

# CONTRIBUIÇÃO AO DESENVOLVIMENTO DA MONITORAÇÃO DE PROCESSOS DE FRESAMENTO VIA EMISSÃO ACÚSTICA

**César Abraham Flores Cisneros**

Depto. de Eng. Mecânica e Metalurgia, Escola de Engenharia Mauá, Praça Mauá, 1, São Caetano do Sul – SP - [cesarflorescisne@maua.br](mailto:cesarflorescisne@maua.br)

**Carlos Shiniti Muranaka**

LMAG - PEA – Escola Politécnica da USP – Av. Prof. Mello Moraes, 2231 - 05508.900 São Paulo - SP – [shiniti@pea.usp.br](mailto:shiniti@pea.usp.br)

**Gilmar Ferreira Batalha**

Laboratório de Engenharia de Fabricação – Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Av. Prof. Mello Moraes, 2231 05508.900 São Paulo - SP – [gilmar.batalha@poli.usp.br](mailto:gilmar.batalha@poli.usp.br)

**Resumo:** *A cadeia da instrumentação para o monitoramento do desgaste da ferramenta por emissão acústica está constituída por sensores, condicionador de sinal, conversor A/D e transmissor. A seleção ou projeto de cada uma das etapas é de suma importância para manter o conteúdo do sinal de emissão acústica (neste caso a fonte de emissão acústica é a usinagem). O sinal de emissão acústica de interesse tem componentes que vão dos 100kHz a 1 MHz. Devido às características do projeto, são desenvolvidos o condicionador e o transmissor. São apresentados os projetos do pré-amplificador e filtro (que pertencem ao condicionador), os quais realizam suas respectivas funções de amplificação e filtragem. O pré-amplificador, cuja função é a de fortalecer o sinal fraco na saída do sensor, amplifica o sinal em 20 dB. Ele tem uma resposta plana na faixa de interesse (frequências inferiores a 1 MHz). O filtro, que é do tipo passa banda, tem por função eliminar as componentes vinculadas às vibrações mecânicas e os ruídos elétricos e eletromagnéticos, assim como evitar o fenômeno do “aliasing” no processamento do sinal. Ele não deixa passar as componentes do sinal de frequências inferiores a 100 kHz e superiores a 1 MHz. Tem uma resposta plana na banda de interesse, o que garante a manutenção do formato do sinal. São consideradas nos projetos indicados as respostas dos componentes eletrônicos para as frequências de trabalho e a proteção dos circuitos contra ruídos na alimentação dos mesmos.*

**Palavras Chaves:** *monitoramento, desgaste, fresa de topo, instrumentação, EA.*

## 1. INTRODUÇÃO

O monitoramento de desgaste da ferramenta por emissão acústica, corresponde ao acompanhamento do desgaste da ferramenta durante a usinagem, via processamento de um sinal de emissão acústica. Este tipo de monitoramento corresponderia a um tipo de medição indireta do desgaste da ferramenta. Aproveitamos o fenômeno das deformações superficiais tanto na ferramenta como na peça, para associar estas ao estado da ferramenta. O sinal é captado por um sensor de emissão acústica encostado na ferramenta e/ou na peça, logo, o sinal é condicionado, digitalizado, transmitido para posteriormente ser processado num PC. Medições diretas do desgaste da ferramenta proporcionam dados mais precisos do seu estado. Medições indiretas são menos

precisas porque nestas associamos um fenômeno físico ao estado da ferramenta (em geral, força ou conseqüências desta, tais como, torque, deformação, vibração, etc).

Nesse sentido, no caso de medições indiretas é de suma importância a qualidade do sinal que chega no PC para garantir bons resultados. Em geral, sensores, condicionadores, placas conversores, transmissores são fornecidos, já prontos, por empresas especializadas. No nosso caso, onde instrumentalizamos a ferramenta, tanto o condicionador como o transmissor, ambos foram desenvolvidos para esta aplicação específica, por problemas de operação e montagem. Procurando respeitar a característica do projeto, a de manter a qualidade do conteúdo do sinal (formato), neste trabalho apresentamos o desenvolvimento de duas etapas do projeto do condicionador do sinal, a pré-amplificação e a filtragem, chegando a resultados corretos que garantem a confiabilidade do sinal a ser processado.

## 2. A USINAGEM COMO FONTE DE EMISSÃO ACÚSTICA

Eventos dentro de um corpo dão lugar a sinais de EA. Ondas elásticas são geradas devido a alterações de tensão na região do volume V (figura 1). Estas ondas se propagam em forma esférica como um distúrbio mecânico através da estrutura, causando deslocamentos na superfície  $u(t)$ . O valor de  $u(t)$  varia com a posição da fonte e do receptor pelos motivos seguintes: i) o frente de onda cresce com a distância entre a fonte e o receptor, ii) a direção da fonte, e iii) reflexões e refrações dos frentes de onda numa superfície livre.

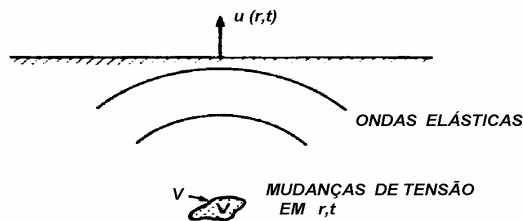


Figura 1. Processo de Emissão Acústica.

A fonte de EA aparece como alterações de tensão e de tração na superfície da estrutura.

A saída do sensor depende da magnitude e da direção do deslocamento na superfície. A informação da fonte ao sensor é transmitida nas diferentes frequências. Existe uma relação entre o tipo de sensor e a detectabilidade do sinal (tabela 1).

Tabela 1. Transdutores de EA, banda de frequência e sinal mínimo detectável.

Tipo de Sensor	Passa banda [megahertz]	Sensibilidade [metros]
Resposta plana PZT	0.1 a 2	$10^{-13}$
Ressonante PZT	0.1 A 0.3	$10^{-14}$

Uehara, 1984, buscou entender a relação entre emissão acústica e os mecanismos de corte. A primeira contribuição desta pesquisa está relacionada com a instrumentação,

com a colocação de sensores tanto na peça como na ferramenta. As hipóteses iniciais levantadas são confirmadas com os resultados experimentais. Estas são:

- o sinal do sensor montado na ferramenta, que mede deslizamentos do cavaco com a ferramenta e da ferramenta com a peça;
- o sinal do sensor montado na peça, que mede a deformação plástica e a ruptura, acontecidos no plano de cisalhamento, e também, o deslizamento da ferramenta com a peça.

Kannetey-Asibu e Dornfeld, 1981, e Blum e Inasaki, 1990, desenvolveram uma relação teórica entre EA e o processo de usinagem por corte em metais, relacionando a energia contida no sinal de EA com a deformação plástica ocorrida no processo de corte. O estudo permite comparar em forma teórica e experimental o valor RMS do sinal com os parâmetros de usinagem. Eles realizaram testes tanto em alumínio e aço carbono SAE 1020, variando as velocidades de corte e o ângulo de saída da ferramenta. Pela definição de fonte de EA, processo que é capaz de produzir mudanças na estrutura interna do material, o trabalho de deformação plástica no processo de corte é uma fonte de EA. Na liberação de energia de deformação aplicada são produzidas ondas elásticas no material, que causam deslocamentos na superfície que podem ser adquiridas como sinal de EA. Relacionando as razões de trabalho das zonas primária e secundária (figura 2) como fontes de EA, a relação entre o sinal emitido e os parâmetros de usinagem é dada pela expressão seguinte:

$$RMS = C_4 \operatorname{sen} \gamma \left[ \tau_k b_1 U \left( \frac{\cos \gamma}{\operatorname{sen} \phi \cos(\phi - \gamma)} \right) t_1 + \frac{1}{3} (l + 2l_1) \frac{\operatorname{sen} \phi}{\cos(\phi - \gamma)} \right] \quad (1)$$

onde:  $b_1$  e  $t_1$ , são respectivamente a largura e a espessura do material na zona primária;  $\tau_k$ , é a tensão de cisalhamento do material;  $\gamma$  e  $\phi$ , são respectivamente os ângulos de saída e o de corte da ferramenta; e  $U$ , é a velocidade de corte.  $l_1$  é a distância onde ocorre deformação (zona de aderência);  $l$  é a distância total (zona de aderência e de deslizamento com atrito).

A informação contida no sinal pode ser aproveitada considerando: 1) a amplitude, 2) o número de picos acima de um valor pré-definido de amplitude, e 3) medindo a energia contida neste. Conforme a relação (1), Kannetey-Asibu e Dornfeld, 1981, no caso da usinagem, a energia contida no sinal, é o tipo de informação de interesse para o monitoramento do desgaste.

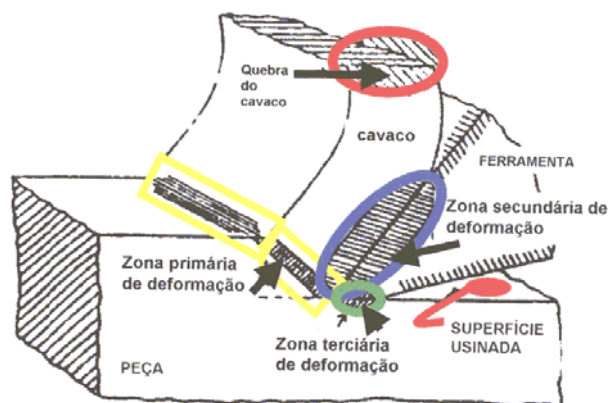


Figura 2. Deformações nas Zonas de Corte. Conforme Blum e Inasaki, 1990.

### 3. MONITORAMENTO DE DESGASTE DE FERRAMENTA POR EA

A cadeia de instrumentação no monitoramento de desgaste por EA é apresentada na figura 3.

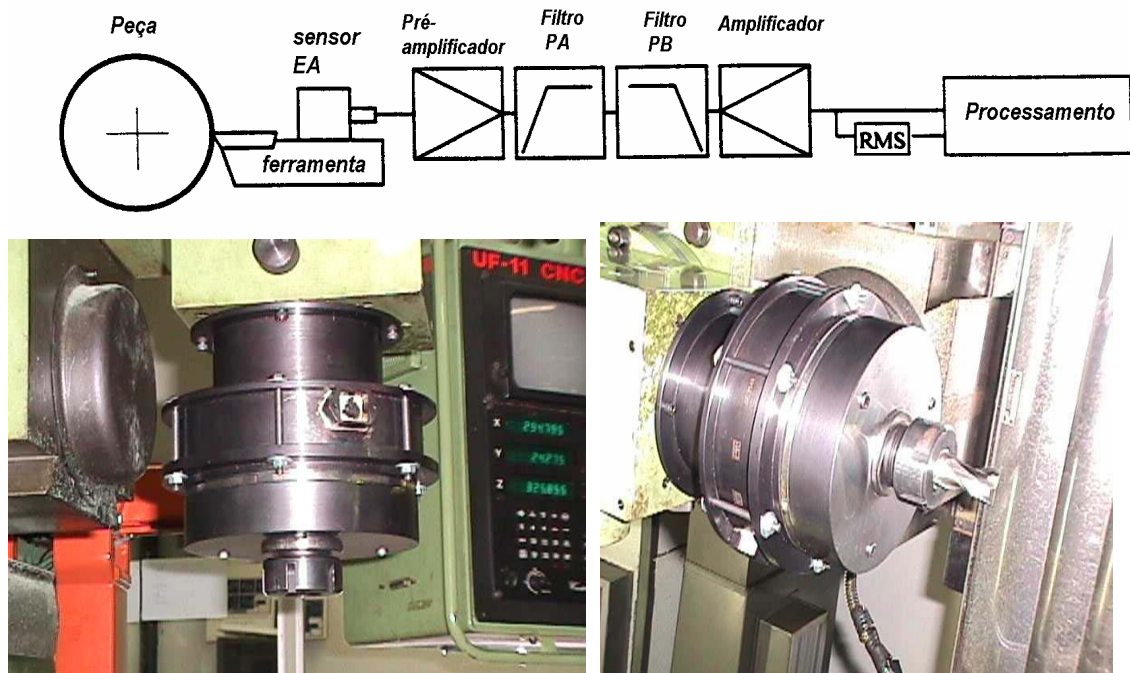


Figura 3 Fluxograma e sistema proposto e construído para aquisição do sinal de EA.

Nela a fonte de EA é o processo de usinagem (fresamento de topo). Os sinais de emissão acústica podem ser aproveitados diretamente da ferramenta, da peça, do corpo da máquina, etc. Na presente pesquisa, foi desenvolvida uma instrumentação para realizar aquisição simultânea da ferramenta e da peça. A instrumentação da peça é fácil e pode ser realizada com o uso de componentes comerciais. Já a instrumentação da ferramenta, pelas particularidades da aplicação precisa de desenvolvimento específico. Para levar a informação exata da fonte de EA (usinagem) até o processador (PC), é importante tomar algumas considerações em relação aos sensores e ao circuito de condicionamento do sinal (pré-amplificador e filtros).

### 4. SENSORES

Na pesquisa usamos transdutores de EA os quais contém cerâmicos piezo-elétricos. O fenômeno piezo-elétrico foi descoberto por Pierre e Jacques Curie em 1880. É uma propriedade exibida por certos materiais cristalinos. Quando aplicada uma pressão mecânica a um destes materiais, a estrutura cristalina produz uma tensão proporcional a pressão exercida. Quando aplicado um campo elétrico, a estrutura cristalina cambia de forma, produzindo câmbios dimensionais no material. No caso, da medição dos deslocamentos superficiais no material devido ao processo de usinagem nele realizado, é nosso interesse que o transdutor converta estes deslocamentos em tensão elétrica, como mostrado na figura 4.

Existem cerâmicos piezo-elétricos ressonantes e não ressonantes. Os ressonantes trabalham entorno da ressonância mecânica do cerâmico piezo – elétrico. Numa curva de resposta em freqüência do cerâmico, este trabalharia entre as freqüências de ressonância ( $f_m$ ) e anti-ressonância ( $f_n$ ), como mostrado na figura 5, e mais próximo da

frequência de ressonância para multiplicar a saída do transdutor quando aplicado um estímulo (a fonte a ser medida deve gerar sinais com frequências entorno da frequência de ressonância do cerâmico). Já os cerâmicos não ressonantes, trabalham bem por debaixo da frequência de ressonância do cerâmico, produzindo uma resposta uniforme numa banda ampla de frequência.

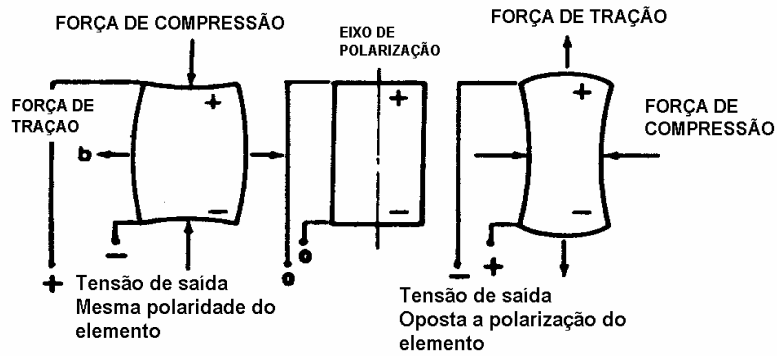


Figura 4 Tensão piezo – elétrica devida a aplicação de forças.

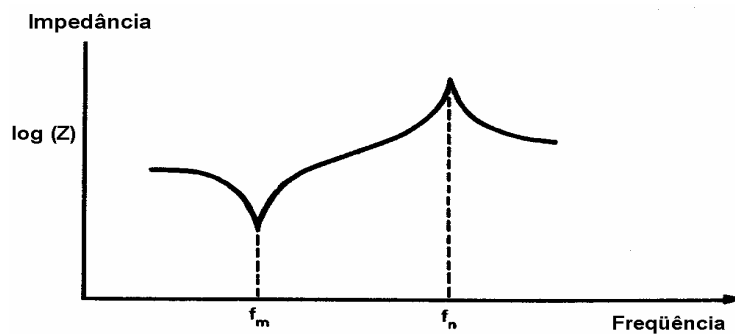


Figura 5 Característica Impedância-Frequência do cerâmico PZT ressonante.

Lembrando dos objetivos da instrumentação para o monitoramento do desgaste, devemos procurar conservar a informação contida no sinal de EA (fonte a usinagem do material) sem alteração, nesse sentido é de interesse a seleção de cerâmico piezo elétrica não ressonante. Um esquema de um transdutor de EA é apresentado na figura 6.

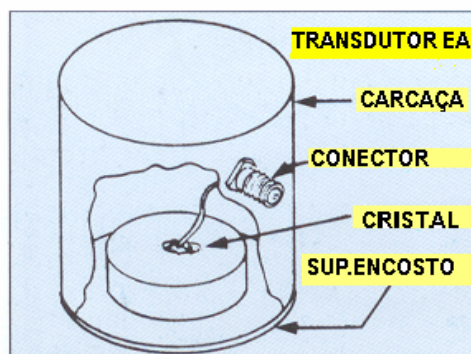


Figura 6 Estrutura de um transdutor de EA como utilizado na pesquisa.

## 5. CONDICIONADOR DO SINAL

Os sensores de emissão acústica (piezo elétricos), transformam a energia mecânica em energia elétrica (não necessitando de excitação externa). O sinal por ele produzido é um sinal fraco que pode ser alterado por ruídos no percurso do sensor ao circuito condicionador. Uma boa técnica é fortalecer este sinal logo após o sensor Shiwa, 1992, PHYSICAL ACOUSTIC CORPORATION, 1997. O circuito proposto, tomando em consideração o FET recomendado por Shiwa, 1992, é o apresentado na figura 7. Este circuito corresponde ao circuito FET com polarização fixa, Boylestad, 1996. Este circuito é apresentado na figura 8 e o seu circuito equivalente, na figura 9.

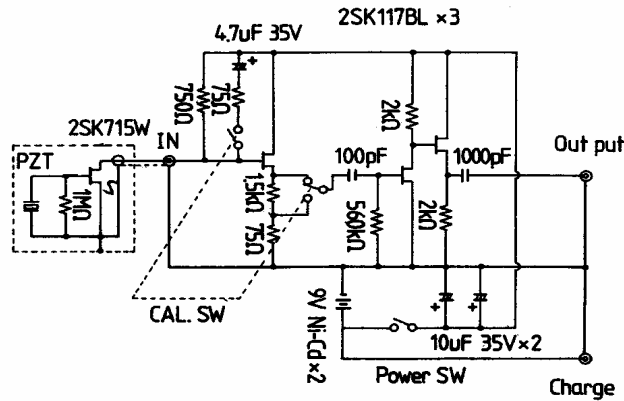


Figura 7. Circuito Pré Amplificador, Shiwa, 1992.

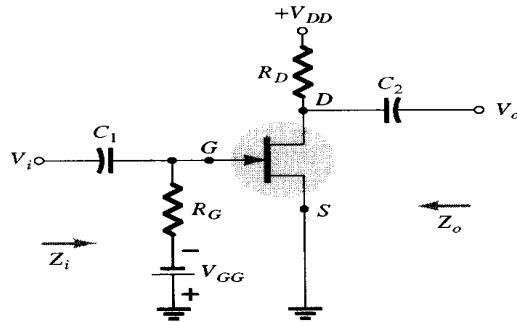


Figura 8. Configuração do FET com polarização fixa, Boylestad, 1996.

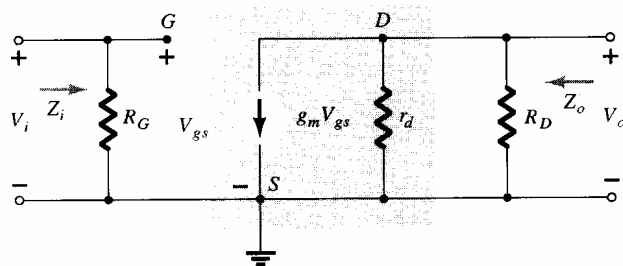


Figura 9. Circuito equivalente do circuito da figura 4.13, Boylestad, 1996.

O valor da impedância de entrada  $Z_i$  corresponde ao valor de  $R_G$ . Foram testados os valores de  $1\text{ M}\Omega$ , SHIWA, 1992 e  $10\text{ M}\Omega$ , Hamstad, 1995, resultando nas curvas das figuras 10 e 11, levando-nos a escolher o valor de  $1\text{ M}\Omega$ . Este valor permite-nos manter o formato do sinal na faixa de frequências desejado.

O circuito de pré-amplificação proposto, fig. 12, contempla as características de: (1) amplificação do sinal (19,2dB), (2) ter uma resposta plana na faixa de frequência do projeto (100kHz-1MHz) e (3) serve como “buffer” do circuito condicionador do sinal ( $Z_i=1M\Omega$ ,  $Z_o=129\Omega$ ).

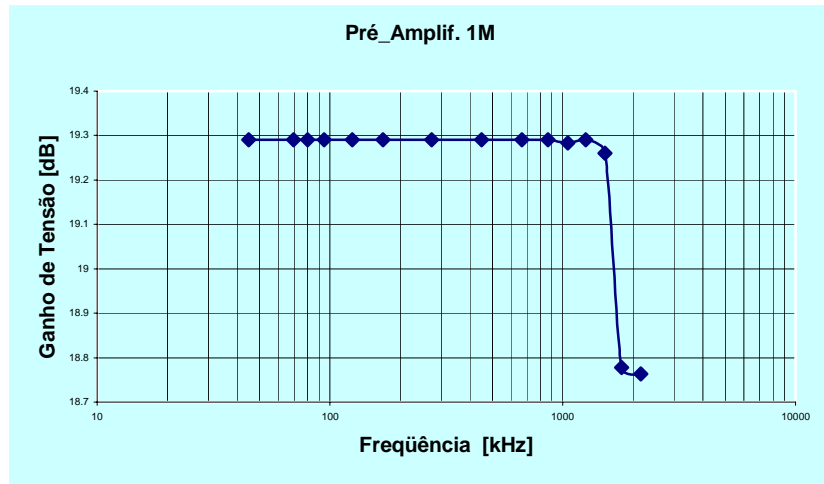


Figura 10. Resposta em frequência de pré amplificador,  $R_G = 1 M\Omega$ .

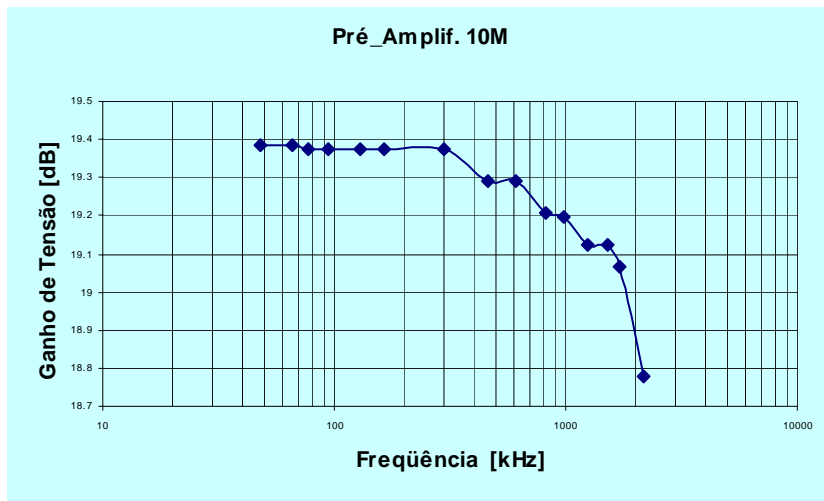


Figura 11. Resposta em frequência de pré amplificador,  $R_G = 10 M\Omega$ .

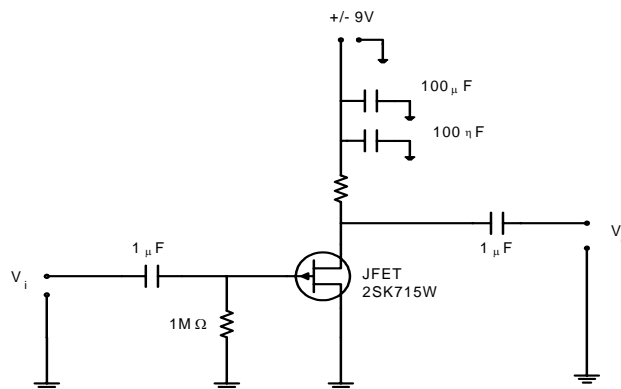


Figura 12. Circuito Pré Amplificador.

## 5. FILTRO PASSA BANDA

No condicionamento do sinal (eletrônica pela qual passa o sinal antes de ser processado), uma das etapas é a de filtragem. Um dos circuitos no condicionamento do sinal é o filtro passa banda. Nesse projeto ele é composto de dois filtros montados em cascata. Primeiro um filtro passa alto seguido de um filtro passa baixo.

A finalidade do filtro passa alto é a de eliminar os componentes do sinal associadas as vibrações mecânicas e alimentação elétrica da rede que não são de interesse para a análise e que desta forma se constituem em ruídos contidos no sinal. Já o filtro passa baixo permite eliminar os ruídos correspondentes a sinais eletromagnéticos e impedir o fenômeno do “aliasing” na análise em frequência do sinal. Na cadeia da instrumentação (fig. 4) para o Monitoramento de Desgaste por Emissão Acústica, o sensor que se encontra na frente de todos os componentes, se constitui num filtro, pois este apresenta uma banda de resposta em frequência. Desta forma o filtro passa banda do condicionador do Sinal tem por função delimitar com precisão a banda de interesse.

Pelas características do nosso sistema o filtro passa alto deverá ter uma frequência de corte em torno dos 100 kHz. Já o filtro passa baixo uma frequência de corte em torno de 1 MHz. No projeto de condicionador do sinal, consideramos filtros Butterworth, por ter como característica principal, uma resposta plana na banda de frequência. Dentro do espírito da pesquisa, esta característica é de suma importância. O sinal de interesse que passa por este filtro não sofre modificações na amplitude do mesmo. Consideramos também no projeto circuitos Sallen-Key de ganho unitário, deixando a amplificação para os módulos dedicados para esta finalidade (o pré-amplificador com FET e o amplificador inversor).

Os valores dos componentes adotados e calculados para o filtro passa baixo são:  $C_{10} = 100 \text{ pF}$ ,  $C_{11} = 200 \text{ pF}$ ,  $C_{12} = 50 \text{ pF}$  e  $R = 1320 \text{ } \Omega$  que correspondem aos valores dos componentes mostrados no circuito da figura 13.

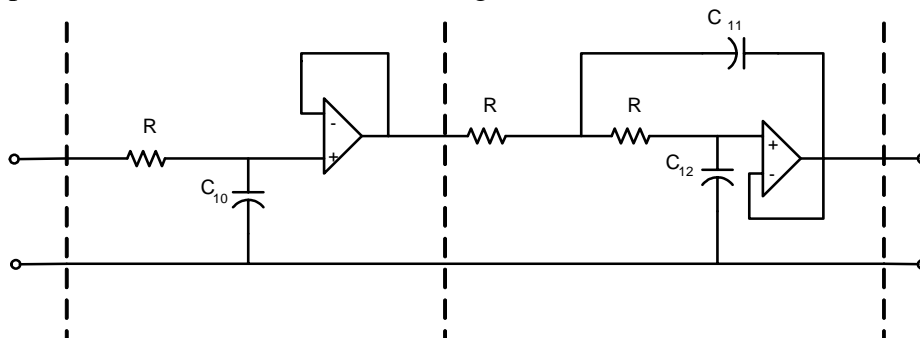


Figura 13. Filtro passa baixo de resposta Butterworth, circuito Sallen-Key de ganho unitário de terceira ordem.

Os valores dos componentes adotados e calculados para o filtro passa alto são:  $C_{10} = 1 \text{ nF}$ ,  $R_{10} = 1869 \text{ } \Omega$ ,  $R_{11} = 935 \text{ } \Omega$ ,  $R_{12} = 3738 \text{ } \Omega$ , que correspondem aos valores dos componentes mostrados na figura 14.

São características importantes do projeto do filtro passa banda (filtro passa alto + filtro passa baixo) as seguintes:

- Uso de amplificador operacional LM 318 de alta taxa “slew rate” (50 V/ $\mu$ s);
- Ligação de capacitores de filtro (0,1  $\mu$ F) nas alimentações dos CI(s) para impedir a entrada de ruídos no circuito;



- O uso de capacitores de poliéster que são mais estáveis termicamente, que permitem trabalhar a temperaturas maiores (as de usinagem) sem alterar seu comportamento durante a operação.

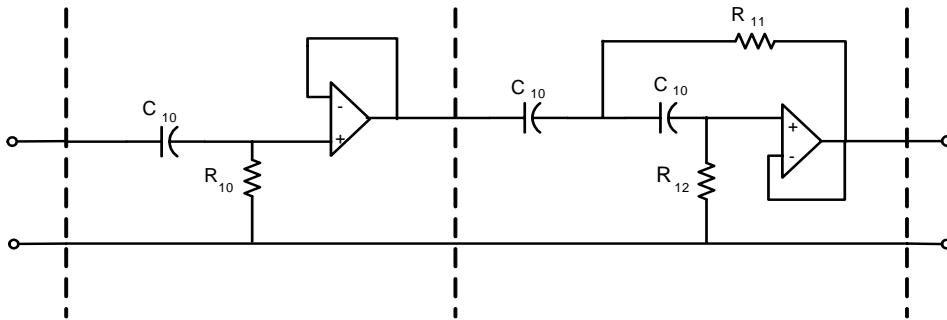


Figura 14. Filtro passa alto de resposta Butterworth, circuito Sallen-Key de ganho unitário de terceira ordem.

O filtro passa banda projetado e montado, foi testado no laboratório um sinal senoidal variando a frequência desta para verificar o comportamento do filtro. A curva da resposta em frequência é mostrada na figura 15. Pode-se observar que se cumprem as características das frequências de corte e a planicidade da banda de frequência do filtro necessárias na instrumentação no monitoramento de desgaste por emissão acústica (eliminação dos ruídos, evitar o “aliasing” e não distorcer o sinal no passo pelo condicionador de sinal).

AmplInvC2,2pK10+Filt.P.Bn.(PAC1nF)Butterworth3OrdK1, SallenKey,  
CapPoly02,800mV

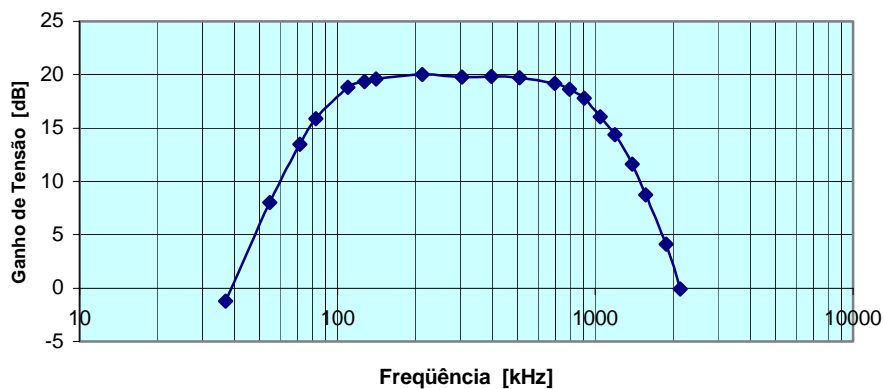


Figura 15. Curva da resposta em frequência do filtro passa banda.

## 6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Verificam-se dentro deste trabalho as seguintes conclusões:

- O pré-amplificador amplifica o sinal em 20 dB, sem produzir deformação no sinal de origem (resposta plana, na faixa de interesse, frequências inferiores a 1 MHz).
- O filtro passa banda permite a passagem das componentes superiores a 100 kHz e inferiores a 1 MHz, faixa de interesse, onde serão analisadas componentes vinculadas ao processo de usinagem. Devido a resposta plana do filtro na faixa de interesse, o sinal que passa pelo filtro não sofre deformações no seu conteúdo.

## 7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP, CNPq e CAPES pelas bolsas e verba PROAP.

## 8. REFERÊNCIAS

- Blum, T. & Inasaki, I., 1990, "A Study on Acoustic Emission from the Orthogonal Cutting Process", Trans. ASME – J. Eng. for Industry, v. 112, agosto 1990, p. 203-4.
- Boylestad R.L., Nashelsky L., 1996, "Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos", Sexta Edição, Prentice\_Hall do Brasil, Rio de Janeiro, Brasil.
- Hamstad M.A. & Fortunko C.M., 1995, "Development of practical Wideband high fidelity acoustic emission sensors", SPIE Vol. 2456/281.
- Kannatey-Asibu E. & Dornfeld D.A., 1981, "Quantitative Relationships for Acoustic Emission from Orthogonal Metal Cutting", Trans. ASME - J. Eng. for Industry, v.103, 330-40.
- PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION, 1997, "Acoustic Emission Sensors", Product Bulletin, PAC #112797.
- Shiwa M., Inaba H., Carpenter S.H., Kishi T., 1992, "Development of High-Sensitivity and Low-Noise Integrated Acoustic Emission Sensor", Materials Evaluation, p. 868-74.
- Uehara K. & Kanda Y., 1984, "Identification of chip Formation Mechanism through Acoustic Emission Measurements", Annals of CIRP, Vol.33, p. 71-74.

## 9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

## THE CONTRIBUTION TO DEVELOPING THE MONITORING PROCESS OF END MILLING BY ACOUSTIC EMISSION

**César Abraham Flores Cisneros**

Depto. de Eng. Mecânica e Metalurgia, Escola de Engenharia Mauá, Praça Mauá, 1, São Caetano do Sul – SP , [cesarflorescisne@maua.br](mailto:cesarflorescisne@maua.br)

**Carlos Shiniti Muranaka**

LMAG-PEA-EPUSP, Av. Prof. Mello Moraes, 2231 05508.900 S. Paulo [shiniti@pea.usp.br](mailto:shiniti@pea.usp.br)

**Gilmar Ferreira Batalha**

Laboratório de Engenharia de Fabricação – PMR – EPUSP – Av. Prof. Mello Moraes, 2231 05508.900 São Paulo - SP – [gilmar.batalha@poli.usp.br](mailto:gilmar.batalha@poli.usp.br)

**Abstract:** *The instrumentation for tool wear monitoring by acoustic emission is composed by sensors, signal conditioner, A/D converter and transmitter. The selection or project of each step is very important to keep the container of acoustic emission signal (in this case the source of acoustic emission is the metal cutting). The interesting acoustic emission signal has its components, which comes from 100 kHz to 1 MHz. In spite of the project characteristics, the conditioner and the transmitter are developed. The projects of the pre-amplifier and the filter are presented (they belong to the conditioner), which makes their functions of amplification and filtration. The pre-amplifier's function is to make stronger the weak signal on the response of the sensor, amplifies the signal by 20 dB. It has a flat answer on the frequency range (frequencies less than 1 MHz). The filter, which is the type of flat-band, has the function of eliminating the components connected to the mechanic vibrations and the electric/electromagnetic noises, therefore to avoid the aliasing phenomenon on the signal processing. It doesn't allow to pass the signal components of frequencies lower than 100 kHz and higher than 1 MHz. There is a flat answer on the frequency range, which warrants the maintenance of the signal format. It is considered into the projects indicated the electronic component's answers to the work frequencies and the circuit protection against noises into their feeding.*

**Keywords:** monitoring, wear, end milling, instrumentation, acoustic emission.