

ESTUDO DO CONTEÚDO HARMÔNICO DO SINAL DE EMISSÃO ACÚSTICA PARA O MONITORAMENTO DE DANOS TÉRMICOS NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

Bruno Tomazela¹, brunotomazela@hotmail.com
Paulo Roberto de Aguiar¹, aguiarpr@feb.unesp.br
Uli Scheuerer³, uli.scheu@hotmail.de
Eduardo Carlos Bianchi², bianchi@feb.unesp.br
Jeferson André Bigheti¹, jefersonbigheti@terra.com.br
Marcelo Nicoletti Franchin¹, franchin@feb.unesp.br

UNESP - Universidade Estadual Paulista - Bauru Campus – Departamento de Engenharia Elétrica¹/Mecânica²,
Faculdade de Engenharia, Luiz Edmundo Carrijo Coube Ave., 14-01, Vargem Limpa, CEP: 17033-360.
Hochschule Regensburg University, ³Fakultät Elektro- und Informationstechnik, Germany.

***Resumo.** A retificação é um dos processos de acabamento mais utilizados na fabricação de componentes mecânicos de precisão. Um dos problemas mais críticos na implantação do controle e monitoramento do processo de retificação é a detecção automática de queima superficial nas peças. Trabalhos anteriores empregando o sinal de emissão acústica (EA) puro têm apresentado técnicas de detecção da queima utilizando várias ferramentas de processamento digital de sinais. Assim, o presente trabalho visa estudar o espectro do sinal de emissão acústica puro para três diferentes níveis de queima (leve, média e severa) na superfície da peça no processo de retificação, com a posterior proposição e simulação de filtros digitais. Os sinais de EA puro obtidos através da realização de ensaios em laboratório, após serem filtrados foram processados digitalmente para a obtenção das estatísticas RMS (root mean square), CFAR (taxa de alarme falso constante), Count e Marse. Os resultados obtidos mostram faixas de frequência onde as amplitudes dos sinais são mais elevadas, podendo-se usar filtros no sinal puro de emissão acústica para melhor monitorar o fenômeno da queima no processo de retificação.*

***Palavras-chave:** Processo de Retificação, emissão acústica, danos térmicos, processamento de sinais.*

1. INTRODUÇÃO

Um dos processos de acabamento mais utilizados na fabricação de componentes mecânicos de precisão é a retificação. Trata-se de um dos processos de menor domínio tecnológico, se comparado aos processos convencionais de usinagem, além de ter a função de solucionar os problemas de qualidade e tempo de toda a seqüência de fabricação (Irani, *et al.*, 2005).

Segundo Aguiar *et al* (2006), a remoção do cavaco no processo de usinagem por abrasão não acontece da mesma maneira que nas operações mais convencionais como fresamento e torneamento. Nestas operações a ferramenta possui geometria de corte definida, enquanto que na retificação a ferramenta apresenta várias arestas cortantes, ou seja, geometria de corte irregular. A grande quantidade de variáveis envolvidas no processo, bem como as mudanças constantes da geometria da ferramenta de corte, dificulta a escolha das condições de usinagem que possibilitem os resultados desejados.

A dificuldade fundamental de controlar os danos causados no processo de retificação é a falta de um método confiável em fornecer realimentação em tempo real durante o processo. Sinais de emissão acústica e potência de corte combinados têm sido utilizados com sucesso na determinação de parâmetros indicativos da queima. Estes sinais tratados e combinados podem possibilitar a implementação de um sistema de controle em tempo real da queima, otimizando o processo de retificação (Wang *et al.*, 2001 e Dotto *et al.*, 2006).

Estudo realizado por Khenafes (2006) utilizando um microcontrolador para a monitoração da queima no processo de retificação mostrou não ser possível obter o mesmo comportamento das estatísticas estudadas com o sinal de EA puro, pois a aquisição dos sinais pelo microcontrolador ocorre em uma frequência bem inferior, perdendo-se muita informação importante no processo de filtragem antes da aquisição pelo hardware utilizado.

Uma solução para resolver os problemas de restrição de taxa de aquisição e processamento de sinais de EA e potência é a utilização dos DSPs (Digital signal Processors), possibilitando o cálculo das estatísticas para monitoração e detecção da queima no processo de retificação. Por outro lado, o conhecimento do conteúdo harmônico do sinal de EA

pode trazer benefícios na implementação em hardware se, por exemplo, o estudo revelar que as frequências importantes relacionadas com o fenômeno estão bem abaixo da frequência de 1 MHz, usualmente considerada pelos sensores comerciais de EA.

Desta forma, o presente trabalho visa estudar o conteúdo harmônico do sinal de emissão acústica puro para três diferentes níveis de queima (leve, média e severa) na superfície da peça no processo de retificação, com a posterior proposição e simulação de filtros digitais. Os sinais de EA puro após serem filtrados pelos filtros digitais serão digitalmente processados para a obtenção das estatísticas RMS (root mean square) e CFAR (taxa de alarme falso constante), Count e Marse. As mesmas estatísticas serão obtidas com o sinal sem filtro e um estudo comparativo será realizado.

2. MONITORAMENTO DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

A retificação é um processo de acabamento muito utilizado na fabricação de componentes mecânicos de precisão. O processo de retificação visa melhorar o acabamento superficial e garantir a integridade das peças (Gu et al, 2004). Trata-se de um processo de alta precisão e importância, já que é inaceitável a perda de uma peça nesta etapa, pois o valor agregado ao material nesta fase já é muito elevado devido aos outros processos que antecederam o mesmo (Wang et al, 2001; Aguiar, 2007).

Um dos maiores obstáculos para se atingir a completa automatização do processo de usinagem dentro de sistemas integrados e flexíveis de manufatura é o desenvolvimento do que pode ser chamado de usinagem não assistida pelo homem, isto é, um processo no qual o estabelecimento do momento de troca da ferramenta, a própria troca da ferramenta e a mudança das condições de corte visando a otimização do processo não necessitam da intervenção do homem. Para isto, o desenvolvimento de um sistema de monitoramento e controle do processo, em tempo real, é de fundamental importância (Inasaki e Okamura, 1985; Racko, 1982).

Segundo Inasaki (1998), existem três importantes objetivos no monitoramento do processo de retificação: detectar problemas que ocorram durante o processo, fornecer informações para otimizar o processo, e contribuir com o estabelecimento de um banco de dados necessário para determinar a configuração dos parâmetros de controle.

De acordo com Johnson (1997), no controle de processos o objetivo básico é regular o valor de alguma variável envolvida, como o sinal de EA emitido do processo, mantendo-o dentro de um limite desejado, o qual é chamado de valor de referência.

A emissão acústica (EA) pode ser definida como ondas de tensão elástica gerada como 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 que podem ser detectados por um sensor piezelétrico que transforma estes deslocamentos em sinais elétricos (Racko, 1982).

Sua faixa de frequência gira em torno de 50kHz 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 (Dornfeld, 1992).

As origens da emissão acústica no processo são decorrentes principalmente da fratura do grão e do ligante, fissura do grão e fricção entre o grão abrasivo e a peça, 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 centelhamento, que é muito importante para diminuir o ciclo de retificação (Susic e Grabec, 2000).

Os sinais de emissão acústica fornecem várias informações a respeito do processo de retificação. Entretanto, análises mais rigorosas podem ser obtidas via tratamento de sinais com o auxílio de parâmetros estatísticos. Com o auxílio de softwares de manipulação matemática, como o Matlab, Origin, dentre outros, é possível efetuar o tratamento de sinais e obter informações tais como: valor RMS, CFAR (taxa de alarme falso constante), Count, Marse, etc.

Em certo intervalo Δt , o valor RMS do sinal puro de emissão acústica pode ser expresso pela Eq. (1) (Liu, 1991; Webster et al., 1996).

$$AE_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t f_{raw}(t)^2 . dt} \quad (1)$$

Onde T corresponde ao tempo de integração, e $f_{raw}(t)$ é o sinal puro ou bruto de emissão acústica.

O cálculo da estatística CFAR é mostrado pela Eq. (2) (Aguiar et al, 1998).

$$T_{pl}(X) = \sum_{k=0}^{M-1} X_K^v \quad (2)$$

Onde X_k corresponde ao $k^{\text{ésimo}}$ valor absoluto ao quadrado da amostra do sinal no domínio na frequência, v é um expoente variável entre 2 e 3, e $2M$ corresponde ao tamanho do vetor de dados para ser calculada a FFT. Para o presente

trabalho utilizou-se V igual a 2. Respectivamente $V=1$ e $V=\infty$ correspondem a detector de energia e a $\max\{X_k\}$; $2 < V < 3$ proporciona bom desempenho para uma grande faixa de valores (Wang, Z, 1999).

Eventos de emissão acústica são transitórios individuais rápidos produzidos por mudanças locais em um material. A contagem (counts) de emissão é o número de vezes que um sinal cruza um dado limiar. Eventos de alta amplitude de longa duração tendem a ter muitos cruzamentos por esse limiar. De acordo com Wang et al. (2001), este parâmetro apresentou pouca capacidade preditiva, mas será utilizado para fins de comparação.

MARSE, algumas vezes referida como contagem de energia, é a medida da área sob o envelope do sinal de tensão linear retificado proveniente do transdutor. Isto pode ser pensado como uma amplitude de sinal relativa, e é útil porque a energia da emissão pode ser determinada. MARSE também é sensível a duração e amplitude do sinal, mas não usa contagens, frequências de operação ou limiares pré-definidos. MARSE é normalmente usada nas medidas de emissão acústica (NDT Resource Center, 2010).

2.1. Danos Térmicos

As altas temperaturas geradas na zona de retificação podem causar vários tipos de danos térmicos à peça, como por exemplo, queima (no caso de aços), têmpera excessiva da camada superficial com possível reendurecimento e aumento da fragilidade, indesejáveis tensões residuais de tração, redução da resistência à fadiga e trincas. Para atenuar a restrição de danos térmicos é geralmente necessário reduzir a potência de retificação. Isto pode ser obtido utilizando um rebolo mais macio ou uma dressagem mais grosseira, ambas tem suas desvantagens. O fluido de corte também tem um importante efeito como lubrificante. Lubrificação direta com fluidos de retificação torna-se importante principalmente na retificação *creep-feed*. Algumas análises de transferência de calor indicam que o uso de uma velocidade de trabalho maior, mantendo a mesma taxa de remoção, deveria abaixar a temperatura e reduzir o dano térmico, mas isto nem sempre ocorre na prática (Malkin, 1989).

Vários fatores corroboram a incidência de danos térmicos em peças retificadas. Segundo Kwak e Song (2001), a operação de retificação tem sido usada como etapa final de um produto por causa da sua capacidade de cortes mínimos e por causa do êxito com exigências de rugosidade. Se um dano ocorre, um valor aceitável de rugosidade não poderá ser mantido. Danos na retificação são afetados por influência de diversos fatores que são principalmente classificados dentro das condições de usinagem, do tipo de rebolo, das condições de dressagem e do fluido de corte. A Figura 1 descreve a porcentagem de influência dos fatores sobre a queima em um processo de retificação, segundo estudos efetuados por Kwak e Há (2004).

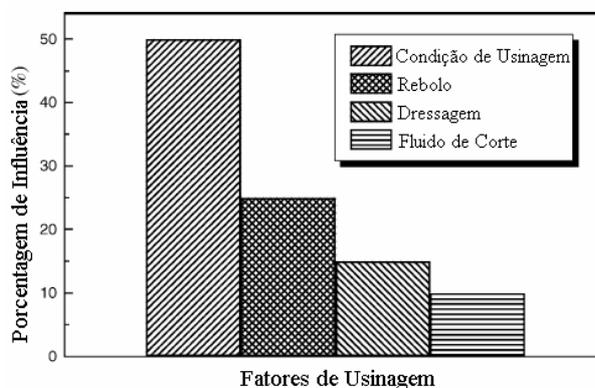


Figura 1. Porcentagem dos fatores que influenciam para a queima no processo de retificação (Kwak e Há, 2004).

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. Webster et al (1994) têm mostrado que a medida do sinal de emissão acústica é significativamente mais sensível às variações das condições de retificação do que medidas de força e potência, e fornece uma técnica mais promissora para o monitoramento do processo em tempo real.

2.2. Filtros Digitais

Filtros digitais são elementos muito importantes dentro do processamento digital de sinais. Na realidade, o desempenho extraordinário desses filtros é uma das razões principais que levou o DSP (Digital Signal Processing ou Processamento Digital de Sinais) a se tornar tão popular (Oppenheim e Willsky, 1998)

Em particular, filtros digitais são geralmente usados para remover partes indesejáveis de um sinal ou melhorar as componentes de certa faixa de frequência. A utilização de filtros digitais ao invés dos analógicos traz algumas vantagens. Os filtros digitais são programáveis, ou seja, o seu funcionamento é determinado por um programa armazenado em uma memória. Mudar esse programa é extremamente fácil, e não é necessário redesenhar o circuito do filtro, como é o caso dos filtros analógicos (Akay, 1994).

A forma de filtro mais simples é a dos filtros não-recursivos, também conhecidos como filtros FIR, definidos pela equação 3.

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} b_k x[n-k] \quad (3)$$

$x[k]$ é o sinal de entrada do filtro, $y[n]$ o sinal de saída e b_k os coeficientes de filtro. O filtro definido é constituído por um vetor $\{b_k\}$ de coeficientes e o processo de filtragem é uma convolução do sinal de entrada com os coeficientes do filtro. Na prática, o número de produto que se pode realizar é um número finito, e, portanto, os filtros digitais possuem tamanho finito. Em geral, considera-se que o comprimento do vetor de coeficientes do filtro é muito menor que o número de amostras do sinal. Além disso, o valor de saída no instante atual não pode depender de valores futuros, e, portanto, o filtro deve ser causal. Assim, a equação (3) pode ser escrita na forma da equação (4).

$$y[n] = \sum_{k=0}^N b_k x[n-k] \quad (4)$$

Os filtros recursivos também chamados de filtros IRR ((infinite impulse response), por outro lado, são aqueles que o valor do sinal de saída depende tanto da entrada quanto da saída. A equação (5) representa a equação de diferenças para um filtro recursivo causal.

$$y[n] = \sum_{k=0}^N b_k x[n-k] + \sum_{k=0}^N a_k y[n-k] \quad (5)$$

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Uma máquina retificadora tangencial plana do fabricante Sulmecânica, modelo RAPH-1055, foi usada para os ensaios. A retificadora foi equipada com um rebole de óxido de alumínio, da Norton, modelo ART-FE-38A80PVH. Um sensor de emissão acústica da Sensis, modelo DM-42, foi posicionado perto do corpo de prova. A Figura 2 mostra o diagrama esquemático da máquina retificadora e da instrumentação utilizada.

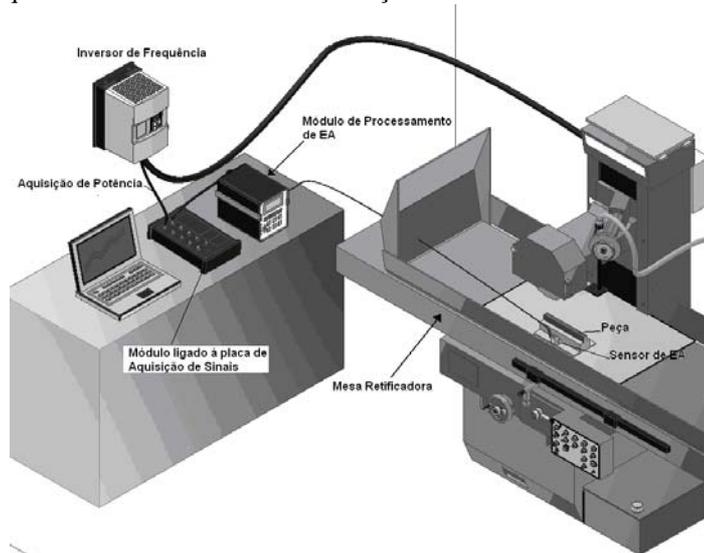


Figura 2. Diagrama esquemático da máquina retificadora e da instrumentação utilizada.

Foram usadas como corpo de prova para os ensaios barras de aço ABNT 1020 e ABNT 4340, tendo dimensões de 150mm de comprimento, 10mm de largura e 60mm de altura. A retificação foi aplicada ao longo do comprimento da peça. O sinal de emissão acústica foi enviado para a placa de aquisição de dados, modelo PCI-6011, instalada em um computador. O software LabVIEW foi utilizado para a aquisição dos sinais e o armazenamento destes em arquivos binários, para futuro processamento e análise.

Os testes foram efetuados em 12 corpos de prova, sendo sete deles do aço ABNT 1020 e o restante do aço ABNT 4340, os níveis de queima (sem-queima, queima-leve, queima-média e queima-severa) foram visualmente reconhecidos na superfície de cada um deles. Os parâmetros da dressagem, a lubrificação e a velocidade periférica do rebole foram adequadamente controlados para assegurar as mesmas condições de retificação em todos os corpos de prova.

A velocidade tangencial da mesa foi ajustada para 0,044m/s e a do rebole para 30m/s. A última foi mantida constante ajustando a frequência do motor de indução no inversor de frequência, conforme o diâmetro do rebole vai se reduzindo com os ensaios. O grau de recobrimento (U_d), que é a relação entre a largura de atuação do dressador e o passo de dressagem, foi ajustado em 1, mantendo-se iguais as condições de dressagem para todos os ensaios. O fluido

de corte foi usado com 4% em volume de óleo lubrificante e o restante de água. Cada ensaio resumiu-se a uma única passada do rebolo pelo comprimento do corpo de prova com as dadas condições de retificação. Os sinais de emissão acústica foram lidos com uma frequência de dois milhões de amostras por segundo, e armazenados em arquivos binários para futuro processamento. É importante mencionar que foram armazenados os sinais puros de emissão acústica ao invés do sinal RMS geralmente usado.

O processamento digital dos sinais teve início depois de realizados todos os 12 ensaios. Para se analisar as frequências dos sinais de emissão acústica foram realizadas filtragens no sinal puro em diferentes bandas de frequência. Para as filtragens foram utilizados filtros butterworth passa-banda, aplicados no sinal puro de emissão acústica separadamente, sendo as frequências de corte as bandas de frequência selecionadas. Para selecionar estas bandas de frequência estudou-se o espectro gerado do sinal puro de emissão acústica depois da utilização da FFT (Fast Fourier Transform ou Transformada Rápida de Fourier). Na FFT foram usados 1024 pontos e janela retangular, gerando um espectro da amplitude em função das várias frequências do sinal puro de emissão acústica, como no exemplo mostrado na Fig 3. Notou-se no espectro que a maior atividade do sinal está presente na faixa de 20 a 350 kHz. Assim, escolheram-se para estudo dezessete bandas de frequência dentro desta faixa.

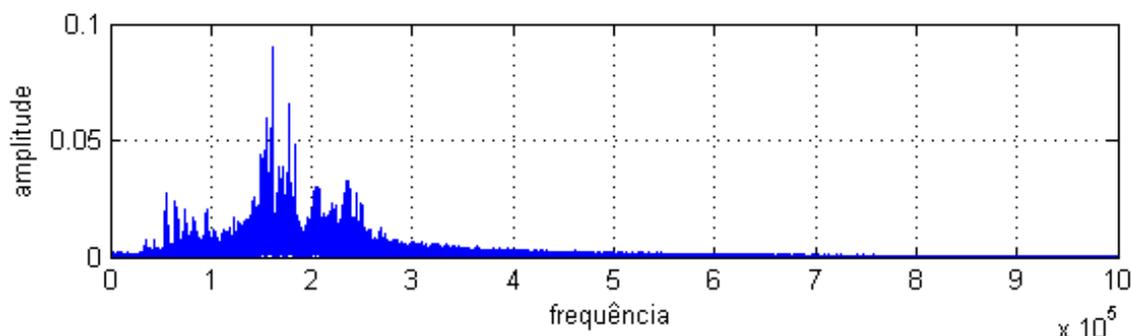


Figura 3. Espectro do sinal puro de emissão acústica (Amplitude em Volts; frequência em Hertz)

3.1. Estudo dos parâmetros estatísticos

A aplicação dos parâmetros estatísticos foi efetuada sob os sinais de emissão acústica filtrados para cada banda de frequência selecionada. Para cada sinal gerou-se um ponto estatístico, o que totalizam dezessete pontos, um para cada banda de frequência. Estes pontos foram plotados no Excel, totalizando quatro gráficos estatísticos, um para cada parâmetro ou estatística estudada. O procedimento foi repetido pra todos os ensaios.

A Figura 4 é um exemplo de plotagem dos parâmetros estatísticos no Excel. As linhas vermelhas representam a queima-severa (QS), as linhas laranja a queima-média (QM), as linhas amarelas representam a queima-leve (QL) e as linhas verdes os locais sem queima (SQ).

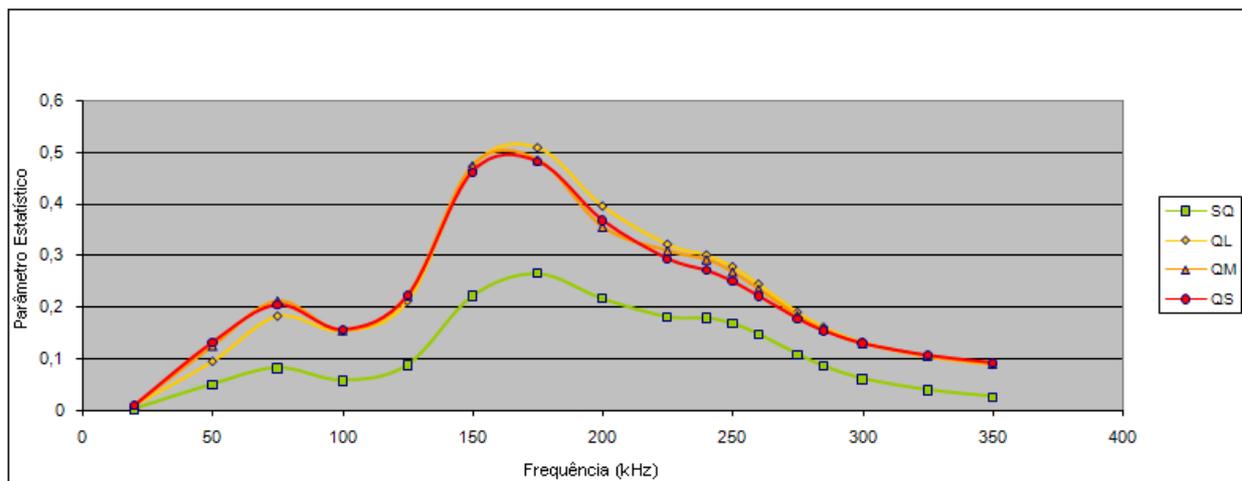


Figura 4. Exemplo de plotagem dos parâmetros estatísticos no Excel.

O sinal RMS foi obtido a partir do processamento digital do sinal puro de emissão acústica, com uso do software Matlab. O sinal foi filtrado para cada uma das dezessete bandas consideradas. Para cada sinal RMS obtido foi calculado

um valor médio, fornecendo um ponto estatístico para cada frequência, como mostra a Fig. 5. De mesmo modo estudou-se o parâmetro CFAR.

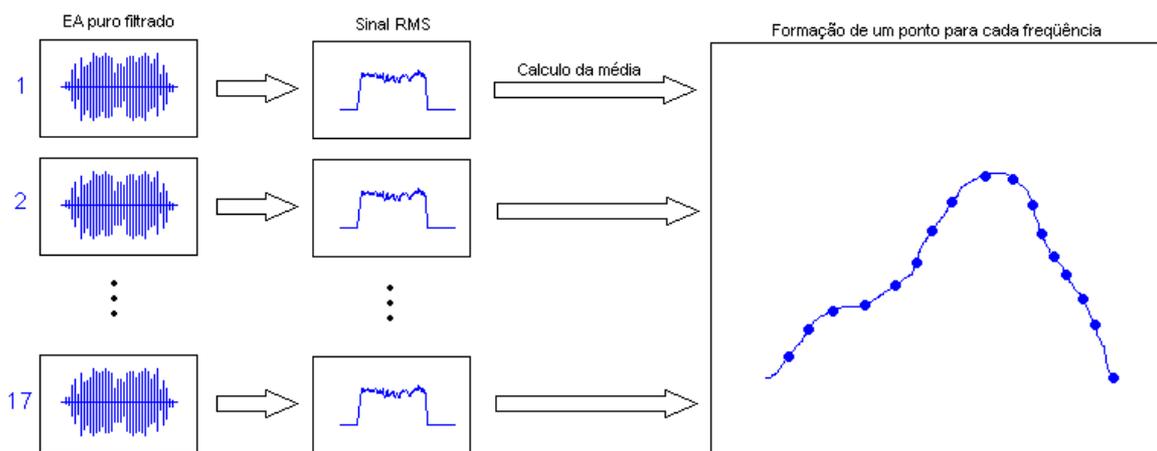


Figura 5. Processo de estudo do parâmetro estatístico RMS.

O parâmetro Counts foi obtido a partir do processamento digital do sinal puro de emissão acústica, com uso do software Matlab. O sinal foi filtrado para cada uma das dezessete bandas consideradas. O Counts foi aplicado a cada um dos sinais resultantes da filtragem, fornecendo o número de vezes que o sinal cruza o limiar, como detalhado anteriormente. De mesmo modo estudou-se o parâmetro MARSE.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Depois de usinados, os corpos de prova passaram por uma classificação visual e divisão da queima, sendo ela separada em: sem-queima, queima-leve, queima-média e queima-severa. Estas respectivamente representadas nas figuras a seguir pelas cores: verde, amarela, laranja e vermelha.

A Figura 6 mostra como a divisão de queima foi definida nas peças, enquanto a Tab. 1 mostra o intervalo de tempo que cada queima ocupa no sinal de EA, sendo t o tempo em segundos.

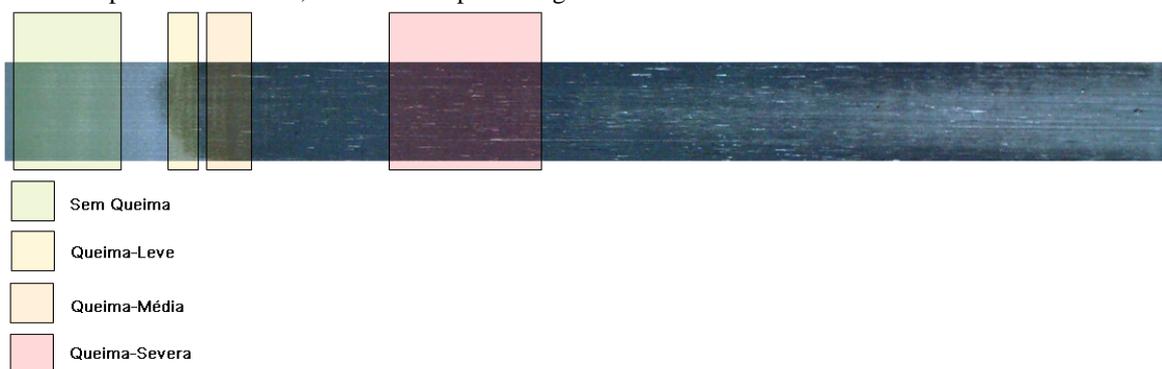


Figura 6. Divisão da queima na peça 8.

Devido a difícil interpretação da queima em seis das peças usinadas, utilizou-se apenas seis peças que apresentaram uma divisão mais clara das áreas afetadas pela queima.

Assim, as peças usadas foram as de número 5, 7, 8, 12, 13 e 14, das quais somente a peça oito aqui está representada.

Tabela 1. Intervalos de tempo das queimas no sinal de EA referente à peça 8.

Tipo de Queima	Tempo inicial (s)	Tempo final (s)
Sem Queima	2,596	3,033
Queima-Leve	3,220	3,345
Queima-Média	3,376	3,564
Queima-Severa	4,125	4,750

4.1. RMS

Para cada sinal puro de EA filtrado obteve-se um sinal de RMS. Do sinal obtido tirou-se a média e foram plotados gráficos para todos os ensaios selecionados.

A Figura 7 mostra o resultado obtido para a peça 8. As linhas vermelhas representam a queima-severa (QS), as linhas laranja a queima-média (QM), as linhas amarelas representam a queima-leve (QL) e as linhas verdes os locais sem queima (SQ).

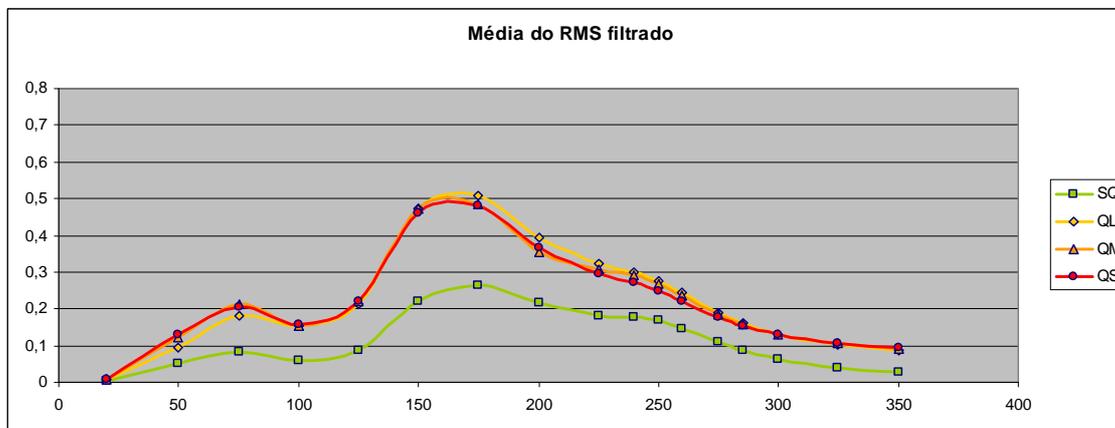


Figura 7. Gráfico RMS obtido para a peça 8.

Ocorre um aumento significativo na amplitude dos gráficos entre as frequências 125 e 250kHz, estando o pico das curvas concentrado na maioria dos casos entre as frequências 150 e 175kHz, o que significa que o sinal filtrado nestas bandas de frequênciaa tem mais chances de passar alguma informação durante o processo de usinagem em tempo real.

A separação da queima é visível nas curvas resultantes do processamento digital do sinal puro de EA para o parâmetro RMS. Teoricamente, tratando-se de energia, a amplitude de uma curva onde a queima é mais grave deve ser maior que a amplitude de uma curva onde a queima não é tão significativa, pois a agitação do sinal é maior para queimas mais severas, quando se é transmitido uma quantidade maior de energia à peça. Isto se verifica em parte dos resultados obtidos, como nas peças quatorze e oito. A não ocorrência desta separação dos níveis de queima nas demais peças pode ser resultado de uma incoerente classificação da queima, uma vez que esta foi feita a olho nu.

4.2. CFAR

De modo semelhante ao RMS se obteve a estatística CFAR.

A Figura 8 mostra o resultado alcançado para a peça 8. As linhas vermelhas representam a queima-severa (QS), as linhas laranja a queima-média (QM), as linhas amarelas representam a queima-leve (QL) e as linhas verdes os locais sem queima (SQ).

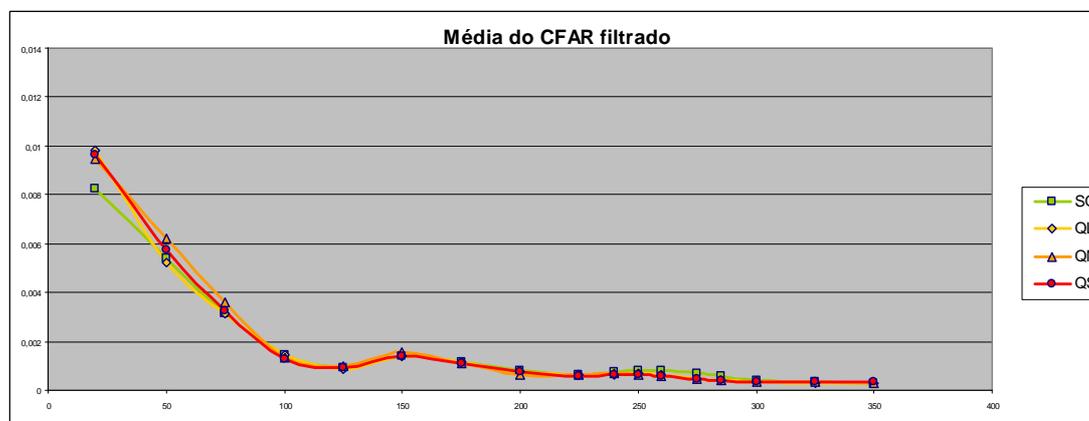


Figura 8. Gráfico CFAR obtido para a peça 8.

Das estatísticas estudadas, a taxa de alarme falso constante (CFAR) foi a que menos apresentou resultados favoráveis ao objetivo do trabalho. Não ocorre a separação das curvas como no caso do sinal RMS, estando todas elas sobrepostas. Porém, mesmo que não tão significativos, ainda se verificam aumentos na amplitude das curvas resultantes

do processamento digital do sinal puro de EA para o parâmetro entre 125 e 200kHz, semelhante ao ocorrido para o sinal RMS.

4.3. Counts

Como detalhado anteriormente, o parâmetro Count foi aplicado a cada sinal filtrado de EA. A Figura 9 apresenta o resultado obtido para a peça 8. As linhas vermelhas representam a queima-severa (QS), as linhas laranja a queima-média (QM), as linhas amarelas representam a queima-leve (QL) e as linhas verdes os locais sem queima (SQ).

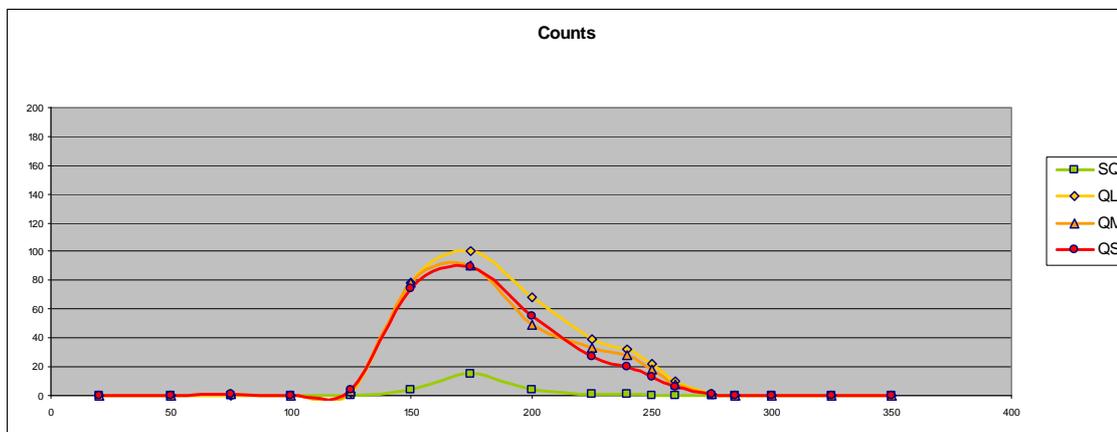


Figura 9. Gráfico de Count obtido para a peça 8.

Assim como nos resultados do processamento da estatística RMS, ocorre um aumento significativo na amplitude dos gráficos entre as frequências 125 e 250kHz, estando o pico das curvas concentrado na maioria dos casos entre as frequências 150 e 175kHz, o que significa que o sinal filtrado nestas bandas de frequência tem mais chances de passar alguma informação durante o processo de usinagem em tempo real.

A separação da queima também é notável nas curvas resultantes do processamento digital do sinal puro de EA para o parâmetro Counts, de modo muito semelhante ao parâmetro RMS. A não ocorrência desta separação dos níveis de queima em algumas peças ainda pode ser resultado de uma incoerente classificação da queima.

4.4. MARSE

Como detalhado anteriormente, o parâmetro MARSE foi aplicado a cada sinal filtrado de EA. A Figura 10 apresenta os resultado obtido para a peça 8. As linhas vermelhas representam a queima-severa (QS), as linhas laranja a queima-média (QM), as linhas amarelas representam a queima-leve (QL) e as linhas verdes os locais sem queima (SQ).

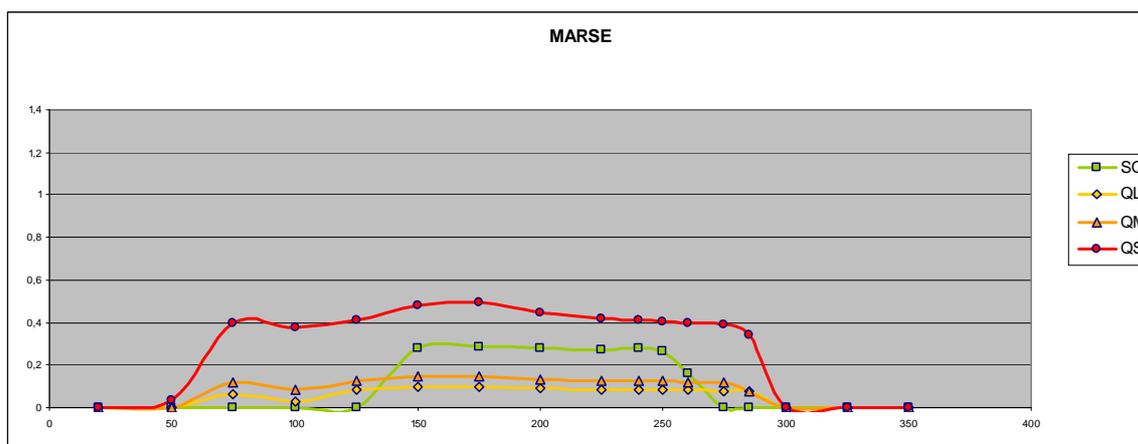


Figura 10. Gráfico de MARSE obtido para a peça 8.

Os resultados para o parâmetro MARSE foram menos conclusivos com relação ao aumento na amplitude do sinal processado, que neste caso vai de 50 a 300kHz; dificilmente se nota o pico do sinal que vem ocorrendo nos outros resultados, geralmente entre as frequências 150 e 175kHz.

Por outro lado, a separação das curvas é mais notável no processamento digital do sinal puro de EA para o parâmetro MARSE, até mesmo para a peça cinco, onde as queimas foram classificadas todas como leve. Assim, o parâmetro MARSE se mostrou mais atuante na separação das curvas, tendo maior amplitude as curvas que representam a área do corpo de prova que mais recebeu energia durante o processo.

5. CONCLUSÕES

Após análise dos gráficos construídos a partir das estatísticas, pode-se notar bandas de frequência onde as amplitudes são mais significativas; na maioria das peças estas bandas estão entre 125 e 200kHz, com picos entre 150 e 175kHz. Com exceção da peça cinco que manteve seu pico de amplitude por volta de 225kHz em todas as estatísticas estudadas. Na peça doze também nota-se um segundo pico de amplitude perto de 225kHz nos sinais processados para a estatística Counts.

Teoricamente, tratando-se de energia, a amplitude de uma curva onde a queima é mais grave deve ser maior que a amplitude de uma curva onde a queima não é tão significativa, pois a agitação do sinal é maior para queimas mais severas, quando se é transmitido uma quantidade maior de energia à peça. Isto se verifica em parte dos resultados obtidos, como nas peças quatorze e oito. A não ocorrência desta separação dos níveis de queima nas demais peças pode ser resultado de uma incoerente classificação da queima, uma vez que esta foi feita a olho nu.

Os parâmetros RMS e Counts se mostraram mais viáveis para futuros estudos destas faixas de frequência onde o pico da curva se faz presente na maioria dos resultados, enquanto o parâmetro MARSE se caracteriza melhor pela separação de cada curva, o que pode ser de utilidade na classificação de cada queima. Porém, este parâmetro precisa ser melhor investigado.

Apesar do resultado diferenciado entre as estatísticas, fica clara a existência de faixas de frequência onde as amplitudes dos sinais são mais elevadas, podendo-se usar filtros no sinal puro de emissão acústica para melhor monitorar o fenômeno da queima no processo de retificação.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) que financiaram este trabalho através de apoio financeiro.

7. REFERÊNCIAS

- Aguiar, P. R. et al., 2006, In-process grinding monitoring through acoustic emission. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, São Paulo, v. XXVIII, n. 1, p. 118-124.
- Aguiar, P. R., Bianchi, E. C., Monici, R. D., Catai, R. E., 2006, Analysis of the different forms of application and types of cutting fluid used in plunge cylindrical grinding using conventional and superabrasive CBN grinding wheels. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 46, Issue 2, , p. 122-131
- Akay, M. , 1994, *Biomedical Signal Processing*. San Diego, CA: Academic Press.
- Dornfeld, D. A., 1992, Application of Acoustic Emission Techniques in Manufacturing, In: *NDT&E INT.*, v.25, p. 259-269.
- Dotto, F. R. L. et al., 2006, Automatic system for thermal damage detection in manufacturing process with internet monitoring. In: *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*. 2006, São Paulo, v. XXVIII, n. 2, p. 153-160.
- Gu, R. J., Shillor, M., Barber, G. C., Jen, T., 2004, Thermal analysis of the grinding process. *Mathematical and Computer Modelling*, v. 39, Issues 9-10, p. 991-1003
- Inasaki, I., 1998, Application of acoustic emission sensor for monitoring machining processes. In: *ULTRASONIC*, v.36, n. 1, p. 273-281.
- Inasaki, I., Okamura, K., 1985, Monitoring of Dressing and Grinding Processes with Acoustic Emission Signals. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 34, Issue 1, p. 277-280
- Irani, R.A., Bauer, R.J., Warkentin, A., 2005, A review of cutting fluid application in the grinding process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 45, Issue 15, p. 1696-1705
- Johnson, C. D., 1997, *Process control instrumentation technology*. 5. ed. New Jersey: Prentice Hall.
- Khenaifes, M., 2006, Investigação de novas ferramentas estatísticas e utilização de microcontrolador no monitoramento da queima na retificação plana tangencial. 2006. 166f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Universidade Estadual Paulista, Bauru.
- Kwak, J. S.; Ha, M. K. , 2004, Neural network approach for diagnosis of grinding operation by acoustic emission and power signals. In: *Journal of Materials Processing Technology*, v. 147, n. 1, p. 65-71.
- Kwak, J. S.; Song, J. B. , 2001, Trouble diagnosis of the grinding process by using acoustic emission signals” In: *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 41, p. 899-913.
- Liu, J. B., 1991, *Monitoring the precision machining process: sensors, signal processing and information analysis*. 1991. Thesis (Ph.D. Thesis) - University of California at Berkeley, USA.

- Malkin, S., 1989, Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives. 1. ed. England: Ellis Horwood Limited.
- NDT Resource Center: Introduction to Acoustic Emission Testing. Available at <http://www.ndt-ed.org/index_flash.htm>, 24 May 2010.
- Oppenheim, A. V., Willsky, A. S., 1998, Signals & Systems, Second Edition, Prentice Hall.
- Parks TW, Burrus CS., 1987, Digital Filter Design. New York: Wiley, 209-13.
- Racko, D., 1982, Distortion of acoustic emission signals by a change of gain in the sensing device. NDT International, v. 15, Issue 1, p. 3-8
- Susic, E., Grabec, I., 2000, Characterization of the grinding process by acoustic emission. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 40, Issue 2, p. 225-238
- Wang, Z., 1999, Surface Grinding Monitoring by Signal Processing of Acoustic Emission (AE) Signals, v. 2, p. 11
- Wang, Z., Willett, P., Aguiar, P. R., Webster, J., 2001, Neural network detection of grinding burn from acoustic emission. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 41, Issue 2, p. 283-309
- Webster, J.; Dong, W. P.; Lindsay, R., 1996, Raw acoustic emission signal analysis of grinding process. In: CIRP, Annals of the CIRP, v. 45, n. 1/1995, p. 335-340.
- Webster, J.; Marinescu, I.; Bennet, R., 1994, Acoustic emission for process control and monitoring of surface integrity during grinding. Annals of the CIRP, v. 43, n. 1, p. 299-304.
- Williams CS., 1986, Designing Digital Filters. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluídos neste trabalho.

STUDY OF FREQUENCY CONTENT OF THE ACOUSTIC EMISSION SIGNAL IN THE MONITORING OF GRINDING BURN

Bruno Tomazela¹, brunotomazela@hotmail.com
Paulo Roberto de Aguiar¹, aguiarpr@feb.unesp.br
Uli Scheuerer³, uli.scheu@hotmail.de
Eduardo Carlos Bianchi², bianchi@feb.unesp.br
Jeferson André Bigheti¹, jefersonbigheti@terra.com.br
Marcelo Nicoletti Franchin¹, franchin@feb.unesp.br

UNESP - Universidade Estadual Paulista - Bauru Campus – Departamento de Engenharia Elétrica¹/Mecânica², Faculdade de Engenharia, Luiz Edmundo Carrijo Coube Ave., 14-01, Vargem Limpa, CEP: 17033-360.
Hochschule Regensburg University, ³Fakultät Elektro- und Informationstechnik, Germany.

Abstract. *This work aims at studying the raw acoustic emission signal spectrum for three levels of grinding burn (slight, medium and severe) with the use of digital filtering. The raw acoustic emission was obtained through laboratorial tests and then filtered for obtaining the statistics RMS, CFAR, Count and Marse. The results have shown frequency bands in which the magnitudes of the signals are higher, and therefore the usage of filtering with selected frequencies in the raw acoustic emission signal can be very useful for monitoring the grinding burn.*

Key words: *grinding process, acoustic emission, thermal damages, signal processing.*