

Aplicação de redes neurais artificiais no monitoramento de parâmetros do processo de retificação cilíndrica

Thiago Valle França (Unesp-Bauru) thiagovf@feb.unesp.br
Gustavo de Oliveira Castelhana (Unesp-Bauru) gcastelhana@feb.unesp.br
Eduardo Carlos Bianchi (Unesp-Bauru) bianchi@feb.unesp.br
Paulo Roberto de Aguiar (Unesp-Bauru) aguiarpr@feb.unesp.br

Resumo

A retificação é um processo de fabricação que gera uma grande quantidade de calor, pois possui múltiplas arestas de corte atuando ao mesmo tempo na peça, provocando assim, o aumento de temperatura. Altas temperaturas podem trazer uma variedade de problemas relacionados à qualidade do material, dentre eles: queima da superfície, aparecimento de defeitos estruturais e conseqüentemente redução da vida útil. As redes neurais artificiais são utilizadas para capturar características gerais entre variáveis de um sistema que são difíceis de relacionar analiticamente. Têm a capacidade de aprendizado ou de serem treinadas para determinadas tarefas, além da habilidade de formular abstrações e generalizações. Características como estas podem ser extremamente úteis para a predição de parâmetros de retificação, como: o tempo de queima, que é o tempo necessário para que ocorra a queima superficial da peça durante o processo de corte. Portanto, neste trabalho, uma rede neural artificial foi treinada para estimar o tempo de queima e assim servir de parâmetro para o controle das condições de usinagem. Este procedimento demonstrou ser de boa precisão, podendo ser utilizado como um instrumento de controle do processo.

Palavras-chave: Retificação; Redes Neurais Artificiais; Tempo de queima.

1. Introdução

A Retificação é um processo de produção envolvendo um alto grau de energia que é utilizada vastamente na manufatura de componentes que requerem tolerância e grau de rugosidade bem apurados. Necessariamente toda energia gasta no processo de retificação é convertida em calor estando toda concentrada dentro da zona de usinagem, deste modo transferindo a maior temperatura para a região em serviço. Altas temperaturas podem trazer uma variedade de problemas relacionados à qualidade do material, dentre eles: queima da superfície, aparecimento de defeitos estruturais e conseqüentemente redução da vida útil.

Qualidade superficial esta inteiramente relacionada com o processo de retificação livre de queima, a qual impõe uma limitação nas diversas variáveis do processo, conseqüentemente proporcionando um baixo rendimento no método de usinagem. Para otimizarmos a relação entre qualidade e eficiência é necessário implementar uma técnica que revele o fenômeno no processo. Desta maneira, a retificação pode ser realizada com um método de manipulação de parâmetros para obtenção de um alto índice de eficiência e ao mesmo tempo controlar a queima. Para isso é necessário um estudo do comportamento de determinadas variáveis do processo com relação à ocorrência da queima, de forma a se obter uma técnica eficaz para o monitoramento e ou controle do fenômeno.

Este trabalho visa investigar a ocorrência da queima no processo de retificação cilíndrica externa através de um banco de dados obtido experimentalmente, e em seguida, implementar uma rede neural artificial, a fim de se prever o momento da queima.

2. Integridade superficial da peça de trabalho

Um dos tipos mais comuns de danos térmicos no processo de retificação é a queima da peça. Quando a queima superficial da peça se inicia, existe uma tendência do crescimento da adesão de partículas metálicas nos grãos abrasivos do rebolo, tendo como consequência o aumento das forças de retificação. Este aumento de forças provoca a deterioração da qualidade superficial da peça, podendo levar ao aumento da perda diametral do rebolo, fazendo com que seu desgaste volumétrico aumente. Segundo Malkin (1989), a queima superficial da peça influencia na alteração da microestrutura do material retificado.

Segundo Badger (2000) são encontrados os seguintes danos térmicos:

- *A queima de oxidação*: Causada por uma fina camada superficial de metal oxidado e refrigerante, causa descoloração na peça-obra. Esta descoloração é normalmente superficial e ocorre normalmente sem as peças sofrerem algum dano metalúrgico. A queima de oxidação pode ser vista sobre uma superfície retificada e/ou próximo à região de retificação onde as temperaturas são altas devido a condução. A queima de oxidação é um mau indicador da ocorrência do dano térmico pela sua imprevisibilidade.
- *O Amolecimento térmico*: Ocorre quando a temperatura de retificação excede a temperatura de têmpera do material da peça-obra. Isto causa o amolecimento da superfície da peça-obra.
- *A queima de reendurecimento*: É causada pela mudança da fase metalúrgica do material quando a temperatura de retificação excede a temperatura de austenitização, criando uma fina camada de martensita não revenida, dura e frágil. Para exacerbar mais o problema, a queima de reendurecimento é também acompanhada por uma tensão residual secundária, por que o novo material formado tem uma densidade maior que o material original.
- *A tensão residual de tração*: É causada pela expansão térmica da peça-obra além de sua tensão limite elástica, o que coloca o material próximo à superfície sobre uma constante tensão. Esta tensão degrada a resistência à fadiga do material, e em casos extremos causa imediata fratura. A profundidade e severidade da fissura dependem da temperatura de retificação e do material.

Shafto (1975) postulou que o aumento rápido na temperatura é característica de um fenômeno conhecido como *burn-out*, o qual ocorre em tubos de ebulição. Para uma temperatura crítica, referente à temperatura de *burn-out*, existe um colapso no mecanismo de transferência de calor, o qual resulta num rápido crescimento da temperatura. Quando a temperatura atinge valores por volta de 100 °C, a água contida no fluido de corte entra em ebulição causando bolhas na superfície do aquecedor. Um aumento além da temperatura de ebulição faz com que todas as bolhas se juntem, formando uma camada de vapor sobre a superfície, conhecida como *film-boiling*. A transferência de calor através deste filme é muito mais difícil, causando assim um aumento repentino da temperatura.

Yasui (1983) mediu a temperatura na superfície da peça utilizando-se como fluido refrigerante: óleo, água e também a seco. Ele verificou que a uma temperatura acima do ponto de ebulição de cada fluido, a superfície da peça atingia rapidamente a temperatura correspondente aquela verificada para a retificação à seco. Em outras palavras, os fluidos deixavam de ser efetivos. Num estudo posterior, Salmon (1988) observou experimentalmente a formação de um filme de vapor na superfície da peça, imediatamente abaixo da zona de contato.

3. Controle da queima utilizando sinais de emissão acústica

A dificuldade fundamental em controlar os danos causados no processo de retificação é a falta de um método confiável em fornecer realimentação em tempo real durante o processo. O sinal de emissão acústica é significativamente mais sensível às variações das condições de retificação do que medidas de força e potência e, portanto, fornece uma técnica mais promissora para o monitoramento *on-line* do processo (Webster et al., 1994). A emissão acústica (EA) pode ser definida como sendo ondas de tensão elástica gerada como um resultado da liberação rápida de energia de deformação dentro de um material submetido a um estímulo externo, devido ao rearranjo de sua estrutura. Estas ondas de tensão produzem deslocamentos na superfície do material o que pode ser detectado por um sensor piezoelétrico que transforma estes deslocamentos em sinais elétricos (Diniz et al., 1991).

Sua faixa de frequência gira em torno de 50 kHz a 1000kHz, que está acima da faixa de muitos ruídos vindo de fontes exteriores ao próprio processo de retificação. Sendo assim, é um método sensível e adequado para monitorar o processo de retificação (Kluft, 1994).

As origens da emissão acústica no processo são decorrentes principalmente da fratura do grão, da fissura do ligante e da fricção entre o grão abrasivo e a peça-obra, todos diretamente ligados ao processo de formação de cavaco e desgaste do rebolo. Com o sinal de emissão acústica é possível determinar o fim do spark-out, que é muito importante para diminuir o ciclo de retificação (Oliveira, 1998).

O parâmetro predominantemente estudado em pesquisas prévias usando emissão acústica tem sido o valor médio quadrático (RMS) do sinal de EA filtrado (EA_{RMS}) sobre uma banda de frequência cuidadosamente selecionada. Este sinal tem sido um parâmetro razoável de estudo, pois o processo de retificação é muito rico em ondas sonoras, sendo por isso, utilizado como foco de pesquisas atuais.

Aguiar (1997) tem demonstrado que o sinal RMS de emissão acústica e o sinal de potência de corte combinados podem fornecer parâmetros expressivos para a indicação da queima da peça na retificação plana. Da combinação entre os sinais, Aguiar (1997) obteve um parâmetro indicativo para a queima da peça, denominado DPO, o qual consistia da relação entre o desvio padrão do sinal RMS de emissão acústica e a potência média de corte por passada do rebolo. Embora para a maioria dos ensaios realizados, o parâmetro denominado DPO tenha se mostrado um indicador da queima, para alguns casos não se comportou da mesma maneira.

Outro parâmetro de avaliação utilizado é o a estatística PRO que é definida pelo produto da integral do sinal de emissão acústica pela integral do sinal de potência. Assim, esta ferramenta combina a área abaixo da curva de emissão acústica e a área abaixo da curva da potência elétrica necessária para o acionamento do rebolo.

O sinal bruto de emissão acústica também tem sido explorado recentemente no monitoramento do processo de retificação. Artigos técnicos (Wang et al., 2001 e Jemielniak, 1997) mostram que a utilização de ferramentas de processamento de sinais e as redes neurais são eficientes no monitoramento da retificação.

4. Redes neurais aplicadas no processo de retificação

As RNA's devem ser aplicadas em áreas nas quais há grande volume de dados e não existe um conhecimento estruturado sobre esses dados, dessa forma, se tornam especialmente úteis no monitoramento e controle de processos de fabricação, onde as possibilidades de sensoriamento são vastas e fornecem informações valiosas sobre o processo, que muitas vezes, são de difícil inter-relacionamento. Observa-se um crescente aumento desse tipo de abordagem no tratamento de problemas relacionados a máquinas e processos nos últimos

anos. Muitos são os exemplos de aplicações de RNA's em processos de usinagem e especificamente no processo de retificação, alguns desses são brevemente explicados a seguir. Teixeira (1999) investigou a condição da ferramenta de corte na fresagem de topo em um centro de usinagem utilizando RNA. Os dados colhidos para análise foram: sinal de um sensor de corrente, força na direção do avanço de fresado, e sinais de vibração gerados por dois acelerômetros, um posicionado no cabeçote do eixo árvore na direção do eixo de avanço e outro sobre a mesa. Através das informações geradas por esses sensores instalados no centro de usinagem foi acoplado ao sistema de monitoramento um sistema de tomada de decisões, o qual apropriadamente interpretou as informações de entrada dos sensores associando-as aos padrões do estado da ferramenta. Foi utilizado o algoritmo "*Sequential Forward Search*", SFS, o qual previamente seleciona as características mais relevantes do comportamento do espectro do sinal dos sensores (da força, corrente e aceleração). A Rede Neural Artificial, RNA, foi utilizada para integrar a informação das frequências selecionadas e reconhecer a ocorrência do desgaste da ferramenta na operação de fresado.

Kwak (2001) utilizou uma rede neural treinada pelo algoritmo backpropagation para a predição de problemas freqüentemente encontrados no processo de retificação cilíndrica. Para tal utilizou como dados de entrada para a rede o pico do sinal RMS, o pico da Transformada Rápida de Fourier, a contagem dos sinais acima do limiar e o desvio padrão dos sinais de emissão acústica adquiridos por um sensor instalado na contraponta da peça. Pela sua importância no referido processo, os problemas analisados foram a queima superficial e a vibração induzida, as quais interferem diretamente no acabamento da peça, assim os dados de saída da rede eram informações do tipo: "queima ocorrida", "vibração ocorrida" ou "andamento normal do processo". A rede se mostrou eficiente na predição desses padrões.

Em uma pesquisa semelhante conduzida por Vijayaraghavan (2001), a temperatura de queima foi estudada em função de sinais de emissão acústica, força normal de corte, vibração e número de ciclos na retificação plana. As amostras coletadas nos ensaios foram inseridas em uma rede neural cujos neurônios eram dispostos da seguinte forma: 4 neurônios na camada de entrada, 5 na única camada escondida e um neurônio na camada de saída (referente à temperatura de ocorrência da queima). O método se mostrou eficiente, o que reforça a eficácia do multisensoriamento e do método de RNA no monitoramento *on-line* do processo.

Nathan (1999) realizou um trabalho semelhante, porém monitorando a potência e a temperatura da região de corte, sendo esta última monitorada pelo faiscamento do processo a seco. Neste mesmo trabalho foi utilizada uma rede neural com sucesso na predição do momento da queima.

Wang et al. (2001), propôs um sistema de redes neurais artificiais para verificar a detecção da queima no processo de retificação. O sinal de EA foi coletado para ser utilizado como um vetor na rede. O resultado da RNA era referente a ocorrência ou não da queima. Concluiu-se que através dos treinamentos, a RNA obteve uma excelente performance nesse trabalho.

Bicudo et al. (1996) apresentou um estudo indicando inovações tecnológicas atuais aplicadas especificamente na retificação, mas com extensão a todos os tipos de máquinas operatrizes. Verifica-se que a avaliação dos potenciais de novas tecnologias de produção baseia-se no aumento do desempenho da máquina, além da redução de custos de produção, a fim de reduzir aos extremos os tempos e custos de usinagens. Para isso podem-se utilizar inúmeros artifícios eletrônicos, bem como novos materiais de corte e componentes mecânicos. Cita-se também a utilização de sistemas de controle que através de sensores dispostos em pontos estratégicos da máquina, consegue-se medir inúmeras variáveis do processo, de forma a interpretá-las e corrigi-las, se necessário, para o alcance das tolerâncias e qualidades exigidas. Estes, além disso, possibilitam que se realizem simulações de usinagens (Redes Neurais) nas mais variadas condições, criando correlações entre as diversas variáveis do processo, de

forma a haver um “equilíbrio inteligente” por parte da máquina durante a operação e fazendo um prognóstico da possível qualidade final.

5. Materiais e métodos

A confecção e montagem do banco de ensaios têm como finalidade principal permitir que, a partir de condições de usinagem pré-estabelecidas para os ensaios, possam ser medidas, em tempo real as seguintes variáveis de saída: velocidade da ferramenta e do reboło, avanço, temperatura, potência e emissão acústica, as quais serão manipuladas conjuntamente para aquisição de resultados. Nesta etapa, foi executada a adequação geral do banco de ensaios, incluindo ajustes e programação da máquina retificadora e preparação dos sensores das variáveis de saída. A Figura 1 mostra o banco de ensaios.

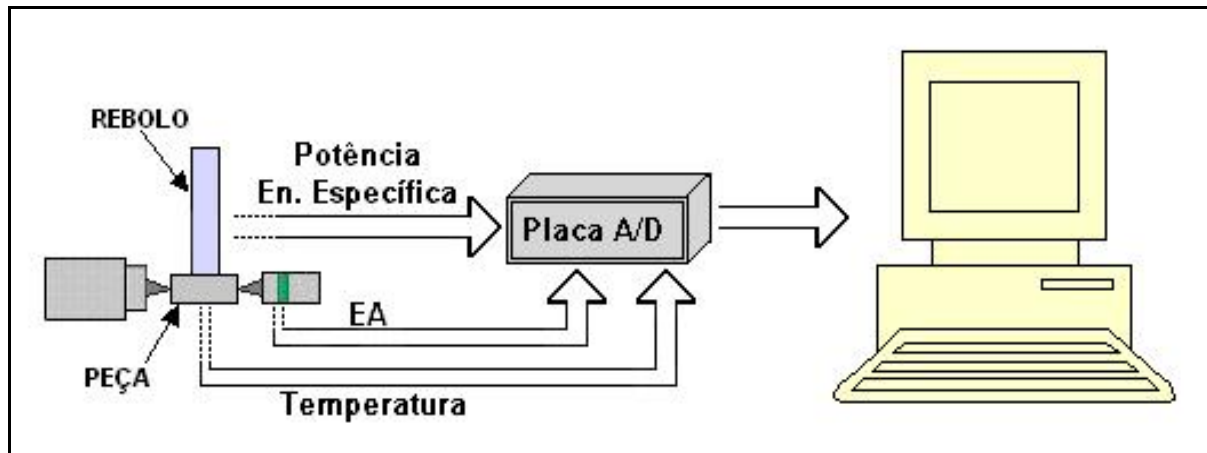


Figura 1 – Banco de ensaios e aquisição de dados.

O programa de captação de dados utilizado na medição das variáveis de saída da operação, através da placa de aquisição de dados A/D, foi construído utilizando o software *LabVIEW 6.1*.

Foram realizados ensaios variando-se as velocidades de avanço (V_f), de acordo com a Tabela 1.

| Ensaio | V_f (mm/min) |
|--------|----------------|
| n° 1 | 0,5 |
| n° 2 | 0,55 |
| n° 3 | 0,6 |
| n° 4 | 0,65 |
| n° 5 | 0,7 |
| n° 6 | 0,75 |
| n° 7 | 0,8 |

Tabela 1 – Velocidades de avanço utilizadas nos ensaios.

O reboło utilizado foi de óxido de alumínio, especificação: 38A-80 PVS de dimensões 350x39x127, da Norton. O material da peça ensaiada é o ?????

Os dados utilizados para o treinamento e a simulação da rede neural artificial são: potência de retificação; emissão acústica (EA); o parâmetro PRO; força tangencial de corte (F_t); energia

específica de retificação (u); e velocidade de mergulho (V_f). Tendo como saída o tempo de queima.

5.1. Construção da rede neural

Nesta etapa uma rede perceptron multicamadas será treinada com dados colhidos em campo a fim de estimar o tempo de queima no processo de retificação.

A partir dos dados coletados experimentalmente e armazenados em arquivos de dados, é criada uma matriz sendo cada uma das linhas representa uma específica variável coletada em laboratório sendo a última linha a variável “tempo de queima”.

Para o treinamento da rede existe a necessidade de converter os valores das amostras de treinamento da rede neural para uma faixa de valores de -1 a 1, o que torna desnecessário o conhecimento dos valores reais dos parâmetros desde que seja mantida a proporção entre os valores das amostras de uma mesma variável. Posteriormente ao treinamento, a rede é simulada com os dados de entrada e a resposta é convertida novamente à ordem de grandeza inicial. A normalização dos dados de treinamento impede que, devido à magnitude de um destes valores, um ou mais neurônios da rede saturem, além de garantir um treinamento mais eficiente.

Para o treinamento da rede neural foram usadas as médias dos vetores de dados armazenadas em uma matriz análoga à tabela mostrada a seguir, onde se encontram as seis variáveis de entrada e a variável de saída na última linha.

| Ensaio | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Potência | 294,7 | 259,7 | 259,2 | 150,8 | 181,6 | 267,9 | 127,8 |
| EA | 0,1326 | 0,1434 | 0,2441 | 0,4956 | 0,2126 | 0,4539 | 0,4300 |
| Ftc | 9,372 | 4,340 | 5,070 | 9,832 | 6,061 | 8,680 | 8,721 |
| PRO | 1835 | 462 | 969 | 3750 | 968 | 3122 | 2859 |
| u | 16,94 | 7,99 | 8,17 | 14,26 | 8,35 | 10,88 | 10,27 |
| Vf | 0,5 | 0,55 | 0,6 | 0,65 | 0,7 | 0,75 | 0,8 |
| Tempo | 172,54 | 340,55 | 290,49 | 147,67 | 221,34 | 122,22 | 134,31 |

Tabela 5 – Matriz de treinamento

O treinamento da rede neural foi realizado com auxílio do algoritmo de treinamento *Levenberg-Maquardt*, pois esse tem como característica principal a informação de apenas uma variável de saída que neste trabalho é o tempo de queima, além de que o algoritmo de *Levenberg-Maquardt* é de 10 a 100 vezes mais rápido que o algoritmo de backpropagation convencional. O algoritmo de *Levenberg-Maquardt* é uma técnica baseada no método dos mínimos quadrados para modelos não lineares que pode ser incorporada ao algoritmo de backpropagation a fim de aumentar a eficiência do processo de treinamento.

6. Resultados

A rede se mostrou capaz de simular o comportamento das amostras perfeitamente, chegando rapidamente ao erro máximo definido pelo parâmetro de treinamento. O gráfico que demonstra esta afirmativa é exposto a seguir.

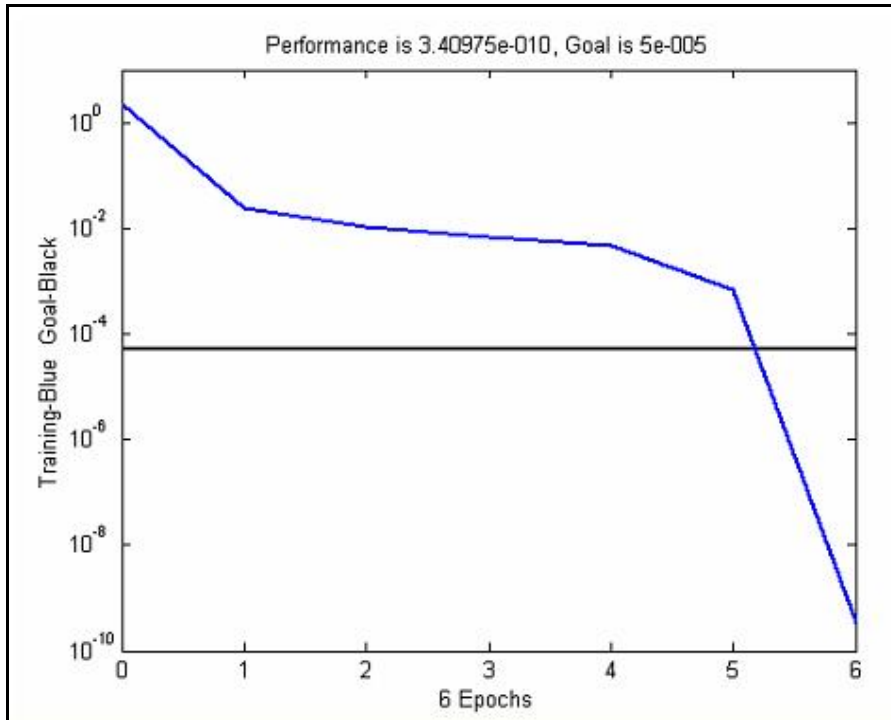


Figura 2 – Performance da rede.

Observa-se na Figura 2 que o algoritmo de *Levenberg Marquardt* é capaz de treinar a rede com pouquíssimas épocas de treinamento.

Após o treinamento da rede os mesmos vetores entrada de treinamento foram usados para verificar sua performance. Na Figura 3 são plotados os dados de saída (tempo para a queima) de treinamento conjuntamente com os dados fornecidos pela rede quando aplicada aos vetores entrada de treinamento. Observa-se que os valores são praticamente coincidentes.

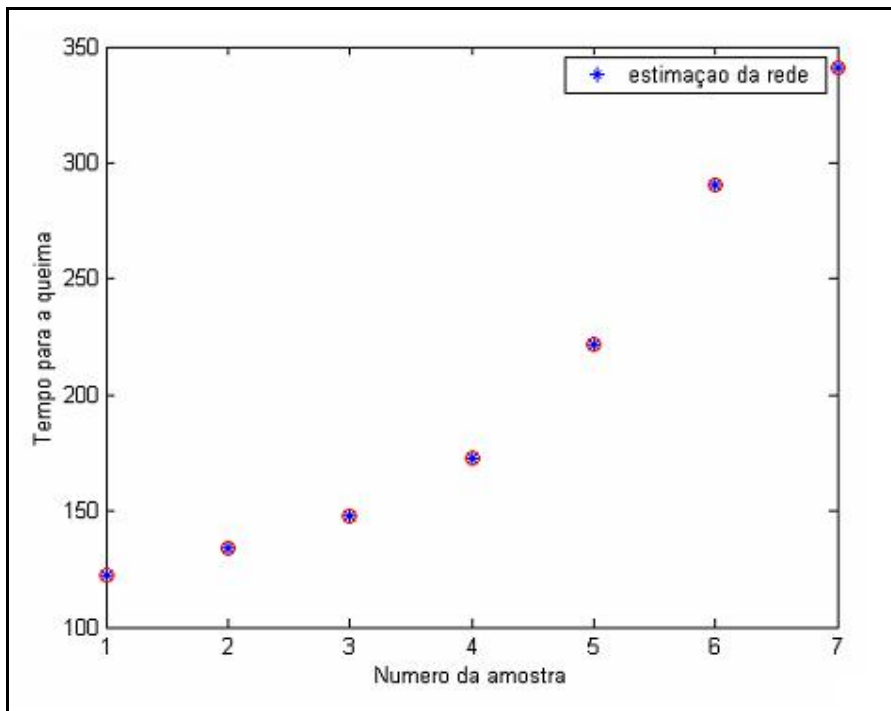


Figura 3 – Estimação da rede com os dados de treinamento.

Na Figura 4 foram plotados os dados de treinamento em função dos dados simulados com a rede e realizada uma regressão linear com o intuito de visualizar melhor a precisão dos dados fornecidos pela rede.

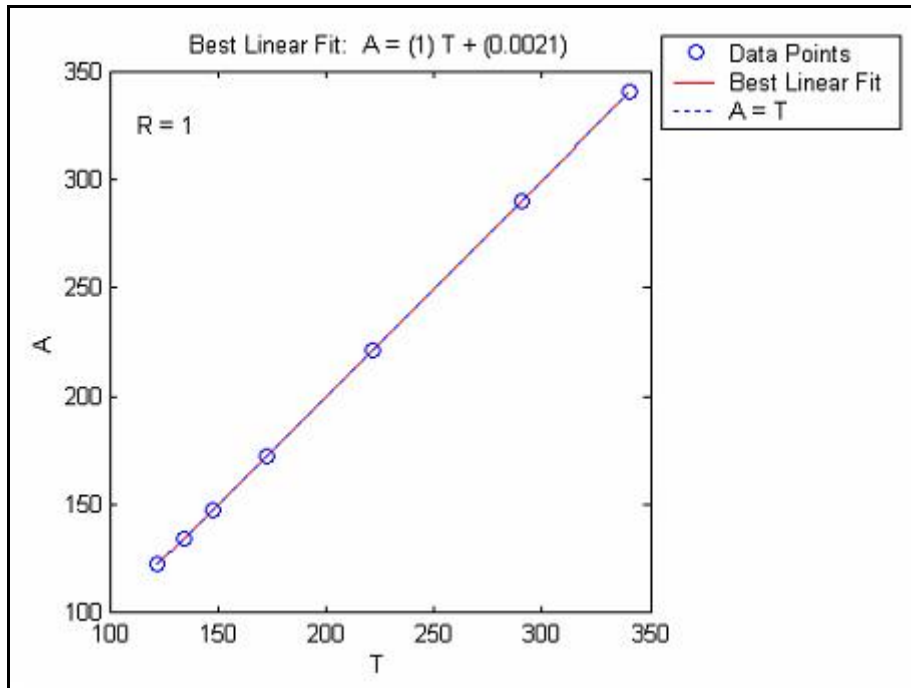


Figura 4 – Coeficiente de correlação.

7. Conclusões

A utilização de uma rede treinada no planejamento ou monitoramento de um processo depende da qualidade das amostras de treinamento. Estas devem representar fielmente o relacionamento entre as variáveis monitoradas. É indispensável uma análise criteriosa da abrangência das situações nas quais as amostras de treinamento são representativas do processo analisado para que não se cometam enganos ou um desempenho insatisfatório. A dispersão entre os valores de entrada quando relacionado com a variável de saída “tempo para a queima” impõe a necessidade de utilização de um fator de segurança elevado para uma utilização confiável.

A precisão alcançada mostra que o modelamento por redes neurais é eficiente em simular o comportamento do processo e pode trazer grandes benefícios no controle da queima no processo de retificação cilíndrica. A rede pode ser usada como instrumento de validação de processos, generalizando as condições favoráveis a partir de ensaios discretos usados no treinamento ou servir como base para tomada de decisões por algum instrumento de controle on-line sobre o processo.

8. Referências Bibliográficas

- AGUIAR, P. R., (1997) - Monitoramento da Queima Superficial em Processo de Usinagem por Retificação usando a Potência Elétrica do Motor de Acionamento e Emissão Acústica. Tese de Doutorado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP.
- BADGER, J. A. & TORRANCE, D. A. (2000) - Burn Awareness. Cutting Tool Engineering Magazine, volume 52, número 12.
- BICUDO, L. & FERNANDO, F.G. (1996) - Revista Máquinas e Metais. pg 112-123, Brasil.
- DINIZ, A. E.; CUPINI, N. L.; VILELLA, R. C. (1991) - Monitoramento do processo de usinagem por emissão acústica. XI Congresso Brasileiro De Engenharia Mecânica, São Paulo.
- JEMIELNIAK, K. (1997) - Some Aspects of Acoustic Emission Signal Processing. Annals of the CIRP, pg. 1-8.
- KLUFT, W. (1994) - A Monitoração dos Processos Reduz Custos e Desperdícios. Revista Máquinas & Metais, vol. 10, pp. 60-80.
- KWAK J.S. & SONG, J.-B. (2001) - Trouble diagnosis of the grinding process by using acoustic emission signals. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 41, 899–913.
- MALKIN, S. (1989) - Grinding technology: theory and applications of machining abrasives. England: Ellis Horwood Limited, 275p.
- NATHAN, R. D.; VIJAYARAGHAVAN, L.; KRISHNAMURTHY, R. (1999) - In process monitoring of burn in the cylindrical grinding of steel. Journal of Materials Processing Technology, 91, 37 – 42.
- OLIVEIRA, J. F. G. (1998) - Intelligent Grinding Systems (IGS): High Reliability and Automation Level in Precision Grinding. Abrasives Magazine, pp. 11-22.
- SALMON, S. C. (1988) - Unpublished work. University of Bristol.
- SHAFTO, G. R. (1975) - Creep Feed Grinding. Ph.D. Thesis, University of Bristol.
- TEIXEIRA, M. S., (1999) - Redes Neurais Artificiais Aplicadas no Monitoramento da Condição de Ferramentas de Corte Utilizando Algoritmo de Extração das Características SFS. Proceedings of the IV Brazilian Conference on Neural Networks, pp. 292-297.
- VIJAYARAGHAVAN, L.; KRISHNAMURTHY, R.; SARAVANAPRIYAN, A. (2001) - On-line detection of grinding burn by integrated sensing. SIcon'01 SAensors for industry conference, Rosemount, Illinois, USA, 5-7.
- WANG, Z.; WILLETT, P.; AGUIAR, P. R.; WEBSTER, J. (2001) - Neural Network Detection Grinding Burn from Acoustic Emission. International Journal of Machine Tools & Manufacture, volume 41, pp. 283-309.

WEBSTER, J.; MARINESCU, I.; BENNET, R. (1994) - Acoustic emission for process control and monitoring of surface integrity during grinding. Annals of the CIRP, volume 43/1, p. 299-304.

YASUI, H. & TSUKUDA, S. (1983) - Influence of Fluid Type of Wet Grinding Temperature. Bull. Japan Soc. of Prec. Eng., vol. 17, no. 2, pp: 133-134.