-se a escolha do modelo do processo utilizado para cálculo das variáveis do processo, e as equações que compõem o modelo são apresentadas. Concluindo o capítulo, são apresentados os algoritmos para inicialização do modelo do processo.

No capítulo 4 é apresentada a função custo adotada e justificada sua escolha frente aos objetivos propostos. Apresenta-se em seguida o algoritmo usado para minimização da função custo e finalmente, explica-se como os limites e restrições do processo foram incorporados na geração de referências.

No capítulo 5 apresentam-se inicialmente um conjunto de referências calculadas pelo sistema desenvolvido para um determinado produto, enfatizando a

consistência e qualidade dos valores obtidos. Em seguida é comparado para um conjunto de 20 bobinas, as referências obtidas pelo sistema desenvolvido com as referências obtidas pelo sistema usado pela Cosipa em condições normais de operação.

Finalmente, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões acerca do sistema alternativo para cálculo de referências desenvolvido e futuras linhas de pesquisa que possam aperfeiçoar seus resultados.

Capítulo 2

O Processo de Laminação a Frio

2.1 Descrição do processo

O processo siderúrgico de laminação de tiras a frio tem com insumo básico uma *bobina*, previamente laminada a quente e submetida a um processo de decapagem, responsável pela remoção da camada de óxido resultante da laminação a quente. Na entrada do equipamento existe a *desenroladeira*, que é responsável por colocar a bobina na forma de tira, sob a qual será processada. Sobre a tira se aplicam esforços de compressão axial e de tração longitudinal, que submetem sua espessura original a uma redução por um fator entre 50% e 90%. Por fim, na saída do equipamento localiza-se a *enroladeira*, que coloca a tira processada novamente na forma de bobina¹.

A compressão axial sobre a tira é exercida por meio de conjuntos de cilindros rotativos localizados acima e abaixo da tira. Um par de cilindros entra em contato com o material processado – são os *cilindros de trabalho*. Estes se apóiam sobre outro par de cilindros, os chamados *cilindros de encosto*. Alguns laminadores possuem um par adicional de cilindros, localizados entre os de trabalho e os de encosto – são os *cilindros intermediários*.

¹Essa descrição se aplica ao tipo mais comum de laminador. Existem, entretanto, laminadores em que o material de entrada é fornecido diretamente do processo anterior (a decapagem). Outros laminadores transferem diretamente o seu produto ao processo posterior (o recozimento). Assim, nem todos os laminadores possuem desenroladeira e/ou enroladeira.

Os cilindros ficam alojados em carcaças de aço que conferem rigidez mecânica ao conjunto. O arranjo formado pela carcaça e os conjuntos de cilindros é denominado *cadeira* e, no caso de existirem duas ou mais cadeiras, o laminador é denominado *tandem*. As cadeiras de um laminador podem ser compostas por seis cilindros (laminadores *six high*) ou por quatro cilindros (laminadores *quádruplos* ou *four high*). O fluxo de material pode ocorrer em ambos os sentidos (laminadores *reversíveis*) ou num único sentido (laminadores *não-reversíveis*). Um laminador pode ser classificado como *contínuo* (quando recebe o material de entrada diretamente da decapagem e transfere o material processado diretamente ao recozimento), como *semi-contínuo* (quando a transferência direta de material ocorre em apenas uma das extremidades) ou como *não-contínuo* (quando não há transferência direta de material). Uma outra classificação é quanto ao número de cadeiras. Um laminador possui de 1 a 6 cadeiras.

O processo é denominado “a frio” porque é realizado abaixo da temperatura de recristalização do material. O objetivo final é a produção de uma tira de aço cujas principais características de qualidade são a espessura, que deverá ser controlada longitudinalmente, e a planicidade, controlada transversalmente. Após o processamento, o material é tratado pelos processos posteriores, que proporcionarão as demais características mecânicas e dimensionais requeridas. Entre esses processos posteriores se inclui um outro laminador, o laminador de encruamento, que realiza o que se chama de *laminação a frio secundária*, que não deve ser confundida com o processo aqui descrito.

Admitindo que na laminação a frio a variação na largura é desprezível, a redução em espessura a que a tira é submetida é acompanhada de uma expansão em comprimento na mesma proporção. O sistema de controle, portanto, deve distribuir a redução total desejada entre as cadeiras e manter a tensão de modo a preservar o fluxo de massa em todos os vãos, evitando a ocorrência de rompimento ou afrouxamento da tira.

A redução na espessura da tira é obtida principalmente pelos elevados esforços de compressão concentrados na região de contato entre a tira e os cilindros

de trabalho. Os cilindros são pressionados de encontro à tira por meio de *parafusos* dotados de roscas sem-fim eletricamente acionados ou, nos laminadores mais modernos, por meio de *cápsulas* de acionamento hidráulico². Colaboram também para a redução os esforços de tração oriundos da tensão entre duas cadeiras adjacentes.

A força de laminação é da ordem de milhares de toneladas, causando achatamento e curvatura dos cilindros e também o alongamento (*cedagem*) da carcaça da cadeira, que abriga os cilindros de laminação. Obviamente, esse processo gera um calor considerável, que é dissipado por meio de um fluido de refrigeração, normalmente uma emulsão óleo/água, que serve também para reduzir o atrito. Apesar dessa refrigeração, o calor gerado produz uma expansão dos cilindros, o chamado *coroamento térmico*.

Durante o processamento de uma tira, várias operações são realizadas. Primeiramente, dadas as espessuras de entrada e saída da tira e sua largura, calcula-se um padrão (denominado *esquema*) para as espessuras e tensões nos vãos e a máxima velocidade de laminação que proporcione uma distribuição satisfatória da carga de laminação e da potência entre as cadeiras. Em seguida, com base no esquema assim calculado, é possível determinar as referências necessárias para os atuadores do processo. Essa determinação é obtida a partir das equações que regem o comportamento do laminador em estado permanente.

Finalmente, as referências calculadas do modo acima descrito são transferidas aos equipamentos que farão o controle do processo em tempo real, ou seja, durante a laminação propriamente dita. Nessa fase, a partir das informações sobre os valores das variáveis de campo, fornecidas pela instrumentação, os controladores do nível 1 realizam as alterações necessárias para que se alcance os objetivos propostos.

O processamento de uma tira pode ser dividido em três fases distintas: o *encaixe*, a *laminação* propriamente dita e o *desencaixe*. Durante a primeira fase,

²Por razões históricas, a denominação “parafuso” é comumente empregada para qualquer dispositivo utilizado para o deslocamento vertical dos cilindros de laminação

o principal objetivo do controle é manter uma planicidade satisfatória na parte inicial da tira, de forma que o encaixe da tira nas várias cadeiras seja livre de problemas, evitando danos aos cilindros. Para tanto, durante a fase de encaixe o laminador é operado em velocidade significativamente inferior àquela utilizada durante a fase de laminação propriamente dita.

À medida em que a tira avança na região de deformação entre os cilindros, fica sujeita a uma pressão crescente, que lhe impõe primeiramente uma deformação elástica e depois uma deformação plástica. A princípio, a componente horizontal da velocidade periférica dos cilindros de trabalho é superior à velocidade da tira, fazendo com que esta seja introduzida na abertura por meio da força de atrito. Esse processo, chamado de *mordida*, prossegue até o ponto em que a velocidade de deslocamento da tira é igual à velocidade periférica dos cilindros de trabalho – este é o chamado *ponto neutro*. A partir daí, um efeito de extrusão leva a velocidade da tira a ultrapassar a velocidade dos cilindros, expulsando-a da abertura. A força de compressão diminui, cessa a deformação plástica da tira e, a medida em que esta deixa a abertura, passa por uma fase de recuperação elástica. O *arco de contato* entre a tira e os cilindros de trabalho varia entre 6 mm e 25 mm.

A partir do exposto no parágrafo anterior, constata-se que ao longo do arco de contato (com exceção do ponto neutro) existe uma diferença entre a velocidade periférica dos cilindros de trabalho e a velocidade linear da tira. Essa diferença de velocidades é chamada de *escorregamento*. O escorregamento na região anterior ao ponto neutro é chamado de *escorregamento à ré* e na região posterior é chamado de *escorregamento avante*.

Quando o processo de mordida se completa na última cadeira e se aplica tensão na enroladeira, está concluída a fase de encaixe. O laminador é acelerado e começa a laminação propriamente dita. Nessa fase, a estratégia de controle passa a priorizar a espessura e não mais a forma. Ao se aproximar o fim da tira, ocorre a fase de desencaixe, onde mais uma vez a velocidade é reduzida visando evitar choques entre os cilindros de laminação e a ponta da tira.

As principais variáveis de controle na laminação a frio são a *espessura de saída*, o *perfil* (ou *coroa*) e a *forma* (ou *planicidade*). Essas duas últimas características não devem ser confundidas. Beal [31] define o perfil como a distribuição de espessura ao longo da largura da tira. A forma, por sua vez, é definida por Bryant, Edwards e McClure [32] como o grau de empenamento transversal da tira. Esse empenamento se deve a uma distribuição não uniforme de esforços transversais durante a compressão nas cadeiras, o que causa alongamentos diferentes em fatias adjacentes da tira.

Bryant, Edwards e McClure [32], Edwards [7] e Roberts [14] apresentam uma descrição detalhada de um laminador *tandem* a frio e de sua operação. Para o caso específico do laminador de tiras a frio da Cosipa, Pires [33] é uma boa referência.

2.2 O laminador de tiras a frio da Cosipa

O laminador de tiras a frio da Cosipa possui 4 cadeiras e é do tipo quádruo, não reversível e não contínuo. Seus acionamentos são independentes, compreendendo dois cilindros de encosto livres, apoiados sobre dois cilindros de trabalho. Esses, por sua vez, são acoplados a motores de corrente contínua, controlados por reguladores de velocidade. Duas cápsulas de aperto hidráulico, instaladas no topo de cada uma das cadeiras, completam o conjunto de redução.

Antes da primeira cadeira se encontra a desenroladeira (responsável por colocar a bobina de entrada em forma de tira) e após a quarta cadeira se encontra a enroladeira (que reconduz a tira à forma de bobina).

A velocidade dos motores da segunda cadeira serve como base para as velocidades dos demais motores. Dessa forma, durante o processamento de uma tira, a velocidade dos motores dessa cadeira permanece estável no valor calculado como referência e as velocidades dos demais motores são ajustadas pelo sistema de controle para se adequarem às condições em tempo real. Por esse motivo, a segunda cadeira é denominada *cadeira pivô* do laminador.

Figura 2.1: Esquema do laminador de tiras a frio da Cosipa

Capacidade nominal (ton/ano)		1248000			
Velocidade máxima (m/min)		1080			
Diâmetro dos cilindros de trabalho (mm)		490 a 575			
Diâmetro dos cilindros de encosto (mm)		1270 a 1422			
Motores principais	Cadeira	1	2	3	4
	Potência (kW)	2× 1800	2× 1800	2× 1800	2× 1482
	Rotação (rpm)	433 a 1046	433 a 1046	433 a 1046	200 a 485
	Tensão (V)	900	900	900	700
Tipo de material processado		Aço carbono			
Espessura de entrada da tira (mm)		2,00 a 4,75			
Espessura de saída tira (mm)		0,38 a 3,00			
Largura tira (mm)		650 a 1575			
Diâmetro interno da bobina (mm)		610			
Diâmetro externo máximo da bobina (mm)		1930			

Tabela 2.1: Características do laminador de tiras a frio da Cosipa

A figura 2.1 mostra um esquema simplificado do laminador de tiras a frio da Cosipa. A tabela 2.1 relaciona as principais características do laminador de tiras a frio da Cosipa após sua última reforma, concluída em janeiro de 1998. A tabela também relaciona os limites permitidos para o material processado no laminador.

2.2.1 Arquitetura de automação

O processo de laminação é tipicamente um processo que não se presta à intervenção e controle humano direto devido à sua complexidade e grande rapidez com que ocorre. Por essas razões, a automação do processo de laminação é largamente difundida e sofisticada [34]. Isso exige a utilização de uma arquitetura de automação hierárquica e distribuída, na qual as diversas funções de controle e informações dividem-se em níveis bem definidos.

Assim como em [24, 35, 27, 28], a arquitetura de automação do laminador de tiras a frio é dividida em 4 níveis distintos que são descritos por Bolon [6]:

Nível 3 (Nível Corporativo), que engloba o controle e planejamento da produção, tendo como responsabilidade principal garantir que os produtos sejam entregues dentro do prazo e requisitos de qualidade requeridos pelo cliente.

Nível 2 (Nível de Otimização do Processo), que a partir das informações primárias sobre o produto e do conhecimento das características do equipamento, calcula as referências do processo de laminação que maximizam a qualidade e a produtividade.

Nível 1 (Nível de Controle), que recebe as referências calculadas pelo nível 2 e garante que as mesmas sejam obedecidas pelos atuadores. Além disso, recebe as informações dos sensores, repassando-as ao nível 2 quando necessário.

Nível 0 (Nível de Atuação), que inclui os acionamentos propriamente ditos e os sensores. Executa as ordens recebidas do nível 1 e provê as informações em tempo real sobre o processo.

Figura 2.2: Estrutura dos nível de automação do laminador

A figura 2.2 mostra os níveis da arquitetura do sistema de automação do laminador. Esse tipo de arquitetura de automação hierárquica e distribuída é chamada *estrutura CIM*. Essa estrutura foi definida pelo Grupo de Trabalho N° 1 da ISO e é explicada em detalhes por Williams [36]. Ela é também chamada de “pirâmide” porque, em geral, quanto mais baixo o nível hierárquico, maior o número de dispositivos existentes.

2.2.2 Principais funções do nível 2 de automação

O presente trabalho concentra as suas atividades no nível 2 de automação do laminador que possui as seguintes funções:

Interface Homem Máquina: responsável pela interação entre o sistema e os operadores.

Rastreamento do Produto: uma vez informada pelo operador sobre a identificação e o ponto de inserção das tiras na entrada do laminador, essa função

processa os sinais recebidos dos sensores para determinar a localização física dos produtos ao longo da linha.

Classificação do Produto: analisa os dados sobre a espessura dos produtos e os classifica de acordo com as normas comerciais pertinentes.

Base de Dados: armazena os dados sobre os produtos, provenientes do nível 1, de modo a permitir a geração de gráficos e de relatórios de produção.

Comunicação: responsável pela troca de informações com os níveis 3 e 1 e também com o servidor WEB da intranet da Cosipa.

Geração de Referências: função principal do nível 2, calcula o ajuste ótimo do laminador, a partir dos dados primários sobre as tiras de entrada.

2.3 O sistema de controle

A estratégia de controle de um laminador é dividida em *fase estática* e *fase dinâmica*. A fase estática, executada pelo nível 2 da arquitetura de automação, compreende a determinação *off-line* dos valores das referências para os controladores do processo. A fase dinâmica, de responsabilidade do nível 1, tem como objetivo a manutenção, em face dos distúrbios existentes, da espessura de saída, da forma e do acabamentos superficial da tira durante o seu processamento, respeitando os limites operacionais dos equipamentos.

King e Sills [20] resumem a interação entre a fase estática e a fase dinâmica afirmando que se tratam de funções complementares, em que a primeira estabelece o padrão ótimo de reduções e a última mantém o laminador nesse padrão. Apresenta-se a seguir uma descrição sucinta das fases estática e dinâmica do controle do processo.

2.3.1 A fase estática

Um sistema calcula as referências que otimizam o processo, ou seja, que proporcionam maior produtividade do processo e melhor qualidade dos produ-

tos, obedecendo as características desejadas para os produtos e os limites dos equipamentos. Esse sistema é constituído por uma função custo que avalia quão afastados potência dos motores, força de laminação e tensão entre cadeiras, variáveis consideradas importantes para produtividade e qualidade, estão de valores considerados ideais pelos analistas de processo. Os valores das variáveis do processo são estimados pelo modelo de laminação a frio proposto por Ford, Ellis e Bland [11], Ford e Ellis [12], Bland e Ford [13] e através do método simplex, proposto por Nelder e Mead [8], o mínimo da função custo é encontrado. O valor das variáveis associadas ao mínimo da função custo são as referências ótimas para o processo.

Calculado o ajuste ótimo do laminador, o modelo de cedagem das cadeiras calcula o valor efetivo da abertura entre os cilindros a partir da espessura da tira e da força de laminação em uma determinada cadeira. O modelo de planicidade é responsável pelo cálculo da força de coroamento a ser aplicada aos cilindros de trabalho para obter o perfil de saída da tira desejado. O modelo térmico é utilizado para o cálculo do coroamento térmico dos cilindros, uma vez que eles sofrem dilatação durante o processo.

O coeficiente de atrito entre a tira e o cilindro de laminação é um parâmetro do processo de difícil determinação, que depende, dentre outras variáveis, da largura da tira, da velocidade da cadeira, da redução, do raio do cilindro, da temperatura e do grau de lubrificação [26, 37]. Inicialmente é atribuído um valor tabelado aos coeficientes de atrito em cada cadeira, que são os mesmos para qualquer bobina e condições de operação. Posteriormente, os coeficientes de atrito, assim como outros parâmetros de difícil determinação dos modelos de força, torque, planicidade e cedagem, são recalculados a partir do valor das variáveis enviados do nível 1 para o nível 2 com periodicidade de 100 ms durante o processamento da tira. Esses parâmetros são então atualizados no modelo de laminação após o processamento da tira, sendo essa função chamada de *adaptação* do modelo do processo. A figura 2.3 apresenta um fluxograma da fase estática.

Figura 2.3: Fluxograma da fase estática da estratégia de controle

2.3.2 A fase dinâmica

Calculada as referências ótimas de laminação durante a fase estática, o objetivo dos controladores em tempo real é alcançar e manter os valores dessas referências face às perturbações presentes durante as condições reais de processamento da tira. Como ressalta Guo [38], a laminação *tandem* é um complexo sistema multivariável, não linear, variante no tempo com parâmetros incertos, grandes atrasos, grande interação entre as variáveis das diversas cadeiras e que ocorre em um ambiente bastante agressivo.

As principais variáveis controladas em tempo real são a espessura de saída, o perfil (ou coroa) e a forma da tira (ou planicidade). No laminador da Cosipa, o controle de coroa é obtido através da deflexão dos cilindros de trabalho e o controle de planicidade é feito por meio de uma ação combinada de deflexão dos cilindros de trabalho e refrigeração localizada. Na descrição a seguir, a atenção será focalizada no controle de espessura, denominado AGC (*Automatic Gauge*

Control), de fundamental importância para o processo [28].

Os principais fatores que causam perturbações na espessura de saída da tira, de acordo com Souza e Silva [34], são:

Variação de temperatura dos cilindros: Um aumento na temperatura dos cilindros de laminação causa a expansão dos mesmos, o que tende a diminuir a distância entre eles e, portanto, reduzir a espessura do produto final.

Excentricidade dos cilindros: Este tipo de perturbação causa variações rápidas e periódicas na espessura do produto final e sua compensação é difícil de ser realizada.

Variação na espessura do produto inicial: Evidentemente o produto de entrada não tem espessura constante. Variações na espessura de entrada tendem a causar variações proporcionais no produto de saída.

Variação de espessura com a velocidade: Verifica-se, na prática, que a espessura do produto diminui com o aumento da velocidade de laminação.

O primeiro problema que precisa ser resolvido em um sistema de AGC é o controle da tensão na tira entre as cadeiras. O metal é submetido às tensões apreciáveis e, se esta tensão variar, a espessura certamente será perturbada. Além disso, variações de tensão ocasionam transferência de potência de uma cadeira para outra, o que, evidentemente, afeta a redução que a tira sofre em determinada cadeira. Por essa razão, antes de adotar qualquer sistema de AGC, é absolutamente necessário controlar precisamente a tensão entre cada par de cadeiras e mantê-la constante durante o processo de laminação. Em outras palavras, é necessária a utilização de três tensiômetros e de três reguladores de tensão entre as cadeiras, como é mostrado na figura 2.4.

Para manter a tensão constante entre duas cadeiras, a posição da cápsula de aperto hidráulica da cadeira subsequente é alterada, deixando inalterada a velocidade dessa cadeira. Por exemplo, se a tensão entre as cadeiras 1 e 2 for

Figura 2.4: Diagrama da fase dinâmica da estratégia de controle

superior à desejada, o regulador de tensão NTC12 (figura 2.4) agirá, movimentando a cápsula de aperto hidráulica da cadeira 2 (HGC2) para baixo, até que a tensão retorne ao valor desejado. Uma ação oposta (movimentação da cápsula de aperto hidráulica para cima) ocorre sempre que a tensão cair abaixo do valor solicitado pela referência.

Resolvido o problema de controle de tensão, o próximo passo é efetivamente controlar espessura. Como seria economicamente proibitivo adquirir cinco medidores Raio-X, de modo a medir a espessura na saída de cada cadeira no centro da tira, a solução prática adotada foi a de utilizar dois medidores Raio-X, um após a primeira cadeira, e outro após a última cadeira, medindo a espessura final do produto (figura 2.4). A partir do sinal realimentado do primeiro medidor Raio-X, a malha FB1 controla a espessura de entrada, movimentando a cápsula de aperto hidráulico da primeira cadeira. Na saída, como a cápsula de aperto hidráulica está sendo usada para controlar a tensão, a malha FB4 altera a velocidade da cadeira 4 em relação a cadeira 3, aumentando-a se a espessura medida for superior à desejada e diminuindo-a em caso contrário.

O controle de espessura é do tipo Proporcional-Integral e, para minimizar o efeito do atraso entre a mordida da cadeira e a posição do medidor, utilizam-se

preditores de Smith, conforme descrito por Sarkis [39]. Os tempos de atraso das malhas de controle de espessura FB1 e FB4 dependem das velocidades da tira nas cadeiras 1 e 4, das distâncias entre a saída dessas cadeiras e os medidores Raio-X, dos tempos de resposta dos medidores e do tempo de resposta da cápsula de aperto hidráulica para a malha FB1 e do tempo de resposta dos acionadores dos motores das cadeiras 3 e 4 para a malha FB4.

Existe ainda uma malha de controle antecipatório (FW2) que monitora os desvios de espessura registrados pelo medidor da saída da cadeira 1, rastreia-os até a entrada da cadeira 2 e então atua sobre a velocidade da primeira cadeira, de forma a manter constante o fluxo de massa na entrada da cadeira pivô. O tempo de atraso depende da velocidade da tira na saída da cadeira 1, da distância entre o medidor e a entrada da cadeira 2, do tempo de resposta do medidor e do tempo de resposta dos acionadores dos motores da cadeira 1. Nas malhas de controle dinâmico, os sensores e atuadores de tensão e espessura operam a uma taxa de 10 ms.

2.4 Operação do laminador

2.4.1 Descrição do modo normal de operação

Por solicitação do operador, o nível 3 da arquitetura de automação do laminador envia ao nível 2 um ou mais programas de produção, que consistem no conjunto das informações relevantes sobre as bobinas a serem produzidas, a saber, as características do material de entrada e as características desejadas para os produtos.

De posse dessas informações, o operador inicializa a função de rastreamento de entrada do nível 2, ou seja, informa ao nível 2 a ordem em que as bobinas efetivamente serão produzidas. Desse ponto em diante, os movimentos dos produtos ao longo da linha são acompanhados pelo sistema através das informações provenientes do nível 1, de modo que o sistema mantém uma imagem lógica atualizada da posição de cada tira ao longo da linha.

Imediatamente antes do processamento da tira, o sistema de geração de referências calcula o ajuste ótimo do laminador (espessuras, tensões, forças, potências e velocidades), o que constitui a fase estática do sistema de controle, descrito anteriormente. O operador habilita o carregamento das referências para o nível 1, de modo que, quando a tira chegar na posição correta, se dê início ao processo de laminação propriamente dito, que será controlado em tempo real durante a fase dinâmica.

Durante a laminação, dados de produção, referentes tanto ao produto quanto ao equipamento, são enviados do nível 1 para o nível 2 a uma periodicidade de 100 ms. Esses dados permanecem armazenados pelo nível 2 durante algum tempo, permitindo a geração de gráficos e relatórios. Essas informações são utilizadas também para a função de adaptação do sistema de geração de referências. Ao fim do processo, o nível 2 gera o relatório de produção da tira, que é enviado ao nível 3.

2.4.2 Descrição do modo de operação emergencial

No caso de falha do hardware que executa o nível 2 (CPU DEC Alpha Server 1000-A), toda a sequência normal de operação fica inviabilizada pela impossibilidade de execução do sistema de geração de referências. A alternativa de emergência para manter a operação nessa eventualidade consiste na consulta manual a tabelas de referências contendo os ajustes do laminador para os tipos mais comuns de produto. Essas tabelas são previamente geradas por um utilitário do nível 2 que interage em modo *off-line* com o sistema de geração de referências, sendo em seguida armazenadas na estação de operação do nível 1 de modo a possibilitar sua utilização por ocasião das emergências.

Tal situação representa uma significativa degradação em relação ao modo normal de operação. Como a laminação tem características de batelada, sempre existe a possibilidade de que as características da tira a ser produzida não constem nas tabelas armazenadas. Nesse caso, cabe ao operador escolher a tabela que tenha as características mais semelhantes às do produto desejado, numa decisão

subjetiva na qual se levam em conta não as referências ideais, mas simplesmente as referências aceitáveis. Digno de nota é o fato de que as tabelas são geradas com dados de largura com intervalos de 100 mm. Isso significa que para uma tira com 1150 mm, por exemplo, o operador não poderá utilizar a largura como uma das 4 possíveis chaves de pesquisa (as outras são o tipo de liga, a espessura de entrada e a espessura de saída) e terá que optar, dentre os registros retornados pela consulta, por um conjunto de referências para uma bobina de 1100 mm de largura ou para uma de 1200 mm. Além disso, as referências tabeladas são geradas em condições operacionais diferentes daquelas em que serão efetivamente usadas.

Com todas essas limitações, o tempo necessário para produção de uma tira é aumentado, o que reduz a produtividade da linha, além do fato de que, com referências menos precisas, a qualidade do produto é degradada. Essas foram as principais motivações para o desenvolvimento de um sistema alternativo para geração de referências.

Capítulo 3

O Modelo do Processo

3.1 Escolha do modelo

Há mais de meio século modelos físicos para o processo de laminação a frio vêm sendo desenvolvidos. O mais clássico modelo de laminação a frio, proposto por Ford, Ellis e Bland [11], Ford e Ellis [12] e Bland e Ford [13] e empregado no sistema de geração de referências usado pela Cosipa, envolve tanto equações algébricas como integrais. A cada passo do método de minimização da função custo na fase de otimização de referências, a função custo precisa ser avaliada algumas vezes, como será visto no próximo capítulo. A cada avaliação da função custo, as integrais que calculam forças e torques precisam ser discretizadas em dezenas de fatias para seu cálculo com um erro aceitável. Considerando que o método de minimização pode exigir centenas de iterações para sua convergência, o uso desse modelo de laminação a frio exige um grande esforço de processamento, proporcional ao número de fatias usadas na discretização das integrais a serem resolvidas.

Modelos simplificados envolvendo somente estruturas algébricas foram desenvolvidos a partir da teoria clássica, usando uma combinação de aproximações geométricas e analíticas com o objetivo inicial de serem usados principalmente em aplicações *on-line*, onde o tempo de cálculo é crítico. Bryant e Osborn [9, 10] propuseram um modelo simplificado de laminação a frio para cálculo de forças,

torques, escorregamento e ângulo neutro. Eles mostraram que em 1600 comparações entre o modelo proposto e o modelo clássico, 78%, 14% e 79% dos valores calculados, respectivamente, para força, torque e ângulo neutro tiveram diferença inferior a 5%. Outros resultados experimentais mostram que o modelo de força proposto por Ford, Ellis e Bland [11], Ford e Ellis [12] e Bland e Ford [13] apresenta um desvio médio de 2,9%, enquanto o modelo proposto por Bryant e Osborn [9, 10] apresenta um desvio médio de 3,8% em relação aos dados de força medidos no processo de laminação [40].

No sistema de geração de referências desenvolvido, optou-se por usar o modelo de laminação a frio de Bryant e Osborn [9, 10], o que permitiria obter resultados satisfatórios, sem precisar resolver integrais como no modelo clássico. Assim, a cada avaliação da função custo durante a fase de otimização, seria necessário avaliar um conjunto de equações algébricas apenas uma vez para cálculo das forças e torques, enquanto o modelo clássico necessitaria que um conjunto de equações algébricas fosse avaliada tantas vezes fossem o número de fatias em que o problema fosse discretizado. O sistema de geração de referências desenvolvido, por exigir menos cálculos, poderia inclusive ser executado em um PC comum durante a operação emergencial e em tempo compatível com a exigência do ritmo de produção. A seguir é apresentado o modelo de laminação a frio de Bryant e Osborn [9, 10].

3.2 O modelo de laminação a frio

3.2.1 Modelo de força

A figura 3.1 mostra as principais variáveis na região de deformação de uma cadeira.

A espessura da tira na entrada do laminador (mm), representada por h_0 , é definida como a espessura do material recozido. A espessura da tira na entrada da cadeira é representada por h_1 e na saída por h_2 . O cilindro de trabalho tem

Figura 3.1: Variáveis na região de deformação

raio R enquanto R' corresponde ao raio do cilindro deformado (mm), sujeito à carga de laminação.

Bryant e Osborn [9] propuseram para o cálculo da força de laminação por unidade de largura (N/mm) a seguinte expressão:

$$F = \frac{F_0}{1 - 0,4 \cdot a \cdot B_0 - b \cdot F_0} \quad (3.1)$$

onde

$$F_0 = (\bar{k} - \bar{\sigma}) \cdot \sqrt{R \cdot \delta} \cdot (1 + 0,4 \cdot \alpha_0) + F_{E0} \quad (3.2)$$

com

$$\alpha_0 = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} \cdot \exp\left(\frac{\mu \cdot \sqrt{R \cdot \delta}}{\bar{h}}\right) - 1 \quad (3.3)$$

$$\bar{h} = 0,28 \cdot h_1 + 0,72 \cdot h_2 \quad (3.4)$$

$$F_{E0} = \frac{2}{3} \cdot (k_2 - \sigma_2)^{1,5} \cdot \sqrt{\frac{R \cdot h_2 \cdot (1 - v_S^2)}{E_S}} \quad (3.5)$$

e

$$a = 1,4 \cdot \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} \cdot \left(\frac{\mu}{h}\right)^2 R \cdot c \quad (3.6)$$

$$b = \frac{c}{2 \cdot \delta} - \frac{F_0}{2} \cdot \left(\frac{c}{2 \cdot \delta}\right)^2 \quad (3.7)$$

$$B_0 = (\bar{k} - \bar{\sigma}) \cdot \sqrt{R \cdot \delta} \quad (3.8)$$

A redução absoluta da cadeira é definida como:

$$\delta = h_1 - h_2 \quad (3.9)$$

A constante $c = 2,16 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{N}$ é definida por:

$$c = \frac{4 \cdot (1 - v_R^2)}{\pi \cdot E_R} \quad (3.10)$$

onde v_R e E_R são, respectivamente, o coeficiente de Poisson e o módulo de Young do cilindro. O coeficiente de Poisson e o módulo de Young da tira valem, respectivamente, $v_S = 0,3$ e $E_S = 206906 \text{ N/mm}^2$. O coeficiente de atrito entre a tira e o cilindro é representado por μ e tem seu valor determinado empiricamente.

A tensão longitudinal média aplicada na tira (N/mm^2) é dada por:

$$\bar{\sigma} = \frac{2}{3} \cdot \sigma_1 + \frac{1}{3} \cdot \sigma_2 \quad (3.11)$$

onde σ_1 e σ_2 são as tensões aplicadas na tira, respectivamente na entrada e na saída da região de deformação. Assim como h_1 e h_2 , σ_1 e σ_2 são inicialmente determinados conforme será descrito na próxima seção.

O limite de escoamento médio (N/mm^2) é expresso por:

$$\bar{k} = \frac{1}{3} \cdot k_1 + \frac{2}{3} \cdot k_2 \quad (3.12)$$

onde k_1 e k_2 são os limites de escoamento do material, respectivamente, na entrada e na saída da região de deformação. Eles são estimados por leis empíricas sendo

uma significativa fonte de erro para o cálculo da força de laminação segundo Bryant e Osborn [9].

Bolon [6] usa a seguinte expressão para estimar os limites de escoamento no sistema de geração de referências usado pela Cosipa e que será usado no sistema desenvolvido a fim de reduzir o erro no cálculo de força no modelo usado:

$$k_i = k_0 \cdot (44,6 + 17,1 \cdot \varepsilon_i) \cdot [1 - 0,31 \cdot \exp(-13,8 \cdot \varepsilon_i)] \quad i = 1, 2 \quad (3.13)$$

onde k_0 é uma constante calculada pela fase de adaptação e nesse trabalho será usado $k_0 = 1,3$, um valor médio. ε_i é a redução logarítmica, expressa por:

$$\varepsilon_i = \ln \frac{h_0}{h_i} \quad (3.14)$$

A espessura de entrada, de saída e o raio do cilindro de trabalho devem estar dentro dos limites estipulados na tabela 2.1, página 16. Obedecendo os limites físicos do processo, o numerador da expressão (3.1) para cálculo da força de laminação é sempre positivo.

3.2.2 Modelo de torque, escorregamento e ângulo neutro

O torque por unidade de largura (N·mm/mm), em cada cilindro de laminação é calculado pela expressão [10]:

$$G = R \cdot F \cdot C + \frac{R}{2} \cdot (h_1 \cdot \sigma_1 - h_2 \cdot \sigma_2) \quad (3.15)$$

$$C = \frac{\phi_1 \cdot [(2/3) \cdot (k_1 - \sigma_1) + (1/3) \cdot (k_2 - \sigma_2)]}{(k_1 - \sigma_1) + (k_2 - \sigma_2)} \quad (3.16)$$

onde ϕ_1 (rad) é o ângulo de contato entre o cilindro e a tira, sendo expresso por:

$$\phi_1 = \sqrt{\frac{\delta}{R'}} \quad (3.17)$$

e R' é o raio deformado do cilindro, sendo estimado pela equação de Hitchcock:

$$R' = R \cdot \left(1 + \frac{c \cdot F}{\delta}\right) \quad (3.18)$$

Existe um ponto em que a velocidade tangencial dos cilindros é igual à velocidade da tira. Este ponto chama-se ponto neutro. O ângulo ϕ_N (rad), correspondente a este ponto, é denominado ângulo neutro e é dado por [10]:

$$\phi_N = \frac{1}{2} \cdot \frac{h_2}{\tilde{h}} \cdot \sqrt{\frac{\delta}{R'}} - \frac{1}{4} \cdot \frac{h_2}{\tilde{h}} \cdot \frac{\delta}{\mu \cdot R'} + 0,275 \cdot \frac{h_2}{\mu \cdot R'} \cdot \left(\frac{\sigma_2}{k_2} - \frac{\sigma_1}{k_1}\right) \quad (3.19)$$

$$\tilde{h} = 0,48 \cdot h_1 + 0,52 \cdot h_2 \quad (3.20)$$

A velocidade periférica do cilindro de trabalho (mm/s) é representada por V . V_1 e V_2 correspondem, respectivamente, às velocidades da tira na entrada e na saída da cadeira. Assim sendo, o escorregamento avante é definido como:

$$f = \frac{V_2 - V}{V} \quad (3.21)$$

Bryant e Osborn [10] propuseram a seguinte expressão para o cálculo do escorregamento avante:

$$f = \frac{R' \cdot \phi_N^2}{h_2} \quad (3.22)$$

3.2.3 Fluxo de massa, velocidade e potência

A potência mecânica do cilindro de laminação (W) é dada por:

$$P_R^{MC} = T_R \cdot \omega_R \quad (3.23)$$

onde T_R é o torque do cilindro (N·m) dado por:

$$T_R = G \cdot W \quad (3.24)$$

com W sendo a largura da tira (m). A velocidade angular do cilindro, ω_R , será calculada a seguir.

Partindo do princípio que o volume de material que sai de uma cadeira é o mesmo volume que entra e que a variação de largura da tira na laminação a frio é desprezível, tem-se:

$$V_1 \cdot h_1 = V_2 \cdot h_2 \quad (3.25)$$

Assim possível determinar a velocidade de saída V_2 conhecendo, por exemplo, a velocidade e a espessura de saída da cadeira anterior:

$$V_2 = \frac{V_1 \cdot h_1}{h_2} \quad (3.26)$$

A velocidade de entrada da tira na primeira cadeira é determinada como será explanado no próximo capítulo. Substituindo (3.26) em (3.21), conclui-se que:

$$V = \frac{V_1 \cdot h_1}{h_2 \cdot (1 + f)} \quad (3.27)$$

De acordo com Edwards [7] o arco de contato entre a tira e o cilindro raramente excede 6° . Considerando que o raio do cilindro é deformado apenas nessa região, pode-se admitir que a velocidade angular do cilindro (rad/s) é dada por $\omega_R = V/R$ e determina-se a potência mecânica do cilindro de laminação através da expressão (3.23).

A potência mecânica do motor é dada por:

$$P_M^{MC} = T_M \cdot \omega_M \quad (3.28)$$

onde o torque do motor é dado por:

$$T_M = \frac{T_R}{r_R \cdot \eta_R} \quad (3.29)$$

e a velocidade angular do eixo do motor é dada por:

$$\omega_M = r_{MR} \cdot \omega_R \quad (3.30)$$

com r_{MR} sendo a relação de redução entre a velocidade do motor e do cilindro e η_{MR} sendo o rendimento do redutor.

A potência elétrica do motor é expressa por:

$$P_M^{EL} = \frac{P_M^{MC}}{\eta_M} \quad (3.31)$$

onde η_M é o rendimento do motor.

Finalmente, a corrente elétrica (A) é determinada por:

$$I = \frac{P_M^{EL}}{V} \quad (3.32)$$

com V sendo a tensão elétrica aplicada no motor da cadeira. Seus valores encontram-se na tabela 2.1, página 16.

3.3 Inicialização do modelo do processo

Além das características referentes ao material de entrada, das bobinas a serem produzidas e do laminador, o modelo de laminação apresentado no item anterior necessita como entrada as espessuras h_1 e h_2 e tensões σ_1 e σ_2 nas zonas entre cadeiras para atingir a espessura final desejada.

Existem diversas combinações de espessuras e tensões nas zonas entre cadeiras que podem proporcionar a espessura final desejada. No entanto, algumas dessas configurações podem sobrecarregar alguma das cadeiras e, conseqüentemente, produzir um material com qualidade ruim.

Algoritmos para inicialização das espessuras e tensões nas zonas entre cadeiras serão apresentando a seguir. Eles garantem que a distribuição de potências entre as cadeiras serão adequadas e produzirão bons resultados para qualidade e produtividade do processo.

Em sistemas de geração de referências que não possuem fase de otimização, as referências são geradas diretamente a partir dos resultados da inicialização. O sistema de geração de referências da Cosipa por muitos anos contava apenas com essa fase de inicialização. Para sistemas de geração de referências com fase de

otimização, esses algoritmos de inicialização geram as condições iniciais próximas do ponto ótimo, o que proporciona uma maior eficiência ao método de otimização.

3.3.1 Inicialização das espessuras

A teoria do fator beta proposta por Guo [41] 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*.

A redução de espessura que a cadeira i proporciona é definida por:

$$r_i = \frac{h_i - h_{i+1}}{h_i} \quad (3.33)$$

Uma curva de redução, obedecendo a um padrão randômico, pode não proporcionar uma distribuição adequada de potências entre cadeiras. Uma família de curvas de redução pode ser definida de modo que a redução em cada cadeira obedeça à seguinte equação:

$$r_i = \beta \cdot r_{ui} + (1 - \beta) \cdot r_{li} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.34)$$

onde N é o número de cadeiras, r_{ui} e r_{li} são, respectivamente, os limites de redução superior e inferior na i -ésima cadeira.

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:

$$r_t = 1 - \frac{h_N}{h_0} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - r_i) \quad (3.35)$$

onde h_0 e h_N são, respectivamente, as espessuras inicial e final.

Guo [41] propõe que as equações (3.34) e (3.35) sejam resolvidas pelo método iterativo de Newton-Raphson. Assim, a seguinte expressão para o fator beta é obtida:

$$\beta^{(\lambda+1)} = \beta^{(\lambda)} - \frac{\prod_{i=1}^N [(1 - r_{li}) - \beta^{(\lambda)} \cdot (r_{ui} - r_{li})] - \frac{h_N}{h_0}}{\sum_{j=1}^N (r_{uj} - r_{lj}) \cdot \prod_{i=1, i \neq j}^N [(1 - r_{li}) - \beta^{(\lambda)} \cdot (r_{ui} - r_{li})]} \quad (3.36)$$

Portanto, conhecendo a espessura de entrada e a espessura de saída da tira, e fixando os valores máximo e mínimo de redução para cada uma das cadeiras, um possível conjunto de reduções para cada cadeira poderá ser calculado pelo fator beta de modo que a curva de redução estará dentro dos limites estabelecidos.

A solução proposta por Guo [41] para encontrar o fator beta usando o método de Newton-Raphson apresenta o inconveniente de ser uma solução iterativa, que requer uma condição inicial suficientemente próxima da solução, além de necessitar de um número λ de iterações, exigindo um esforço computacional maior que uma solução não iterativa.

Pires et al. [42] modificaram o método anteriormente apresentado, para cálculo das reduções em cada cadeira do laminador da Cosipa de uma forma não iterativa. A teoria do fator beta prevê a determinação de uma família de curvas cujas reduções em cada passe é descrita por (3.34). Usando a mesma expressão, porém empregando reduções logarítmicas, tem-se:

$$\varepsilon_i = \beta \cdot \varepsilon_{ui} + (1 - \beta) \cdot \varepsilon_{li} \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (3.37)$$

onde ε_i denota a redução logarítmica na cadeira i , expressa por (3.14) e podendo ser escrita como:

$$\varepsilon_i = \ln \frac{1}{1 - r_i} \quad (3.38)$$

e ε_{li} e ε_{ui} representam, respectivamente, a mínima e a máxima redução logarítmica na cadeira i e são dadas por:

$$\varepsilon_{li} = \ln \frac{1}{1 - r_{li}} \quad (3.39)$$

$$\varepsilon_{ui} = \ln \frac{1}{1 - r_{ui}} \quad (3.40)$$

Figura 3.2: Curva de redução para material com 3 mm de entrada e 0,91 mm de saída

Considerando a soma destas reduções, resulta:

$$\varepsilon_m = \sum_{i=1}^N \varepsilon_i = \beta \cdot \sum_{i=1}^N \varepsilon_{ui} + (1 - \beta) \cdot \sum_{i=1}^N \varepsilon_{li} \quad (3.41)$$

Portanto:

$$\beta = \frac{\varepsilon_m - \sum_{i=1}^N \varepsilon_{li}}{\sum_{i=1}^N (\varepsilon_{ui} - \varepsilon_{li})} \quad (3.42)$$

Conhecido o valor de β , é possível determinar o valor das reduções em cada cadeira a partir de (3.37) e (3.38):

$$r_i = 1 - \frac{1}{\exp \varepsilon_{li}} \quad (3.43)$$

Então, substituindo o valor das reduções em (3.33), as espessuras na saída das cadeiras são determinadas por:

$$h_{i+1} = (1 - r_i) \cdot h_i \quad (3.44)$$

Assim, ficam determinadas todas as reduções nas cadeiras e, como consequência, as espessuras nas zonas localizadas entre as cadeiras. A figura 3.2 é um exemplo das reduções obtidas através da aplicação 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. Os limites máximos e mínimos de redução são escolhidos de modo que a maior parte da redução da tira seja realizada nas 3 primeiras cadeiras, deixando a última cadeira responsável pelo acabamento superficial, o que é padrão na operação desse tipo de laminador, como atesta Edwards [7].

3.3.2 Inicialização das tensões

Para diferentes espessuras de saída da tira no laminador da Cosipa, mediu-se a tensão entre as cadeiras durante o processo. Na tabela 3.1 tem-se os valores medidos.

Nota-se que a tensão entre cadeiras e a espessura de saída ajusta-se bem a uma função quadrática (figura 3.3) pelo método dos mínimos quadrados. Assim, as tensões (kgf/mm²) em cada um dos vãos entre cadeiras podem ser dadas por:

$$\sigma_{12} = 1,1177 \cdot h_N^2 - 6,4426 \cdot h_N + 15,987 \quad (3.45)$$

$$\sigma_{23} = 1,8960 \cdot h_N^2 - 10,596 \cdot h_N + 22,613 \quad (3.46)$$

$$\sigma_{34} = 3,0369 \cdot h_N^2 - 16,453 \cdot h_N + 31,218 \quad (3.47)$$

A inicialização das tensões entre cadeiras é obtida, portanto, avaliando as expressões anteriores para a espessura de saída desejada.

h_N (mm)	σ_{12} (kgf/mm ²)	σ_{23} (kgf/mm ²)	σ_{34} (kgf/mm ²)
0,400	13,6	18,7	25,1
0,489	13,1	17,9	23,9
0,712	12,0	16,0	21,0
0,966	10,8	14,1	18,2
1,320	9,4	11,9	14,8
1,662	8,4	10,2	12,3
1,967	7,6	9,1	10,6
2,300	7,1	8,3	9,4
2,740	6,7	7,8	8,9

Tabela 3.1: Espessura de saída e tensão entre cadeiras

Figura 3.3: Curva tensão entre cadeiras *versus* espessura de saída

Capítulo 4

Otimização das Referências

4.1 A função custo

Em virtude do grande número de variáveis envolvidas no processo de laminação a frio e às peculiaridades das interações entre elas, a geração de referências é uma operação que possui muitos graus de liberdade, tendo como restrições os limites impostos pelo equipamento e pelo material processado. Assim, para um dado produto, existe mais de um conjunto de referências adequadas ao objetivo proposto.

De acordo com Bryant, Halliday e Spooner [43], há pelo menos duas variáveis de controle numa cadeira de laminação: a abertura da cadeira e a velocidade dos motores. Em geral, há um grande número de combinações de aberturas e velocidades dos motores capazes de produzir uma dada espessura de saída. Logo, a escolha de um determinado conjunto dentre os vários possíveis é um problema de otimização.

O método de otimização utilizado nesse trabalho é baseado no conceito de função custo que envolve parâmetros relacionados à qualidade e produtividade do processo e cujo mínimo está associado ao conjunto de referências ótimas.

A definição de referências ótimas para o processo de laminação é uma questão altamente subjetiva [7]. Dependendo dos parâmetros envolvidos na função custo

e de seu respectivo grau de importância, sua minimização fornece diferentes conjuntos de referências ótimas. A função custo utilizada no sistema de geração de referências proposto, assim como o sistema usado pela Cosipa, considera importantes para qualidade e produtividade, a potência dos motores das cadeiras, força de laminação entre a tira e o cilindro de trabalho e tensão mecânica da tira nas zonas entre as cadeiras. A função custo é dada por [6]:

$$J = \sum_{i=1}^4 \left(J_P^{(i)} + J_F^{(i)} \right) + \sum_{j=1}^3 J_T^{(j)} \quad (4.1)$$

onde J é o custo total e J_P e J_F são respectivamente, os custos relativos à potência dos motores e à força de laminação na cadeira i . J_T é o custo relativo à tensão mecânica existente na zona j entre cadeiras adjacentes.

4.1.1 Função custo de potência

A função custo relativa à potência elétrica dos motores em cada cadeira, usada no sistema de geração de referências da Cosipa é dada por [6]:

$$J_P^{(i)} = \left[k_P^{(i)} \cdot \left(\frac{P^{(i)}}{\tilde{P}^{(i)}} - 1 \right) \right]^{N_P^{(i)}} \quad (4.2)$$

onde k_P e N_P são constantes cujos valores estão relacionados na tabela 4.1. P é a potência consumida pelo motor na cadeira i e a potência $\tilde{P}$ é dada por:

$$\tilde{P}^{(i)} = \frac{P_{MAX}^{(i)} + P_{MIN}^{(i)}}{2} \quad (4.3)$$

A potência máxima, P_{MAX} , é definida por:

$$P_{MAX}^{(i)} = q_P^{(i)} \cdot P_{NOM}^{(i)} \quad (4.4)$$

onde P_{NOM} é a potência nominal dos motores da cadeira e q_P é um fator de uso dessa potência. Na primeira cadeira, adota-se $q_P = 0,625$ pois a velocidade nessa cadeira deve ser relativamente pequena para que a velocidade na saída da última cadeira não exceda o limite máximo para o processo. Para as demais cadeiras, adota-se $q_P = 1,25$, pois o motor pode fornecer potência até 25% acima da potência nominal por até 2 horas (o processamento de uma tira dura alguns minutos)

Cadeira	P_{NOM} (kW)	P_{MAX} (kW)	P_{MIN} (kW)	$\tilde{P}$ (kW)	k_P	K_P	N_P
1	3600,0	2250,0	1687,5	1968,75	7	14650	20
2	3600,0	4500,0	3375,0	3937,50	7	14650	20
3	3600,0	4500,0	3375,0	3937,50	7	14650	20
4	2984,0	3730,0	2797,5	3263,75	7	14650	10

Tabela 4.1: Parâmetros da função custo de potência

e deseja-se que toda potência disponível seja usada para máxima produtividade. A potência mínima desejada, P_{MIN} , é definida como sendo 75% da potência máxima. Na tabela 4.1 contém os valores de P_{NOM} , P_{MAX} , P_{MIN} e $\tilde{P}$ para todas as cadeiras.

Deseja-se colocar a função custo relativa à potência (4.2) em uma forma padrão que é usada também nas funções custo de força e tensão. Substituindo (4.3) em (4.2), chega-se a:

$$J_P^{(i)} = K_P^{(i)} \cdot \left(\frac{P^{(i)} - \frac{P_{MAX}^{(i)} + P_{MIN}^{(i)}}{2}}{\frac{P_{MAX}^{(i)} - P_{MIN}^{(i)}}{2}} \right)^{N_P^{(i)}} \quad (4.5)$$

onde:

$$K_P^{(i)} = \left(k_P^{(i)} \cdot \frac{P_{MAX}^{(i)} - P_{MIN}^{(i)}}{P_{MAX}^{(i)} + P_{MIN}^{(i)}} \right)^{N_P^{(i)}} \quad (4.6)$$

que é a forma padrão desejada, apresentada em [44].

O coeficiente K_P determina o grau de participação da função custo de potência J_P na função custo J . O coeficiente K_P e o expoente N_P estão relacionados à taxa de crescimento da função custo de potência. Seus valores são apresentados na tabela 4.1. Na figura 4.1 pode-se visualizar a forma da função custo relativa à potência.

Figura 4.1: Função custo relativa à potência

4.1.2 Função custo de força de laminação

A função custo relativa à força de laminação é definida de maneira análoga à função custo relativa à potência:

$$J_F^{(i)} = K_F^{(i)} \cdot \left(\frac{F^{(i)} - \frac{F_{MAX}^{(i)} + F_{MIN}^{(i)}}{2}}{\frac{F_{MAX}^{(i)} - F_{MIN}^{(i)}}{2}} \right)^{N_F^{(i)}} \quad (4.7)$$

A força considerada ideal para o processo, $\tilde{F}$, é de 1000 ton/m nas três primeiras cadeiras e de geralmente 800 ton/m na última cadeira. Nas três primeiras cadeiras os valores máximos e mínimos desejados para força são definidos como 40% acima e abaixo do valor considerado ideal. Na última cadeira os valores máximos e mínimos são definidos como sendo 10% acima e abaixo do valor desejado. Como a última cadeira é responsável pelo acabamento superficial da tira, a força exercida não pode ser muito diferente do valor definido como ideal. É a chamada estratégia de força imposta na última cadeira. Os valores adotados para F_{MAX} , F_{MIN} , K_F e N_F são apresentados na tabela 4.2.

Cadeira	$\tilde{F}$ (ton/m)	F_{MAX} (ton/m)	F_{MIN} (ton/m)	K_F	N_F
1	1000	1400	600	0,01	20
2	1000	1400	600	0,01	20
3	1000	1400	600	0,01	20
4	800	880	720	1,00	20

Tabela 4.2: Parâmetros da função custo de força

4.1.3 Função custo de tensão

A função custo relativa à tensão entre cadeiras segue a mesma forma das anteriores, sendo dada por:

$$J_T^{(j)} = K_T^{(j)} \cdot \left(\frac{T^{(j)} - \frac{T_{MAX}^{(j)} + T_{MIN}^{(j)}}{2}}{\frac{T_{MAX}^{(j)} - T_{MIN}^{(j)}}{2}} \right)^{N_T^{(j)}} \quad (4.8)$$

Assim como no sistema de geração de referências usado pela Cosipa em condições normais de operação, no sistema desenvolvido foi usado $K_T = 1$ e $N_T = 6$ para as três zonas entre cadeiras.

As tensões máxima, T_{MAX} , e mínima, T_{MIN} , nas zonas entre cadeiras são definidas, respectivamente, como sendo 10% acima e abaixo das tensões $\tilde{T}$ consideradas ideais pelos analistas de processo. Elas são dadas pelas expressões (3.45) – (3.47) apresentadas na seção 3.3.2, página 38.

4.1.4 Escolha dos coeficientes da função custo

As funções custo relativas à potência (4.5), força (4.7) e tensão (4.8) medem quão afastadas potências, força e tensão estão dos valores considerados ideais pelos analistas de processo. A força $\tilde{F}$ é desejada para se conseguir uma boa planicidade. A utilização plena da potência $\tilde{P}$ proporciona ao laminador a produtividade máxima, e a tensão $\tilde{T}$, por sua vez, terá influência sobre a força e a distribuição de potência.

Quanto menor a função custo, expressa por (4.1), mais próximos potência, força e tensão estarão de seus valores considerados ideais e melhor qualidade e

produtividade poderão ser alcançadas com as referências associadas com o valor da função custo. Por outro lado, quanto mais potência, força e tensão se afastarem dos valores ideais, maior será o valor da função custo e pior será o conjunto de referências associadas ao valor da função custo. Como pode-se ver na figura 4.1, a função custo de potência mantém-se relativamente baixa entre os valores máximos e mínimos definidos, aumentando rapidamente fora dessa faixa. O mesmo pode ser dito sobre as funções custo de força e tensão, pois elas foram definidas seguindo a mesma estrutura.

Os coeficientes, expoentes e limites máximos e mínimos de cada função custo foram escolhidos de modo que a potência, força e tensão atingissem valores mais próximos dos definidos como ideais ao minimizar-se a função custo. Além disso, segundo Bolon [6], as constantes da função custo do sistema de geração de referências usado pela Cosipa em condições normais de operação foram escolhidos de modo que:

- A potência fosse equilibrada nas três primeiras cadeiras. Para isso, bastou ajustar K_P para que a participação da função custo de potência fosse significativa na função custo. Assim a distribuição de potência ficaria dentro dos limites máximos e mínimos de potência definidos.
- A força na última cadeira ficasse muito próxima de um valor desejado, para não comprometer o acabamento superficial da tira. Para tanto, escolheu-se limites máximos e mínimos de força bastante próximos e adotou-se um valor de K_F maior para a quarta cadeira com pode ser visto na tabela 4.2.
- Limites máximos e mínimos de força e tensão fossem respeitados em todas as cadeiras para evitar o risco de rompimento da tira durante o processo. Isso pôde ser alcançado escolhendo-se os coeficientes e expoentes da função custo de força e tensão de modo que se a força ou a tensão ultrapassasse os limites estabelecidos, a função custo atingisse valores elevados rapidamente.

4.2 O método de minimização da função custo

Existem vários métodos para minimização de funções. Para busca do mínimo de funções custo envolvidas com o cálculo de referências ótimas para o processo de laminação, Ozsoy, Ruddle e Crawley [3] usaram o método de Rosenbrock de programação não linear e Wang et al. [4] usaram algoritmos genéticos. Assim como Fiebig e Zander [22], utilizou-se nesse trabalho o método simplex, proposto por Nelder e Mead [8] e que já era empregado com sucesso no sistema atualmente usado pela Cosipa para o cálculo de referências.

O método simplex é um dos mais populares métodos de minimização de funções não lineares sem restrições e sem necessidade de cálculo de derivadas. A base do método simplex foi desenvolvida por Spendley, Hext e Himsworth [45] em 1961 e em 1965 Nelder e Mead [8] propuseram modificações que conferiram a forma moderna do método. Este método não deve ser confundido com o famoso método simplex de Dantzig de programação linear. Walters et al. [44] apresentam inúmeras referências de aplicações e variações do método simplex. Uma possível implementação do método, em linguagem C, é apresentada em [46]. Lagarias et al. [47] apresentam propriedades de convergência do método simplex para funções de 1 e 2 variáveis e estritamente convexas. Para outras funções não foram provadas propriedades para convergência do método simplex.

Um simplex é uma figura geométrica em n dimensões, constituída de $n + 1$ pontos. Um simplex em duas dimensões é um triângulo, em três dimensões é um tetraedro e assim sucessivamente. O método pode ser estendido para maiores dimensões, mas não é possível a visualização do simplex. Apesar disso, o método simplex pode ser aplicado, teoricamente, para a minimização de uma função com um número qualquer de variáveis.

A função custo apresentada na seção anterior necessita de seis variáveis para ser avaliada: três espessuras entre cadeiras (a espessura de entrada e saída do processo são fixas) e três tensões entre cadeiras, conforme discutido na seção 3.3. A partir do conhecimento dessas variáveis, potência e força são calculadas

através do modelo do processo e obtém-se o valor da função. Assim, o simplex em questão tem seis dimensões e é formado por sete pontos. O ponto inicial é gerado pelos algoritmos de inicialização apresentados na seção 3.3. Esses algoritmos geram um ponto inicial próximo do ponto mínimo para evitar que o método convirja em mínimos locais e convirja com menor número de iterações. As três espessuras entre cadeiras são obtidas pela expressão (3.44), pagina 38, e as três tensões entre cadeiras são obtidas pelas expressões (3.45) – (3.47). Os outros seis pontos necessários para formar o simplex inicial são obtidos incrementando-se cada uma das variáveis do ponto inicial em 10%. O método simplex consiste na aplicação dos passos descritos a seguir e que podem ser visualizados para um simplex bidimensional nas figuras 4.2 e 4.3.

1. Ordenação: Ordene e rotule os $n + 1$ pontos como $x_1, x_2, \dots, x_{n+1}$ tal que $J(x_1) \leq J(x_2) \leq \dots \leq J(x_{n+1})$. Como o objetivo é minimizar a função, x_1 é chamado de melhor ponto e x_{n+1} o pior.

2. Reflexão: Calcule o ponto refletido x_r , dado por:

$$x_r = \bar{x} + (\bar{x} - x_{n+1}) \quad (4.9)$$

onde $\bar{x}$ é o centróide dos n melhores pontos, isto é:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.10)$$

Calcule $J(x_r)$. Se $J(x_1) \leq J(x_r) < J(x_n)$, substitua x_{n+1} por x_r e vá para o passo 6.

3. Expansão: Se $J(x_r) < J(x_1)$, calcule o ponto de expansão x_e , dado por:

$$x_e = \bar{x} + 2 \cdot (x_r - \bar{x}) \quad (4.11)$$

Calcule $J(x_e)$. Se $J(x_e) < J(x_r)$, substitua x_{n+1} por x_e e vá para o passo 6. Caso contrário substitua x_{n+1} por x_r e vá para o passo 6.

4. Contração: Se $J(x_r) \geq J(x_n)$ execute uma contração entre $\bar{x}$ e o melhor de x_{n+1} e x_r .

4.1. Contração externa: Se $J(x_n) \leq J(x_r) < J(x_{n+1})$, isto é, x_r é estritamente melhor que x_{n+1} , execute uma contração externa. Calcule:

$$x_{oc} = \bar{x} + \frac{1}{2} \cdot (x_r - \bar{x}) \quad (4.12)$$

Calcule $J(x_{oc})$. Se $J(x_{oc}) \leq J(x_r)$, substitua x_{n+1} por x_{oc} e vá para o passo 6. Caso contrário vá para o passo 5.

4.2. Contração interna: Se $J(x_r) \geq J(x_{n+1})$ execute uma contração interna. Calcule:

$$x_{ic} = \bar{x} + \frac{1}{2} \cdot (x_{n+1} - \bar{x}) \quad (4.13)$$

Calcule $J(x_{ic})$. Se $J(x_{ic}) \leq J(x_{n+1})$, substitua x_{n+1} por x_{ic} e vá para o passo 6. Caso contrário vá para o passo 5.

5. Contração maciça: Avalie a função custo J em n novos pontos:

$$x'_i = x_1 + \frac{1}{2} \cdot (x_i - x_1), \quad i = 2, \dots, n+1 \quad (4.14)$$

Substitua $x_2, \dots, x_{n+1}$ pelos novos pontos $x'_2, \dots, x'_{n+1}$.

6. Condição de parada: Ordene e rotule os pontos do novo simplex como $x_1, x_2, \dots, x_{n+1}$ tal que $J(x_1) \leq J(x_2) \leq \dots \leq J(x_{n+1})$. Se $J(x_{n+1}) - J(x_1) < \varepsilon$, então pare. Caso contrário, vá para o passo 2. $\varepsilon > 0$ é uma tolerância que foi adotada como sendo 0,001. Um outro critério de parada adotado foi o número de iterações. O número máximo de iterações permitidas foi 300.

A aplicação desse método retorna três espessuras e três tensões entre cadeiras que minimizam a função custo, ou seja, que permitem obter potências e forças (a tensão é variável de entrada da função custo) mais próximas possíveis dos valores definidos como ideais para máxima produtividade do processo e qualidade do produto.

4.3 Imposição de limites e restrições

O método simplex minimiza uma função sem restrições. No problema de otimização de referências é desejável usar toda potência disponível nos motores,

sem ultrapassar os valores máximos permitidos em cada cadeira, para maximizar a produtividade. Além disso, as correntes dos motores não podem passar limites estabelecidos e a velocidade máxima do processo deve ser respeitada.

Para que toda potência no laminador seja usada, durante a minimização da função custo as velocidades das cadeiras são recalculadas de modo tal que a soma das potências calculadas a partir dessas velocidades seja igual à soma dos valores definidos como máximo. Ainda durante a minimização da função custo, a variação das espessuras e tensões entre cadeiras não pode ultrapassar o limite de 10%. Dessa forma, admite-se que as espessuras e tensões iniciais não estão muito distantes do ponto ótimo e assim, evita-se que o método simplex não convirja ou convirja em mínimos locais.

Após a fase de otimização, se a potência ou a corrente em alguma das cadeiras ultrapassar o valor máximo permitido, as velocidades são recalculadas de modo que esses limites sejam respeitados. Finalmente, se a velocidade do processo, ou seja, a velocidade de saída da última cadeira exceder o valor máximo permitido, a velocidade do processo é reduzida a esse valor e as potências são recalculadas.

4.3.1 Uso da potência total disponível

Igualando-se a potência elétrica do motor da primeira cadeira ao valor máximo permitido, P_{MAX} , na expressão (3.31) página 34, obtém-se a velocidade da primeira cadeira:

$$V^{(1)} = \frac{\eta_M \cdot \eta_R \cdot R^{(1)} \cdot P_{MAX}^{(1)}}{G^{(1)} \cdot W} \quad (4.15)$$

onde η_M e η_R são os rendimentos do motor e do redutor, respectivamente, R é o raio do cilindro de trabalho, e W é a largura da tira laminada e G é o torque por unidade de largura, dado pela expressão (3.15), página 31. As velocidades nas demais cadeiras são calculadas pela expressão (3.27), página 33.

Para uma dado padrão de espessuras e tensões entre cadeiras, soma das potências determinadas a partir das velocidades calculadas do modo descrito,

em geral não é igual a potência total disponível no laminador, ou seja, igual a soma das potências máximas dos motores. Para que seja atingida a igualdade, calcula-se a razão entre elas:

$$r_P = \frac{\sum_{i=1}^4 P^{(i)}}{\sum_{i=1}^4 P_{MAX}^{(i)}} \quad (4.16)$$

A velocidade de saída da quarta cadeira é então recalculada da seguinte forma:

$$V_2^{(4)} \leftarrow \frac{V_2^{(4)}}{r_P} \quad (4.17)$$

As velocidades da tira na entrada e saída das demais cadeiras são calculadas pela expressão (3.25), página 33, e a velocidade dos cilindros das cadeiras são dadas pela expressão (3.27), obedecendo o princípio da conservação do fluxo de massa. Com as velocidades recalculadas desse modo, a soma das potências nas cadeiras é igual a soma das potências máximas.

4.3.2 Limites de potência e correntes dos motores

Após a fase de otimização, é verificado se a potência P ou a corrente I ultrapassaram seus valores máximos P_{MAX} e I_{MAX} (25% acima do valor nominal) em alguma das cadeiras. Em caso afirmativo, determina-se:

$$r_{PI} = \max_{i=1,2,3,4} \left\{ \frac{P^{(i)}}{P_{MAX}^{(i)}}, \frac{I^{(i)}}{I_{MAX}^{(i)}} \right\} \quad (4.18)$$

A velocidade na saída da quarta cadeira é então recalculada da seguinte forma:

$$V_2^{(4)} \leftarrow \frac{V_2^{(4)}}{r_{PI}} \quad (4.19)$$

As demais velocidades são recalculadas obedecendo o princípio da conservação do fluxo de massa. Como a velocidade foi reduzida, a potência também é recalculada. A potência obtida é inferior à potência máxima disponível, chegando

mais próxima da média entre os valores definidos como máximos e mínimos, $\tilde{P}$. Isso implica em uma redução no valor da função custo, melhorando, portanto, a qualidade do conjunto de referências, apesar da soma das potências nas cadeiras não ser mais igual à soma das potências máximas disponíveis.

4.3.3 Limite de velocidade do processo

Mesmo com os limites de potência e corrente obedecidos em todas as cadeiras, é possível que a velocidade máxima do processo (1080 m/min) seja ultrapassada na saída da última cadeira. Caso seja, a velocidade na saída da última cadeira é admitida como sendo a máxima velocidade permitida para o processo.

As velocidades dos cilindros e da tira na entrada e na saída das cadeiras são recalculadas a partir do princípio da conservação do fluxo de massa. Dessa forma, garante-se que a velocidade máxima do processo não será ultrapassada. Os novos valores de potência obtidos implicam na alteração do valor final da função custo.

Capítulo 5

Resultados

5.1 Referências para uma dada bobina

O sistema de geração de referências desenvolvido, que será chamado de *MillSetUp*, foi implementado em Matlab [5] e compreende o modelo do processo e o método de otimização descritos nos dois últimos capítulos. Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados práticos obtidos através do *MillSetUp* para o cálculo de referências para bobinas efetivamente presentes no programa de produção do laminador de tiras a frio da Cosipa. A avaliação desses resultados foi feita em conjunto com o engenheiro de processo da equipe de suporte técnico à operação da planta.

Com o intuito de verificar a consistência das referências obtidas pelo sistema desenvolvido, inicialmente escolheu-se aleatoriamente uma bobina do programa de produção e foram obtidas as referências para o processo por meio do *MillSetUp* e do sistema de geração de referências usado pela Cosipa em condições normais de operação, conhecido como *Corum*.

A bobina em questão tem 3,01 mm de espessura de entrada, 1004 mm de largura e deseja-se uma espessura de saída de 0,91 mm. No *MillSetUp* o método simplex partiu de um custo inicial de $1,67 \cdot 10^6$ chegando a um custo final de 10,46 após 261 iterações. Como pode ser visto na figura 5.1, a função custo caiu rapidamente. O critério que estipula uma variação de inferior à 0,001 na função

Figura 5.1: Evolução da função custo durante a fase de otimização

custo entre duas iterações consecutivas para parada do algoritmo de otimização mostrou-se adequado, evitando que o algoritmo parasse em mínimos locais. A função custo no *Corum* teve custo inicial de $2,0 \cdot 10^{10}$, chegando a 28,75 após 213 iterações.

Embora o número de iterações entre os dois métodos não tenham diferido muito, o *MillSetUp* necessitou de 0,77 segundo de processamento de um PC Windows Pentium IV 2,0 GHz, enquanto o *Corum* consumiu 11,15 segundos de processamento do DEC Alpha da Cosipa. As referências obtidas pelos dois sistemas estão listadas na tabela 5.1.

As diferenças entre as referências calculadas pelos dois sistemas podem ser explicadas principalmente pelo uso de modelos de laminação diferentes. Além disso, apesar dos dois sistemas usarem o mesmo método de otimização, os algoritmos para inicialização das tensões do modelo de laminação para o método de otimização são diferentes. No entanto, nota-se que a diferença entre as referências obtidas pelos dois sistemas é pequena. Uma análise mais precisa pode ser feita

	Espessura (mm)		Tensão (ton)		Vel. (m/min)		Potência (kW)		Força (ton)	
	MSU	COR	MSU	COR	MSU	COR	MSU	COR	MSU	COR
Zona D-1	3,010	3,010	2,7	2,7	258,8	255,6				
Cadeira 1							2229,8	2190,2	979	1002
Zona 1-2	2,016	2,047	22,8	23,9	395,8	375,9				
Cadeira 2							4475,7	4302,0	987	940
Zona 2-3	1,383	1,382	20,5	20,1	585,9	556,7				
Cadeira 3							4409,7	4287,2	892	854
Zona 3-4	0,984	0,974	18,4	17,6	816,6	789,6				
Cadeira 4							3652,2	3557,5	990	991
Zona 4-E	0,910	0,910	3,2	3,2	855,9	845,5				

Tabela 5.1: Referências obtidas para a bobina 89666 pelo *MilSetUp* e pelo *Corum*

comparando-se os resultados obtidos pelos dois sistemas para um número maior de bobinas, o que será feito no próximo item.

Para essa bobina, os resultados obtidos podem ser considerados aceitáveis. A diferença entre as espessuras e tensões nas zonas entre cadeiras calculadas pelos dois sistemas é pequena, o que significa que os valores ótimos diferiram menos que o limite de 10% acima ou abaixo dos valores iniciais, como suposto na fase de otimização. A potência e a velocidade calculada pelo *MillSetUp* é um pouco maior que a calculada pelo *Corum*, o que pode ser considerado positivo para maior aproveitamento da potência disponível e aumento da produtividade. A diferença entre as forças calculadas é aceitável, visto que poderiam variar até 40% acima ou abaixo dos valores considerados ideais para as três primeiras cadeiras e até 10% acima ou abaixo do valor desejado para a última cadeira.

5.2 Resultados para um conjunto de bobinas

Visando avaliar de maneira mais cabal os resultados produzidos pelo *MillSetUp*, foram coletados na base de dados do nível 2 os valores de referências para 20 bobinas escolhidas aleatoriamente durante uma semana de produção. O *MillSetUp* foi utilizado então para calcular as referências para essas mesmas bobinas. Os coeficientes de atrito e coeficiente da lei de limite de escoamento, que são calculados pela malha de adaptação do *Corum*, no *MillSetUp* foram usados valores para os quais, a malha de adaptação geralmente converge.

A tabela 5.2 mostra a diferença média entre as referências calculadas pelo *MillSetUp* e pelo *Corum*. As tensões entre a desenroladeira e a primeira cadeira e entre a última cadeira e a enroladeira não são otimizadas pois não fazem parte da função custo. As espessuras de entrada e de saída do processo são entradas para o cálculo das referências, sendo fixas, portanto. As espessuras e tensões, variáveis que formam os vértices do simplex usado na fase de otimização, apresentaram pequena diferença entre os valores obtidos pelos dois sistemas. Isso é razoável visto que foi suposto que as espessuras e tensões ótimas não poderiam diferir

	Espessura	Tensão	Velocidade	Potência	Força
Zona D-1	Fixa	Fixa	$7,33 \pm 7,39$		
Cadeira 1				$3,44 \pm 2,69$	$-5,26 \pm 4,75$
Zona 1-2	$-0,56 \pm 1,27$	$-0,60 \pm 6,75$	$8,87 \pm 6,74$		
Cadeira 2				$3,93 \pm 2,70$	$1,08 \pm 5,75$
Zona 2-3	$2,01 \pm 2,20$	$4,96 \pm 6,34$	$8,24 \pm 6,81$		
Cadeira 3				$3,90 \pm 3,41$	$0,65 \pm 6,90$
Zona 3-4	$2,42 \pm 1,07$	$5,25 \pm 8,25$	$6,60 \pm 6,42$		
Cadeira 4				$10,60 \pm 12,65$	$3,31 \pm 7,45$
Zona 4-E	Fixa	Fixa	$7,34 \pm 7,40$		

Tabela 5.2: Diferença percentual média entre as referências calculadas pelo *MillSetUp* e pelo *Corum* para 20 bobinas

mais de 10% dos valores calculados pela inicialização para garantia da qualidade e segurança do processo.

As potências obtidas pelo *MillSetUp* foram cerca de 3 a 4% superiores às obtidas pelo *Corum* para as três primeiras cadeiras e um pouco superior à 10% superior para a última cadeira. A potência é calculada de modo que ela seja a maior possível, não ultrapassando a potência máxima, a velocidade máxima do processo e a máxima corrente permitida para os motores. Como esses limites foram observados, a obtenção de potências maiores pelo *MillSetUp* deve-se às diferenças entre os modelos de torque usados nos dois sistemas.

O modelo de torque usado pelo *MillSetUp*, proposto por Bryant e Osborn [10], de acordo com simulações feitas pelos próprios autores apresenta somente 14% dos resultados com diferença inferior a 5% em relação ao modelo clássico de Ford, Ellis e Bland [11], Ford e Ellis [12] e Bland e Ford [13]. Além do modelo de torque usado pelo *Corum* ser o proposto pela teoria clássica, ele ainda considera perdas que são modeladas empiricamente e cujos coeficientes do modelo são calculados pela fase de adaptação, que o *MillSetUp* não conta.

Esses dois fatos fazem com que o torque calculado pelo *MillSetUp* seja menor que o calculado pelo *Corum*, podendo explicar a obtenção de potências e velocidades maiores. Por outro lado, potências e velocidades um pouco maiores proporcionam o uso mais efetivo da potência disponível e conseqüentemente, rendem uma maior produtividade. A prática operacional mostra que a velocidade atingida pelo laminador durante o processo é um pouco superior à calculada pelo *Corum* para poder alcançar a potência disponível, o que mostra que os resultados obtidos com o *MillSetUp* são bastante razoáveis.

As forças de laminação calculadas pelo *MillSetUp* foram inferiores às calculadas pelo *Corum* para a primeira cadeira e superior para as demais cadeiras. Embora a função custo não atingisse um valor muito elevado para uma variação de até 40% em torno do valor desejado para as três primeiras cadeiras, a diferença entre os valores obtidos pelos dois sistemas não foi significativa. Para força na

	Potência		Força		Tensão	
	MSU	COR	MSU	COR	MSU	COR
Cadeira 1	$-2,00 \pm 3,83$	$-5,28 \pm 2,58$	$-6,28 \pm 3,47$	$-0,84 \pm 6,22$		
Zona 1-2					$4,25 \pm 3,27$	$4,83 \pm 3,79$
Cadeira 2	$-1,77 \pm 3,86$	$-5,51 \pm 2,37$	$-6,29 \pm 4,51$	$-7,03 \pm 6,55$		
Zona 2-3					$4,94 \pm 2,43$	$1,25 \pm 5,12$
Cadeira 3	$-2,24 \pm 3,78$	$-5,90 \pm 2,85$	$-14,20 \pm 3,62$	$-14,37 \pm 6,97$		
Zona 3-4					$3,68 \pm 3,93$	$6,50 \pm 5,96$
Cadeira 4	$-5,36 \pm 6,31$	$-13,61 \pm 9,49$	$9,52 \pm 0,67$	$6,51 \pm 7,22$		

Tabela 5.3: Diferença percentual média entre as referências calculadas e as desejadas para 20 bobinas

última cadeira, a função custo cresce rapidamente a partir de 10% de variação em torno do valor desejado. A diferença entre os dois sistemas para força na quarta cadeira não foi grande, o que era esperado, pois a função custo é baixa para um intervalo menor de forças.

Na tabela 5.3 é apresentada a diferença média entre os valores das referências obtidas pelos dois sistemas e seus respectivos valores desejados. Como pode-se notar, ambos os modelos obtêm potências menores que os valores desejados, a máxima potência disponível nos motores de cada cadeira. O *Corum* obtém potências menores que o *MillSetUp* quando comparadas com os valores desejados, sobretudo na última cadeira, aproveitando menos a potência disponível e proporcionando uma menor produtividade.

Para força, ambos os sistemas obtêm valores menores que os desejados, com exceção da última cadeira, devido à imposição do valor desejado com o rápido aumento da função custo se a força se afastar desse valor mais que 10%. O *Corum* obtém valores de força mais próximos dos valores desejados na primeira e última cadeira. Nas cadeiras intermediárias o *MillSetUp* obtém referências para forças um pouco mais próximas dos valores desejados, embora a diferença entre os valores obtidos pelos dois sistemas seja bastante pequena. Os limites de variação de até 40% em torno da força desejada para as três primeiras cadeiras e de até 10% para a última cadeira foram respeitados com folga.

Finalmente, para tensão os dois sistemas obtêm referências um pouco acima dos valores desejados para as zonas 1-2 e 3-4. Na zona 2-3 o *Corum* apresenta valores de tensão um pouco mais próximas dos valores desejados que o *MillSetUp*. O mais importante é que o limite de variação de 10% em torno do valor desejado foi respeitado, o que contribui para evitar rompimentos ou afrouxamentos da tira.

5.3 Justificativa para os resultados

O *Corum* além de usar um modelo de laminação mais preciso, ainda conta com uma malha de adaptação, que recalcula os principais parâmetros dos modelos

processo de acordo com as condições reais do processo. Essas são as principais causas das diferenças entre os resultados obtidos pelos dois sistemas de geração de referências.

O modelo do processo usado pelo *Corum* se baseia no modelo clássico de laminação a frio. Apesar de desprezar a deformação elástica que é considerada no modelo clássico, o modelo usado pelo *Corum* inclui modelos de perdas por atrito no cálculo do torque, que foram consideradas mais significativas nesse processo.

Os modelos de força e torque usados pelo *Corum* exigem a resolução de integrais, o que demanda um esforço computacional maior que modelos compostos somente por equações algébricas, como é o caso do modelo de Bryant e Osborn [9, 10] usado no sistema de geração de referências desenvolvido. No cálculo das referências das 20 bobinas, apresentado no item anterior, o *Corum*, executado no DEC Alpha da Cosipa, gastou em média 12 segundos, enquanto o *MillSetUp* consumiu cerca de 3 segundos, em média, em um PC Windows Pentium II 500 MHz e cerca de 0,60 segundo em um PC Windows Pentium IV 2,0 GHz. Isso deixa claro que o sistema desenvolvido exige um esforço computacional menor, e que pode ser executado em um PC comum durante as situações emergenciais nas quais ele poderá substituir o *Corum*, com a rapidez que o ritmo de produção exige. A consulta a tabelas durante as situações emergenciais consome muito mais tempo, pois o operador precisa escolher uma tabela dentre muitas possíveis e geralmente, nenhuma delas reflete as condições reais de operação.

Um outro fato digno de nota é o número de iterações necessárias para atingir o ótimo pelos dois sistemas de geração de referências. O *Corum* necessitou em média de 234 iterações, enquanto o *MillSetUp* necessitou de um pouco menos: 214 iterações. Apesar de ambos os sistemas usarem o mesmo método de otimização, a inicialização das tensões é diferente para os dois sistemas. A inicialização do *MillSetUp* faz com que o simplex comece mais próximo do ótimo, exigindo um número de iterações menor. Também, nota-se que nas 20 bobinas estudadas, o *Corum* apresentou um custo final maior e, em alguns casos o método de otimização parou em mínimos locais. Isso não aconteceu nenhuma vez durante os testes

com o *MillSetUp*.

Evidentemente, como o *Corum* conta com um modelo de laminação mais preciso e robusto, espera-se que suas referências sejam mais confiáveis e mais fiéis ao processo. O *Corum* conta ainda com modelos de planicidade, cedagem e coroamento térmico que não foram incluídos no sistema desenvolvido. A prática operacional mostra que as referências calculadas pelo *Corum* são seguidas durante o processo sem grandes alterações e proporcionam uma elevada produtividade e qualidade. Espera-se que as referências obtidas pelo *MillSetUp* também proporcionem bons resultados, pois embora o modelo empregado seja mais simples, é um modelo consagrado, sendo citado em diversos trabalhos até hoje. Além disso, os modelos que não foram incluídos geram referências para malhas de importância menos crucial.

Considerando que o sistema de geração de referências desenvolvido será usado em situações emergenciais, uma pequena degradação das referências, como é o caso, é aceitável, visto que duram poucas horas por ano. Ainda assim, com esse sistema será possível obter referências otimizadas, mantendo um processo cuja produção rende cerca de US\$ 36.000,00 por hora, com maior segurança, confiabilidade e qualidade que o sistema alternativo de consulta a tabelas.

Capítulo 6

Conclusões

6.1 Considerações finais

Tendo em vista que o objetivo do sistema de geração de referências desenvolvido era substituir com vantagem o modo de operação emergencial de consulta a tabelas, pode-se afirmar que o objetivo foi plenamente atingido. O *MillSetUp* é muito mais rápido que o método de consulta a tabelas, sendo inclusive, mais rápido que o próprio sistema de geração de referências usado em condições normais de operação. Diferente do modo de consulta a tabelas, onde o operador precisa pesquisar uma tabela de referências para uma bobina com características similares à que se deseja processar, no sistema desenvolvido é possível entrar com todas as características desejadas, como espessura de entrada, de saída, largura e, inclusive, a força desejada na última cadeira. Essas vantagens certamente se refletirão numa maior qualidade do produto e produtividade do processo durante a operação emergencial.

Em relação ao sistema de geração de referências usado em condições normais de operação, o sistema desenvolvido apesar de apresentar resultados próximos, tem como principais desvantagens:

- Ausência de uma malha de adaptação na qual parâmetros de modelos como os de força, torque e limite de escoamento são recalculados de acordo com as condições reais do processo.

- Uso de um modelo do processo, que embora seja mais simples e demande menor esforço computacional, é menos preciso.
- Não ter modelos de planicidade, cedagem e coroamento térmico, que apesar de gerarem referências para algumas malhas de controle que podem ser negligenciadas durante a operação de emergência, não deixam de ser importantes para melhoria da qualidade do produto final.

Para os coeficientes de atrito e para a constante do modelo de limite de escoamento (equação (3.13), página 31), que são calculados pela adaptação, foram usados valores para os quais geralmente convergem, diminuindo a desvantagem da ausência da fase de adaptação. O uso de um modelo de laminação mais simples diminui o esforço computacional exigido, diminuindo o tempo de processamento e permitindo que o sistema desenvolvido possa ser executado em computadores domésticos, por exemplo. Essas desvantagens podem ser aceitas durante a operação de emergência em benefício da maior rapidez e eficiência na geração de referências, sobretudo quando comparado com o modo de consulta a tabelas.

Um outro emprego para o sistema de geração de referências desenvolvido é usá-lo para testar alterações na função custo e no método de otimização. Não é seguro fazer alterações no sistema de geração de referências usado em condições normais de operação sem antes testar. Como esse sistema é usado pelo nível 2 o tempo todo e não pode ser executado em outra máquina por questões de compatibilidade e de direito de propriedade, alterações na função custo e no método de otimização poderão ser testadas antes no sistema desenvolvido e depois implementadas no sistema já usado.

6.2 Futuras linhas de pesquisa

Diante dos resultados obtidos, podem ser vislumbrados os seguintes objetos de pesquisa futura capazes de aperfeiçoar o sistema desenvolvido e eliminar deficiências comentadas anteriormente:

- Incorporar uma malha de adaptação capaz de atualizar os valores de coeficientes de atrito e parâmetros dos modelos de torque e limite de escoamento, conforme descreve Bolon [6]. Essa malha de adaptação é composta por um modelo inverso que recalcula esses parâmetros de acordo com os valores medidos durante o processo e os atualiza fazendo uma média ponderada que atribui maior peso aos valores calculados mais recentemente.
- Conforme comentam Bryant e Osborn [9, 10], é possível recalcular os coeficientes dos modelos de força e torque por eles propostos de modo que minimize a diferença quadrática entre os resultados obtidos por esse modelo e pelo modelo clássico, que é usado com algumas modificações pela Cosipa. Esse recálculo poderia ser feito a partir das referências de um conjunto de bobinas obtidas pelo sistema usado em condições normais de operação.
- Incorporar modelos de planicidade, cedagem e coroamento térmico para gerar referências para as malhas de controle que não foram consideradas no sistema desenvolvido.
- Pesquisar outros métodos para minimização da função custo. Segundo Lagarias et al. [47], o método simplex é um método caro computacionalmente, sobretudo para funções de difícil avaliação, pois para cada iteração exige a avaliação da função custo em vários pontos. Sua vantagem é a função custo poder ser não linear e não ser necessário calcular sua derivada. Um método de minimização que exija menos cálculos e que tenha menor probabilidade de convergir em mínimos locais é altamente desejável.
- Aprimorar a função custo já utilizada, alterando seus coeficientes e expoentes de modo que proporcione resultados mais vantajosos relativos à qualidade do produto e à produtividade do processo. Também é possível incorporar à função custo uma parcela referente à forma da tira, como indica Wang et al. [4]. Para isso é necessário implementar primeiramente um modelo para planicidade da tira.

Referências Bibliográficas

- [1] BRYANT, G.F. (Ed.) **Automation of Tandem Mills**. London: The Iron and Steel Institute, 1973. 619p.
- [2] POLUKHIN, V.P. **Mathematical Simulation and Computer Analysis of Thin-Strip Rolling Mills**. Moskow: Mir Publishers, 1975. 544p.
- [3] OZSOY I.C.; RUDDLE G.E.; CRAWLEY, A.F. Optimum Scheduling of a Hot Rolling Process by Nonlinear Programming. **Canadian Metallurgical Quartely**, v.31, n.3, p.217-224, 1991.
- [4] WANG, D.D. et al. Toward a Heuristic Optimum Design of Rolling Schedules for Tandem Rolling Mills. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v.13, p.397-406, 2000.
- [5] MATHWORKS, Matlab, the Language of Technical Computing, Version 6.0. Natick, MA: The Mathworks, Inc., 2000.
- [6] BOLON, P.L. **CORUM Tandem Cold Mill Setup Model: Cosipa Implementation**. Cergy Le-Haut: Davy-Clecim, 1996. (Documento Interno K10671 da Cosipa).
- [7] EDWARDS, J.K. Automation of Cold Tandem Mills. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLAT ROLLING, Cardiff, 1978. **Proceedings**. p.112-130.
- [8] NELDER, J.A.; MEAD, R. A simplex method for function minimization. **Computer Journal**, v.7, p.308-313, 1965.

- [9] BRYANT, G.F.; OSBORN, R. Derivation and Assessment of Roll-Force Models. In: Bryant, G.F. (Ed.) **Automation of Tandem Mills**. London: The Iron and Steel Institute, 1973. p.245-278.
- [10] BRYANT, G.F.; OSBORN, R. Derivation and Assessment of Simplified Models for Torque, Slip and Neutral Angle. In: Bryant, G.F. (Ed.) **Automation of Tandem Mills**. London: The Iron and Steel Institute, 1973. p.279-306.
- [11] FORD, H.; ELLIS, F.; BLAND, D.R. Cold Rolling With Strip Tension, Part I: A New Approximate Method and a Comparison With Other Methods. **Journal of The Iron and Steel Institute**, v.168, p.57-72, 1951.
- [12] FORD, H.; ELLIS, F. Cold Rolling With Strip Tension, Part II: Comparison of Calculate and Experimental Results. **Journal of The Iron and Steel Institute**, v. 171, p.239-245, 1952.
- [13] BLAND, D.R.; FORD, H. Cold Rolling With Strip Tension, Part III: An Approximate Treatment of the Elastic Compression of the Strip in Rolling Mills. **Journal of the Iron and Steel Institute**, v.172, p.245-249, 1952.
- [14] ROBERTS, W.L. **Cold Rolling of Steel**. New York: Marcel Dekker, 1978. 800p.
- [15] OROWAN, E. The Calculation of Roll Pressure in Hot and Cold Flat Rolling. **Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers**, v.150, n.4, p.140-167, 1943.
- [16] BRYANT, G.F.; SPOONER, P.D. On-Line Adaptation of Tandem-Mill Schedules. In: Bryant, G.F. (Ed.) **Automation of Tandem Mills**. London: The Iron and Steel Institute, 1973. p.141-157.
- [17] DIXIT, U.S.; DIXIT, P.M. Application of Fuzzy Set Theory in the Scheduling of a Tandem Cold Rolling Mill. **ASME J. Manuf. Sci. Eng.**, v.122, n.494, 2000.
- [18] MISAKA, Y. Control Equations for Cold Tandem Mills. **Transactions ISIJ**, v.8, p.86-96, 1968.

- [19] SMITH, H.W. Dynamic Control of a Two-Stand Cold Mill. **Automatica**, v.5, p.183-190, 1969.
- [20] KING, W.D.; SILLS, R.M. New Approaches to Cold Mill Gauge Control. **Iron and Steel Engineer**, p.40-51, May, 1973.
- [21] BRYANT, G.F.; HIGHAM, J.D. A Method for Realizable Non-Interactive Control Design for a Five Stand Cold Rolling Mill. **Automatica**, v.9, p.453-466, 1973.
- [22] FIEBIG, E.; ZANDER, H. Automation of Tandem Cold-Rolling Mills. **Metallurgical Plant and Technology**, v.5, n.3, p.89-97, 1982.
- [23] TER MAAT, H.J. The Renovation and Automation of a Tandem Cold Rolling Mill. **Automatica**, v.18, n.2, p.63-69, 1982.
- [24] FISHER, H. et al. Revamp of Electrical Control System Improves Performance of Five-Stand Tandem Mill at Hoogovens. **Iron and Steel Engineer**, p.21-27, Oct., 1991.
- [25] CARLTON, A.J. et al. Automation of the LTV Steel Hennepin Tandem Cold Mill. **Iron and Steel Engineer**, p.17-28, Jun., 1992.
- [26] SEKIGUCHI, K. et al. The Advanced Set-Up and Control System for Do-fasco's Tandem Cold Mill. **IEEE transactions on Industry Applications**, v.8, n.3, p.608-616, 1996.
- [27] MICHETTI, P.C.; LEBRUN, J.C.; MAISONNEUVE, M. Integrated Automation Solution for 20-hi Reversing Cold Mills. **AISE Steel Technology**, p.47-53, Jul./Aug., 2000.
- [28] BILKHU, T.S. Dynamic Control of Tension, Thickness and Flatness for a Tandem Cold Mill. **AISE Steel Technology**, p.49-54, Oct., 2001.
- [29] SANTOS Fº, A.L. **Geração de Referências para os Controladores de um Laminador a Frio de Aços Planos: Uma Abordagem Conexio-**

- nista**. São Paulo, 2003. 142p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [30] JANSEN, M. et al. How Neural Networks are Proving Themselves in Rolling Mill Process Control. **Siemens Newsletter: Metals, Mining and More** (Electronic Edition). Jan., 1999.
- [31] BEAL, B. Rolling Mills Gauge Control Components (A White Paper). **Homepage de referência técnica da Companhia Pfeiffer Engineering**. Disponível em: <http://www.pfeiffereng.com/Gauge%20Control%20Components.PDF>. Acesso em 23 de jul. 2004.
- [32] BRYANT, G.F.; EDWARDS, W.J.; McCLURE, C.H. Cold Rolling Mill Control System Design Part 1: System description and Control Objectives. In: Bryant, G.F. (Ed.) **Automation of Tandem Mills**. London: The Iron and Steel Institute, 1973. p.1-29.
- [33] PIRES, C.T.A. **Modelagem e Controle de Espessura em um Laminador de Tiras a Frio**. São Paulo, 1989. 122p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [34] SOUZA E SILVA, A.V. Automação de Linhas de Laminação. In: Ferraz, J.O. (Ed.) **Laminação dos Aços**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1975. p.II.2.1-II.2.54.
- [35] D'AMICO, F.; ANGELA, P.; PACKIAM, J. Highly Integrated Automation System for the New Ipsco Mini Mill. **Iron and Steel Engineer**, p.27-31, Aug., 1999.
- [36] WILLIAMS, T.J. (Ed.) **A Reference Model for Computer Integrated Manufacturing**. North Carolina: The Instrumentation, Systems and Automation Society, 1989. 229p.
- [37] REDDY, N.V.; SURYANARAYANA, G. A Set-Up Model for Tandem Cold Rolling Mills. **Journal of Materials Processing Technology**, n.116, p.269-277, 2001.

- [38] GUO, R.M. Analysus of Dynamic Behaviors of Tandem Cold Mills Using Generalized Dynamics and Control Equations. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v.36, n.3, p.842-853, 2000.
- [39] SARKIS, E. **Cosipa Four Stand TCM Revamping: Detailed Functional Specification Automatic Gauge Control Front End**. Cergy Le-Haut: Davy-Clecim, 1997. (Documento Interno K10650 da Cosipa).
- [40] LI, G.Y.; LAGERGREN, J. Evaluation on Some Important Force for Cold Strip Rolling. **Steel Research**, v.71, n.11, p.449-459, 2000.
- [41] GUO, R.M. Application of PC and LAN for a Level 2 Setup Model of a Single Stand Reversing Mill. **Iron and Steel Engineer**, p.41-46, Aug., 1997.
- [42] PIRES, C.T.A. et al. Otimização de Presets para Laminadores a Frio - Estudo de um Caso. In: VIII Seminário de Automação de Processos, Belo Horizonte, 2004. **Anais**. São Paulo: ABM, 2004.
- [43] BRYANT, G.F.; HALLIDAY, J.M.; SPOONER, P.D. Optimal Scheduling of a Tandem Cold Mill. In: Bryant, G.F. (Ed.) **Automation of Tandem Mills**. London: The Iron and Steel Institute, 1973. p.107-122.
- [44] WALTERS, F.H. et al. **Sequential Simplex Optimization**. Boca Raton: CRC Press, 1991. 325p.
- [45] SPENDLEY, W.; HEXT, G.R.; HIMSWORTH, F.R. Sequential Application of Simplex Designs in Optimization and Evolutionary Operation. **Technometrics**, v.4, n.4, p.441-461, 1961.
- [46] PRESS, W.H. et al. **Numerical Recipes in C**, Cambridge: Cambridge University Press, 1988.
- [47] LAGARIAS, J.C. et al. Convergence Properties of the Nelder Mead Simplex Algorithm in Low Dimensions. **SIAM Journal of Optimization**, v. 9, p.112-147, 1998.