APLICAÇÃO DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL NA DETERMINAÇÃO DA FORÇA DE LAMINAÇÃO

Marlon Rosa de Gouvêa
Açominas Gerais S. A., doutorando UFMG - mgouvea@acominas.com.br
Douglas Rodrigues de Oliveira
Açominas Gerais S. A., mestrando INPE- droliveira@acominas.com.br
Walmir Matos Caminhas
Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Dr. - caminhas@cpdee.ufmg.br
Antônio de Pádua Braga
Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Dr. - apbraga@cpdee.ufmg.br
Benjamim Rodrigues de Menezes
Universidade Federal de Minas Gerais, Dr. – UFMG

RESUMO

Dentro do processo de laminação, a força de laminação é uma variável de grande importância, já que está diretamente relacionada aos esforços sobre os cilindros e ao próprio sistema de controle destes equipamentos, principalmente quando a configuração dos laminadores é em cascata. Normalmente, a força de laminação é medida através de células de cargas, conectadas a dispositivos eletrônicos. Como trata-se de um equipamento sujeito a adversidades relativas ao próprio ambiente de instalação e ao processo em si, o índice de falhas nestes dispositivos de medição, principalmente devido a rompimento de condutores, é alto. Desta forma, o principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de estudos para a determinação da força de laminação no laminador desbastador da planta de Perfis Estruturais da Açominas, utilizando-se grandezas relacionadas ao sistema de acionamento elétrico, tendo como base as teorias dos sistemas nebulosos e redes neurais artificiais. Todo o estudo é desenvolvido com base em simulações digitais.

Palavras chaves — Laminadores, Força de Laminação, Inteligência Computacional.

ABSTRACT

In the rolling process, the rolling force is a important variable. It is directly related with forces over the rolls and the control systems, mainly when the mills are in tandem configuration. Normally, the rolling force is measured by load cells connected to electronics devices. These systems working in hard environment and faults like broken cables, are frequent. Thus, this work develops studies to determine the rolling force in Açominas Structural Section Rolling Mill, using electrical variables from drive systems, based in fuzzy logic and neural networks. All study was done using digital simulations.

Keys words — Rolling mill, rolling force, computing intelligence.

1 . INTRODUÇÃO

A laminação se constitui basicamente num processo de conformação mecânica, onde o objetivo é a redução da seção do produto a ser laminado a dimensões e formas preestabelecidas. Normalmente são necessários vários ciclos de redução, ditos passes, até se obter a dimensão e a forma final do produto. Isto é válido tanto para a laminação a frio, quanto para a laminação a quente. A figura 1 apresenta um diagrama esquemático da laminação de um produto de seção retangular.

No caso específico deste trabalho, todas as considerações e estudo em relação aos esforços de laminação têm como base o laminador desbastador da planta de Perfis Estruturais da Açominas. Este laminador é responsável pela transformação de um produto de seção retangular em um produto intermediário em relação à forma final do perfil, conhecido como *beam blank*, ou "osso de cachorro". Para a obtenção do *beam blank*, a partir do laminador desbastador, são necessários em média, 15 passes. A figura 2 apresenta a seção retangular de um bloco antes do processo de laminação e a seção final do mesmo após 13 passes no laminador em questão.

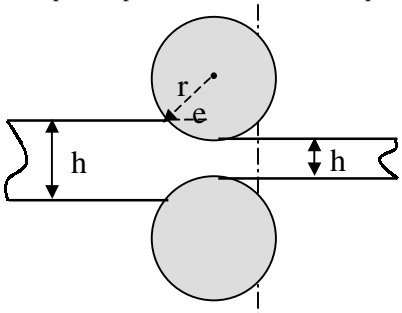

Figura 1 – Diagrama esquemático de um passe de laminação

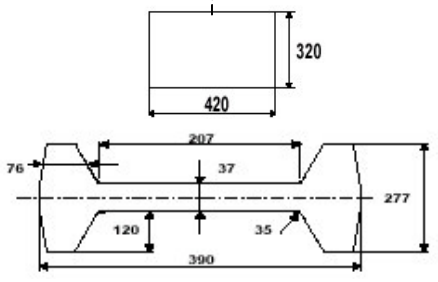

Figura 2 – Seções inicial e final de um bloco laminado no laminador desbastador da planta de Perfis Estruturais da Açominas

A força de laminação depende de diversos fatores, tais como a temperatura do material, o valor da redução do passe, o atrito entre o material e os cilindros, a velocidade de laminação, a composição química do aço, a geometria dos canais dos cilindros, a área de contato entre o material e os cilindros, entre outros [1]. Assim, a determinação desta grandeza sem a utilização de dispositivos específicos de medição, tais como células de cargas, é uma tarefa relativamente difícil.

Uma das características das áreas de conhecimento que compõem o campo da inteligência computacional, tais como as redes neurais e os sistemas nebulosos, está relacionada à capacidade de se obter soluções de problemas complicados sem a necessidade do desenvolvimento de modelos matemáticos, que muitas vezes são de difícil obtenção [6, 7, 8, 9, 10]. Associado a isto, tem-se ainda a capacidade destes sistemas em trabalhar com informações imprecisas, que muitas vezes são inerentes à problemas complexos, como é o caso da determinação da força de laminação sem a utilização de células de carga.

O ponto de partida para a utilização de redes neurais e redes neuro-fuzzy é a disponibilidade de dados para treinamento, preferencialmente com padrões de entradas e saídas desejadas, de forma a se utilizar algoritmos de treinamento supervisionado [9]. No caso, são utilizados dados teóricos obtidos a partir de escalas de passes fornecidas pelo fabricante do laminador, de onde se obtém o conjugado de carga e a própria força de laminação por passe. Estes dados são utilizados tanto para treinamento, quanto para validação do sistema. Também utilizam-se os dados relativos ao conjugado de laminação como entrada do programa de simulação do acionamento elétrico.

Deve-se observar que, normalmente, associa-se o termo neuro-fuzzy à sistemas onde uma rede neural determina as funções de pertinência ou base de regras nebulosas, ou ainda quando se tem um sistema nebuloso implementado por uma rede neural [10]. Entretanto, o termo neuro-fuzzy também será utilizado neste trabalho em relação a estrutura desenvolvida para a determinação da força de laminação.

2 . CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS PARA O CÁLCULO DA FORÇA DE LAMINAÇÃO

Como mencionado, a determinação da força de laminação através de cálculos matemáticos é uma tarefa relativamente difícil, uma vez que envolve diversas variáveis que em muitos casos se apresentam não lineares. Esta força, que é a força necessária para se produzir deformações nos materiais laminados, pode ser determinada de uma forma simplificada pelas equações 1 e 2.

$$F = k_w e b_m \qquad (1)$$

onde:

F	*Força de laminação*
k_w	*Tensão de escoamento médio*
e	*Projeção do arco de contato entre o cilindro e o material laminado*
b_m	*Largura média do material laminado*

$$e = \sqrt{r\,\Delta H} \qquad (2)$$

onde:

e	*arco de contato entre o cilindro e o material laminado*
r	*Raio de trabalho do cilindro de laminação*
ΔH	*Diferença entre as seções de entrada e saída do material laminado:* $h_1 - h_2$

Na prática são introduzidos coeficientes na equação 1 que atuam modificando a tensão de escoamento, o arco de contato e a própria largura média do material laminado [1].

A utilização destes coeficientes de correção na equação 1 introduz um certo empirismo na determinação da força de laminação, sendo que em muitos casos, suas magnitudes são função da composição química do material, tipo de laminação, tipos de cilindros, temperatura do material, etc. [1]. Além disto, a própria tensão de escoamento não é uma grandeza facilmente obtida, tornando mais complexo ainda, a determinação da força de laminação com base na equação 1 e suas derivantes [2].

Uma outra forma de se obter a força de laminação é através do conjugado desenvolvido pelo sistema de acionamento.

Sabe-se que a força exercida pelo cilindro para a deformação do material durante o processo de laminação impõe um conjugado ao sistema de acionamento. Com base na curva de pressão sobre o cilindro, conhecida como colina de atrito [2], e no centro de gravidade desta curva, obtém-se o braço de alavanca no qual a força de laminação é aplicada para a geração do conjugado em questão. Assim, de posse deste conjugado de laminação, obtém-se a força de laminação desejada.

Porém na prática, existem algumas dificuldades para a determinação da relação entre estas grandezas e o conjugado de laminação. Os sucessivos passes durante a laminação do *beam blank* e do próprio perfil nos laminadores subsequentes (grupo tandem), carregam consigo alterações na geometria do material, diferentemente da laminação de planos, onde a seção do bloco é sempre retangular. Isto introduz uma variante a mais no processo, onde cada passe apresenta características diferentes em relação a área de contato do material com o cilindro. A literatura propõe a utilização de seções retangulares equivalentes para solução deste problema, quando da utilização de modelos matemáticos [1, 2].

Além disto, a dificuldade de se obter o conjugado de laminação a partir do conjugado total do acionamento deve ser considerada, uma vez que este último é composto pelo somatório de diversos conjugados, como pode ser observado através da equação 3.

$$T = T_L + J\frac{dw}{dt} + b_o w + T_a \qquad (3)$$

onde:

T	*Conjugado total desenvolvido pelo acionamento*
T_L	*Conjugado de laminação*
J	*Momento de inércia total do sistema de acionamento*
w	*Velocidade angular do motor*
b_o	*Coeficiente de atrito do sistema*
T_a	*Conjugado adicional relativo à atritos nos mancais e elementos de transmissão do acionamento.*

Na equação 3, o segundo elemento é o conjugado desenvolvido pelo sistema de acionamento durante acelerações e desacelerações, sendo que o sinal deste termo se inverte no caso de desacelerações. O terceiro termo diz respeito ao conjugado necessário para se vencer as forças de atrito quando não se tem material no laminador. Por fim, o último termo representa as forças necessárias para se vencer os atritos nos mancais e demais elementos de transmissão durante a laminação de produtos.

Através de variáveis disponíveis no sistema de acionamento, pode-se obter o conjugado eletromagnético desenvolvido pelo motor. Deve ser salientado que o conjugado disponível na ponta de eixo do motor é

o conjugado eletromagnético a menos das perdas no próprio motor. Para o laminador em questão, que é acionado por um motor de corrente contínua com excitação independente, tem-se a seguinte expressão para a determinação deste conjugado[3, 4, 5]:

$$T_e = k_m i_f i_a \qquad (4)$$

onde:

T_e	*Conjugado eletromagnético do motor*
k_m	*Constante relativa aos parâmetros construtivos do motor*
i_f	*Corrente de campo do motor*
i_a	*Corrente de armadura do motor*

Como grande parte dos dados relativos às equações 3 e 4 podem ser obtidos a partir do sistema de controle do acionamento elétrico, tais como *J, w, k_m, i_f, e i_a*, e sabendo-se que existe uma relação direta entre o conjugado de laminação e a força de laminação [1, 2], torna-se atrativo o desenvolvimento de um sistema que estime o conjugado de carga do acionamento e que, através de um processo de aprendizagem baseado em inteligência computacional, determine as forças no cilindro para cada passe de laminação. A introdução de técnicas de inteligência computacional visa a não utilização de modelos matemáticos complexos, uma vez que estes dependem de fatores que variam em função do tipo de material laminado, diâmetro dos cilindros de laminação, área de contado entre cilindros e material, entre outros.

3. CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA

A estrutura desenvolvida neste trabalho para a determinação do esforço de laminação tem como base a teoria dos sistemas nebulosos e redes neurais [5, 7, 8, 9]. Tais sistemas apresentam-se como ferramentas convenientes para a solução de problemas caracterizados por incertezas e informações vagas. A rapidez no desenvolvimento, além da facilidade e o baixo custo de implementação são algumas das características destes sistemas. Em contra partida, a solução apresentada pelos mesmos para um determinado problema é geralmente, uma aproximação da real solução deste problema [5].

.

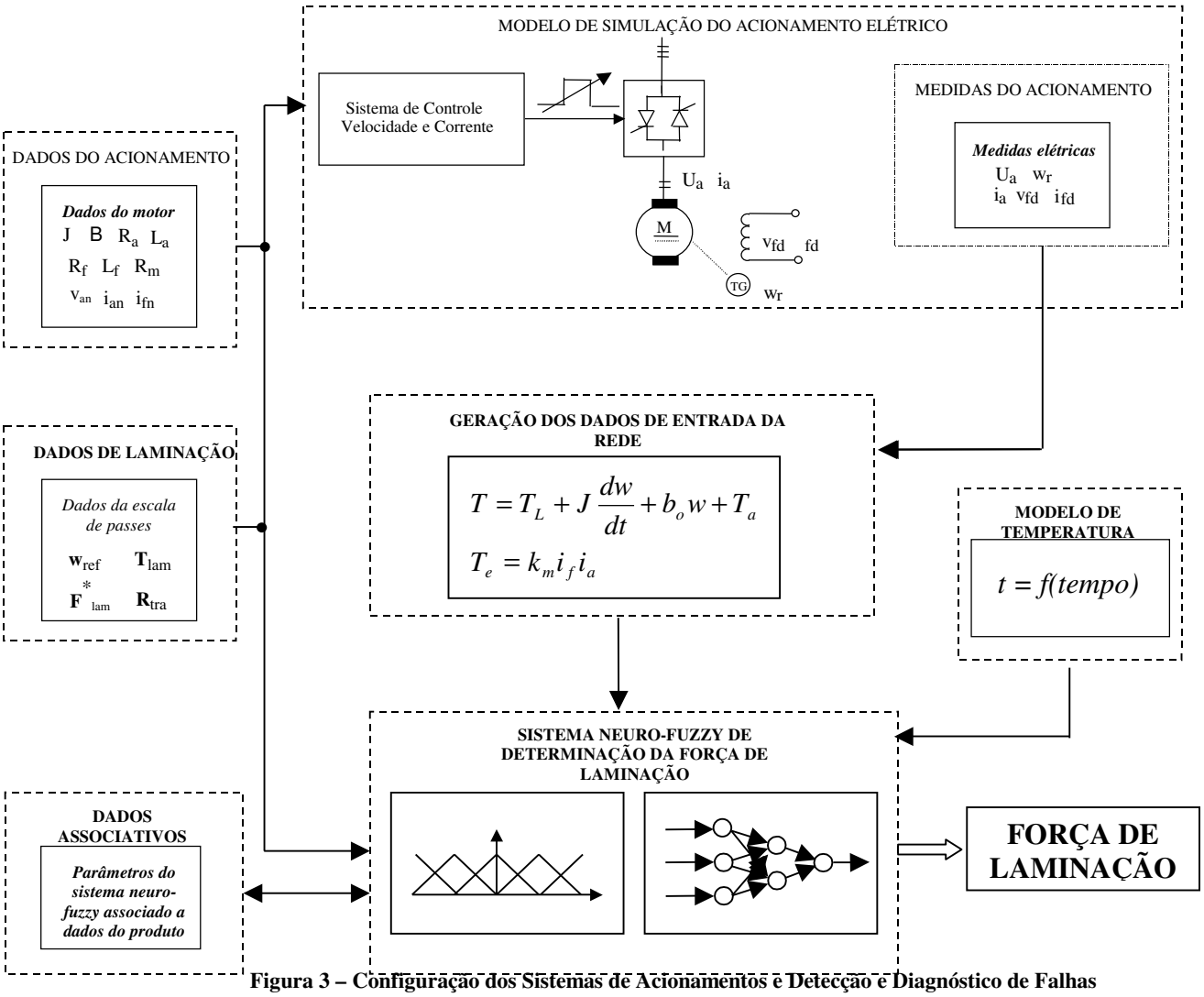

Figura 3 – Configuração dos Sistemas de Acionamentos e Detecção e Diagnóstico de Falhas

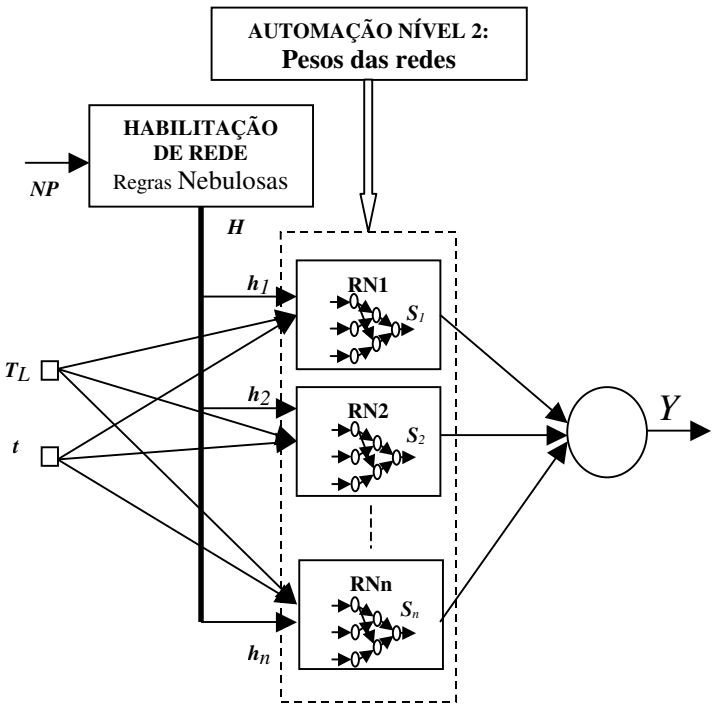

Figura 4: Estrutura da rede neuro-fuzzy utilizada

$$Y = \sum_{j=1}^{n} S_j * h_i \qquad (5)$$

$$h_i = \begin{cases} 1 & \text{se} \quad p = i \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \qquad (6)$$

$$S_j = f(T_L, t) \qquad (7)$$

onde:

S_j	Saída da rede neural j
h_i	Habilitação da rede neural i
Y	Saída do sistema: Força de laminação
T_L	Conjugado de laminação
t	*Temperatura do material*
p	*Número do passe corrente*

A figura 3 apresenta a configuração básica do sistema neuro-fuzzy utilizado neste trabalho para a estimação da força de laminação. O bloco Modelo de Simulação do Acionamento Elétrico representa o programa utilizado para simulação do acionamento, tendo-se obtido resultados bem próximos do real em relação ao mesmo. Este bloco é a fonte básica de diversas grandezas utilizadas direta ou indiretamente para a determinação da força de laminação. Como entradas do referido bloco, tem-se os dados do acionamento, relativos à parâmetros elétricos e mecânicos. Tem-se ainda dados de laminação, como velocidade de referência e conjugado de carga teórico. O subloco Medidas do Acionamento fornece ao bloco Geração de Entradas para Rede, grandezas oriundas do sistema de acionamento, tais como, velocidade, aceleração e correntes.

Cabe aqui salientar a metodologia empregada neste trabalho. Além das referências de velocidade de cada passe, é fornecido o conjugado de carga teórico para o programa de simulação do sistema de acionamento, de forma a simular a carga no eixo do motor durante a operação de laminação. Assim, é de se esperar que as grandezas obtidas desta simulação sejam reflexos do próprio conjugado de carga. Estas grandezas são utilizadas para o cálculo do conjugado de carga "real", sendo este uma das entradas do sistema neuro-fuzzy responsável pela determinação da força de laminação. O bloco Dados Associativos fornece ao sistema informações relativas aos pesos da rede e passe corrente, para cada escala de passe. Outra entrada fornecida é a temperatura do material na entrada de cada passe de laminação.

Finalmente, o bloco Sistema Neuro-fuzzy de Determinação da Força de Laminação, determina tal força a partir do conjugado de carga e da temperatura do material. Como a relação entre conjugado e força de laminação varia em função do passe para cada escala de passes (cada tipo de produto possui sua própria escala de passes), criou-se um sistema de regras nebulosas que em função do número do passe de laminação, seleciona a rede neural relativa ao passe corrente (figura 4). Assim, tem-se n redes neurais, onde n é o número máximo de passes, e a saída deste sistema é o somatório das saídas das n redes, sendo que apenas uma estará ativa a cada momento. As equações 5, 6 e 7 formalizam esta estrutura

3.1. Tipos de redes utilizadas

Em função da planta de Laminação de Perfis Estruturais da Açominas se encontrar em fase de montagem e comissionamento quando do desenvolvimento deste trabalho, optou-se pelo estudo de dois tipos de relações entre as grandezas de entrada do sistema neuro-fuzzy e a força de laminação. No primeiro caso, tem-se uma relação linear entre o conjugado de carga e a força de laminação, para cada passe, sendo utilizadas redes do tipo adaline [8, 9]. Parte-se do pressuposto de que variações na temperatura terão efeitos significativos apenas em relação ao próprio conjugado de carga. O efeito da temperatura na variação da área de contato entre o material e os cilindros de laminação para um mesmo passe é desprezada.

No segundo caso, além do efeito da temperatura sobre o conjugado de laminação, considera-se o seu efeito na variação da área de contato entre o material e o cilindro. Para tanto, foi determinada uma relação de não linearidade entre a força de laminação e as variáveis de entrada do sistema neuro-fuzzy, sendo esta relação apresentada pelas equação 7. Deve-se salientar que assim como a força de laminação, k1 e k2 variam para cada passe dentro de uma mesma escala de passes.

$$F = k_1 T_L + k_2 \left(\frac{1250}{t} - 1 \right) \qquad (7)$$

onde:

F	força de laminação
T_L	conjugado de laminação
K_1 *e* k_2	constantes
t	temperatura em °C

Em relação a estrutura do sistema, foram utilizadas redes neuro-anfis e mlp [8, 9, 11], uma vez que redes do tipo adaline são utilizados para solução de problemas onde existe linearidade entre as variáveis envolvidas [9], que não é o caso.

O treinamento do sistema neuro-fuzzy teve como base dados teóricos obtidos de escalas de passes. Como para cada uma destas escalas, tem-se apenas um par de valores de conjugado e força de laminação por passe, além da temperatura de entrada do material, utilizou-se o artifício da criação de dados aleatórios a partir de tais valores.

Outro ponto importante é que o treinamento deve ser feito para cada tipo de material a ser laminado, ou seja, para cada escala de passes, com cada rede do sistema sendo treinada individualmente.

4. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Os resultados apresentados nesta seção representam a fase de validação do sistema, tanto para a estrutura neuro-fuzzy baseada em redes adaline, quanto baseada em redes neuro-anfis e mlp. Para tal, utiliza-se uma escala de passes composta por treze passes, que aplicada ao programa de simulação do acionamento elétrico, gera as entradas para o sistema de determinação da força de laminação. Obviamente, o treinamento das redes neurais tem como base esta mesma escala de passes.

Basicamente, a velocidade de laminação de cada passe juntamente com o conjugado de laminação teórico são utilizados como entrada do programa de simulação do acionamento. Para não se estender em demasia o tempo de simulação para os treze passes, considerou-se uma permanência do material dentro do laminador, incluindo os períodos de aceleração e desaceleração, de aproximadamente três segundos. É claro que em uma situação real este tempo é maior, sendo o mesmo função da própria velocidade do material, do seu comprimento e da redução sofrida.

4.1. Estrutura neuro-fuzzy baseada em redes adaline

Neste item são apresentados os resultados obtidos na determinação da força de laminação, tendo o sistema neuro-fuzzy, redes do tipo adaline como elementos básicos.

A força de laminação obtida a partir do sistema neuro-fuzzy é apresentada pela figura 5 juntamente com a força desejada. Percebe-se uma boa aproximação obtida pelo sistema. A figura 6 apresenta em detalhe a força de laminação fornecida pelo sistema.

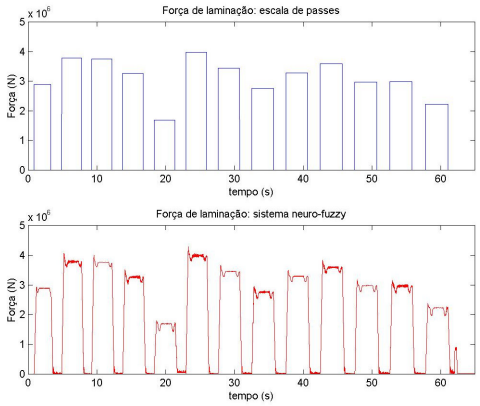

Figura 5: Forças de laminação: desejada e obtida do sistema neuro-fuzzy

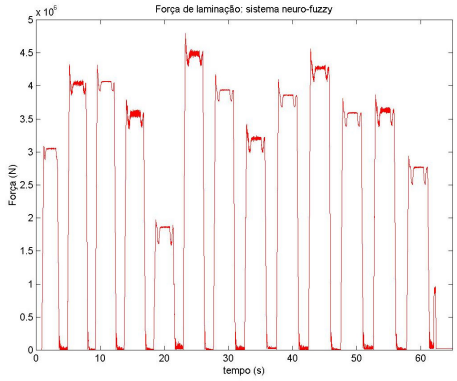

Figura 6: Força de laminação fornecida pela sistema tendo como base redes adaline

4.2. Estrutura neuro-fuzzy baseada em redes neuro-anfis e mlp

Para este caso, foram utilizados como entradas das redes neuro-anfis e mlp, o conjugado de laminação e a temperatura do material no início de cada passe de laminação. Para a rede neuro-anfis, tem-se uma estrutura com 5 nodos por rede. Já em relação à mlp, utilizou-se redes com uma camada escondida, sendo esta composta por 3 nodos.

Como mencionado, foram gerados aleatoriamente padrões de treinamento da rede, sendo que a variação da temperatura do primeiro passe se restringiu a faixa de 1250 à 1100 °C. A partir deste valor, a cada passe houve um decréscimo de temperatura a fim de se aproximar da situação real de laminação.

Os resultados obtidos tendo como base redes neuro-anfis são apresentados pelas figuras 7 e 8. A figura 7 apresenta as entradas do sistema. Pela figura 8 pode-se observar além das entradas, a saída desejada e o valor da força de laminação fornecida pelo sistema. Pode-se perceber também para este caso, que os resultados obtidos são bastante satisfatórios. Deve-se salientar que a abrupta queda da temperatura é função da simulação, que terminado o passe final, torna todas as variáveis iguais a zero.

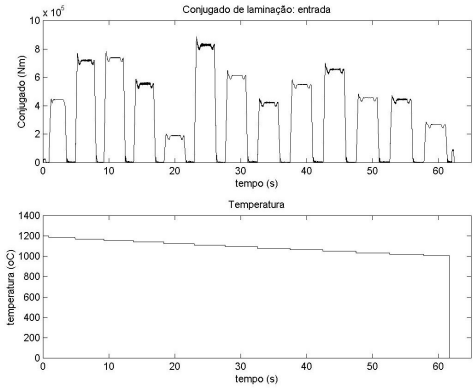

Figura 7 – Conjugado e temperatura

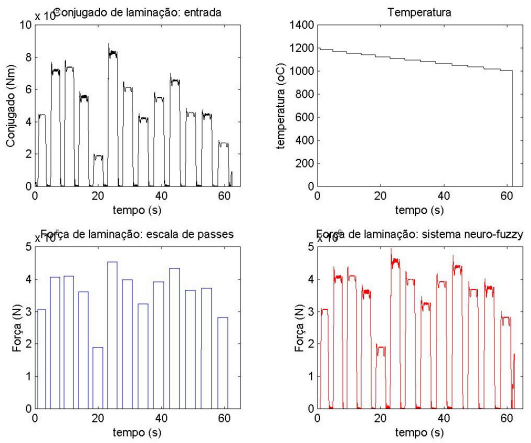

Figura 8 – Rede neuro-anfis: Conjugado de laminação, temperatura do material, força de laminação desejada e força de laminação obtida

As figuras 9 e 10 apresentam os resultados obtidos quando da utilização de redes mlp como base da estrutura do sistema neuro-fuzzy de determinação da força de laminação. Percebe-se também bons resultados para este tipo de rede neural.

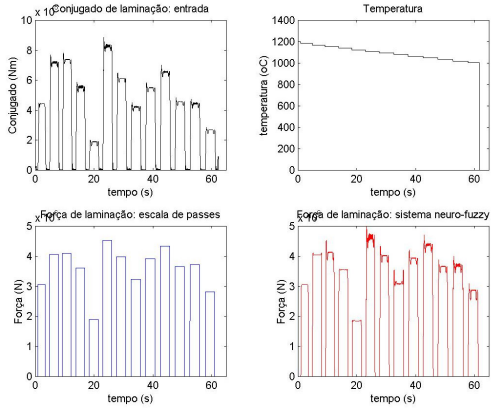

Figura 9 – Rede mlp: Conjugado de laminação, temperatura do material, força de laminação desejada e força de laminação obtida

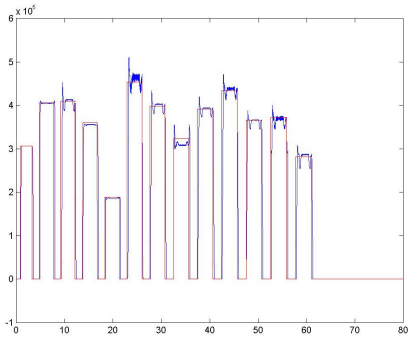

Figura 10 - Rede mlp: Força de laminação fornecida pelo sistema tendo como base nas redes neuro-anfis

5. CONCLUSÃO

A estrutura neuro-fuzzy proposta neste trabalho se mostrou como uma alternativa atrativa para a determinação da força de laminação em laminadores de não planos, tendo como base grandezas facilmente obtidas a partir dos sistemas de acionamentos e de automação.

Assim, este trabalho se apresenta como um ponto de partida para a implementação prática de um sistema com a estrutura proposta. Esta implementação implica necessariamente na validação desta estrutura a partir de dados reais da planta, idealmente obtidos a partir de um sistema de medição de esforços.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Garcia, F. P.; Lisboa, R. M; *Nova Metodologia de Cálculo da Força de Laminação, e sua Aplicação na Determinação dos Esforços Admissíveis nos Cilindros,* Açominas, julho de 1996.

[2] Lisboa, R. M.; *Força, Torque e Potência na Laminação,* Açominas, agosto de 1991.

[3] Bose, B. K., *Power Eletronics and AC Drives,* Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, 1986.

[4] Leonhard, P. C., *Control of Electrical Drives,* Springer-Verlag/ 85.

[5] Fitizgerald, A. E., Kingsley, Jr. C., Kusko, Alexander, *Máquinas Elétricas,* McGraw-Hil, 1975.

[6] Chen, Chi-Tsong (1970) – *"Linear System Theory and Design"* – Holt, Rinehaqrt and Winston (HRW), Nova York, USA.

[7] L A Zaded. *Fuzzy Sets*. Information e Control, 8:338-353, 1965.

[8] J. S. R.Jang, C. T. Sun, E. Mizutani. *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*. Prentice Hall, 1997.

[9] Braga, A. P.; Ludermir, T. B.; Carvalho, A. C. P. L. F, *Redes Neurais Artificiais – Teoria e aplicações*, Editora LTC –Stem Seals, Int. J. Mach Tools Manufact, vol 35 (8), pp 1115-1124, 1994

[10] Nauck, D.; Klawonn, F.; Kruse, R., *Funations of Neuro-Fuzzy Systems*, John Wiley & Sons Ltd.1997.

[11] A. Gleison F. V; C, Walmir M.*; Implementação de uma nova proposta de Inferência Neuro-nebulosa. Trabalho final da disciplina Introdução à Engenharia Computacional*. UFMG, setembro de 2000.