

OS FILTROS MECÂNICOS TRABALHANDO PARA A SELETIVIDADE¹

ROBERT A. JOHNSON, COLLINS RADIO GROUP,
ROCKWELL INTERNATIONAL CORP. NEWPORT
BEACH, CALIF.

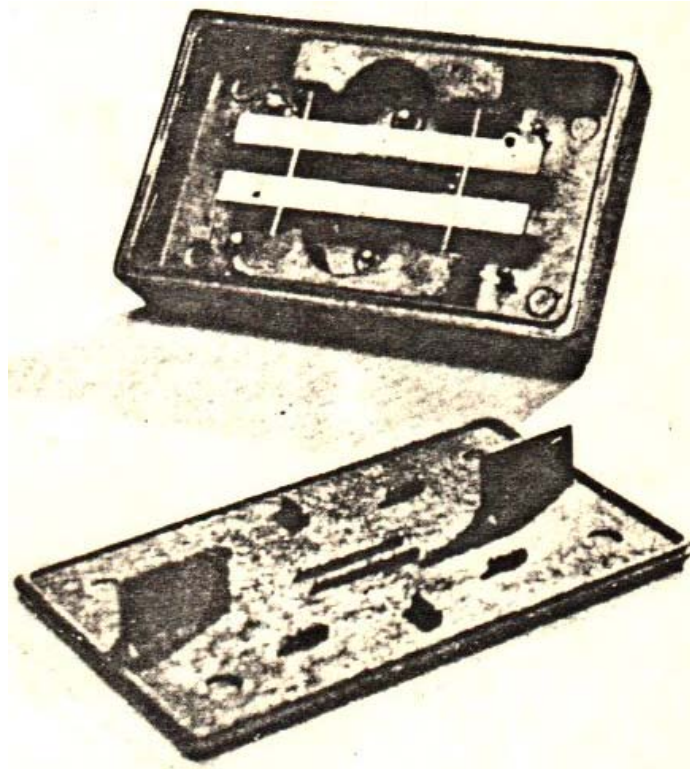
Podem aprimorar sistemas onde a seletividade em alta freqüência, estabilidade e baixo custo são primordiais.

Proporcionar alta seletividade a custo moderado tem sido o trabalho que os filtros passa-banda mecânicos têm realizado silenciosamente durante 25 anos. Como substitutos dos grandes filtros "LC", em receptores AM, ou dos filtros a cristal de quartzo, nos receptores SSB, esses conjuntos de transdutores eletromecânicos e ressonadores mecânicos encontram seu lugar.

Hoje, com aperfeiçoamentos nas técnicas de manufatura e melhores materiais, o filtro mecânico está crescendo em importância. Sob o ímpeto do menor custo e melhor desempenho, ele está se saindo cada vez melhor em aplicações diversas, como equipamentos telefônico, sistemas de navegação, comunicação de dados e sistemas industriais, como controles automáticos à prova de falhas, para trens.

Nas freqüências de 2 a 60 kHz, os filtros mecânicos superam todos os outros tipos de filtros de muitas maneiras, especialmente para larguras de banda estreitas, da ordem de 10 a 200 Hz. Os filtros mecânicos proporcionam seletividade igual ou melhor que os tipos a cristal e os elétricos tipo "LC". Além de serem extremamente dignos de confiança, possuem excepcional estabilidade de freqüência a longo prazo e variam muito pouco em função da temperatura.

¹ Matéria publicada na Revista Nova Eletrônica na seção Engenharia, pp. 87 – 92. No artigo não informa o volume nem a data de publicação.



Embora tenham havido avanços tecnológicos significantes nesses aparelhos, sua construção fundamental não mudou. Eles todos consistem ainda de um par de transdutores eletromecânicos, ligados a ressonadores mecânicos, que são, muitas vezes, estáveis dentro de uma parte por milhão por °C e podem ter um “Q” tão alto como 20.000. Os possíveis tipos de transdutores, ressonadores e elementos de acoplamento são muitos (ver “renovação em filtros mecânicos”, a seguir). Em particular, os filtros mecânicos que satisfazem às exigências dos projetos atuais de baixa frequência e banda estreita, usam barras ressonantes do tipo de flexão e transdutores piezelétricos de cerâmica. Os receptores de navegação Omega, por exemplo, podem entrar nesta classe de filtros mecânicos, devido ao alto “Q” de seus ressonadores, boa linearidade e excelente estabilidade a longo prazo e com a temperatura.

RENOVAÇÃO EM FILTROS MECÂNICOS

Não importa como um filtro mecânico é construído, seu princípio de operação é sempre o mesmo. Um transdutor eletromecânico de entrada (a), aceita um sinal elétrico, convertendo-o em vibração mecânica da mesma frequência. O transdutor pode

ser piezolétrico, feito de cristal ou cerâmica, ou pode ser magnetostritivo, feito de um fio de ferrite ou liga metálica. Com um transdutor piezolétrico, o campo elétrico através do transdutor, entre seus eletrodos, produz uma vibração mecânica de sua placa. Em contraste, a bobina que rodeia um transdutor magnetostritivo gera um campo magnético que faz vibrar a barra do transdutor.

O transdutor eletromecânico do filtro é ligado a um ressonador mecânico, que pode ser um disco, barra, haste ou garfo, ou a vários ressonadores. A ligação pode ser feita tanto indiretamente, com fios de pequeno diâmetro, ou diretamente, com solda ou epóxi, caso em que o transdutor e o(s) ressonador(es) tornam-se um único elemento ressonante, afinado dentro da banda passante do filtro. A energia mecânica pode agora transferir-se do transdutor de entrada ao(s) ressonador(es), até o transdutor de saída, através do acoplamento mecânico. No transdutor de saída, as vibrações do material produzem um campo elétrico ou magnético, que gera um sinal elétrico de saída.

A frequência central de um filtro mecânico é uma função das frequências dos ressonadores, enquanto que a largura de banda depende das dimensões dos elementos de acoplamento, que geralmente são fios de pequeno diâmetro. Da mesma forma o número de ressonadores determina a seletividade do filtro, que é uma medida de quão bem ele rejeita frequências adjacentes.

Filtros mecânicos com larguras de banda maiores que 1 a 2 % da frequência central, requerem Indutores de sintonia ou capacitores conectados em série ou paralelo com os transdutores de entrada e de saída. O gráfico (b) mostra a largura de banda e a frequência central em seus limites, nos modernos filtros mecânicos. A frequência central pode estender-se de 10 Hz até 750 kHz, enquanto a largura de banda pode ser menor que 0,1% da frequência central, ou tão grande quanto 40%.

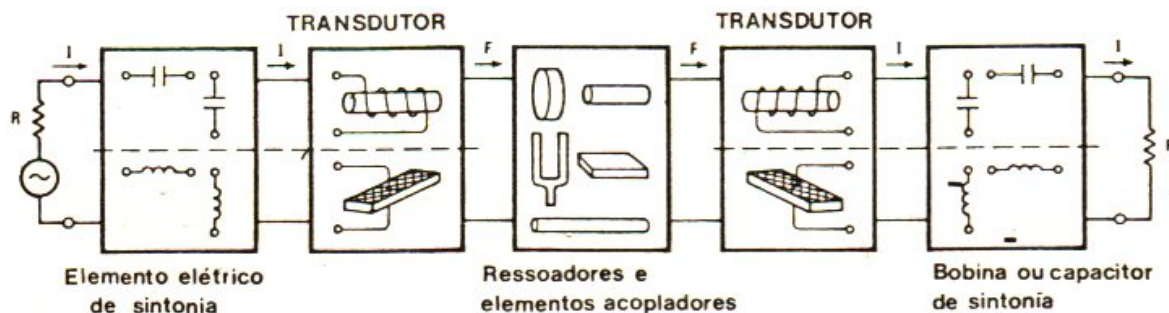


Figura (a)

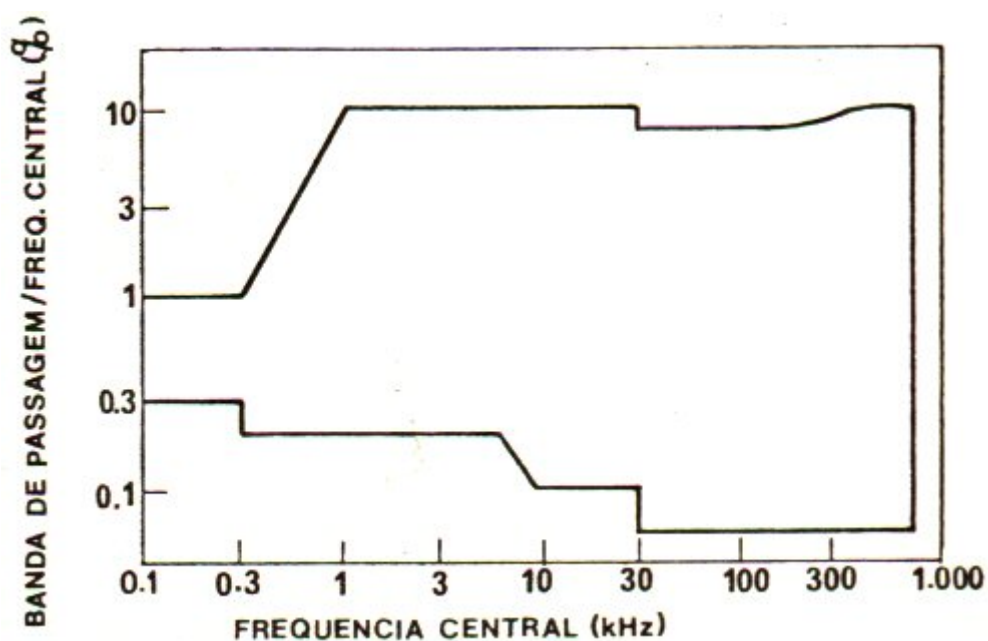


Figura (b)

PARA NAVIOS E AERONAVES

Omega é um sistema de rádio navegação de baixíssima frequência e grande alcance, que proporciona cobertura global para navios e aeronaves. Um sistema de cobertura mundial, de oito estações, transmitindo a 10,2; 11,33 e 13,6 kHz, gera uma rede hiperbólica de linhas de posição, baseada em medições de diferença de fase entre pares de transmissores, para a determinação de posições. Quando um avião ou navio muda de uma rota de meio comprimento de onda para outro, um computa-

dor atualiza sua posição, estabelecendo-a dentro de um raio de uma a duas milhas, em qualquer lugar do mundo. Para conseguir isto, a variação de fase de um sinal Omega, através do receptor, tem que ser mantida estável dentro de aproximadamente 2° , sem depender do nível dos sinais Omega e dos sinais fora de canal.

Muitos receptores Omega operam com um pré-amplificador de antena alimentando um filtro de banda estreita. Uma largura de banda de 25 Hz, a 3 dB, é típica – o filtro deve ter uma banda larga o suficiente para deixar passar trens de pulsos de um segundo de duração, sem distorção; e uma banda estreita o suficiente para detectar sinais pequenos, na presença de ruído. O filtro mecânico é bem indicado para essa aplicação, porque trabalha bem ao longo de uma larga faixa de bandas de frequências, de 10 Hz, no mínimo, até mais de 120 Hz. À medida que a proporção entre a frequência central e a largura de banda aumenta, sobe o “Q” do sistema, assim como sua linearidade e estabilidade.

Esta característica é uma propriedade inerente do filtro de baixa frequência, do tipo de flexão (FIG. 01). O sinal de entrada é aplicado ao eletrodo da parte superior do transdutor piezelétrico de cerâmica e o eletrodo da parte inferior é conectado à terra pela barra de liga ferro - níquel e pela fiação de acoplamento. A tensão através dos eletrodos do transdutor faz a barra expandir-se e contrair-se em seu comprimento, causando a vibração que flexiona toda a estrutura. Os dois ressonadores de liga de cerâmica, em barras, são acoplados mecanicamente por dois fios, de uma forma análoga ao acoplamento dos transformadores ou indutâncias dos ressonadores elétricos, em circuitos de frequência intermediária.

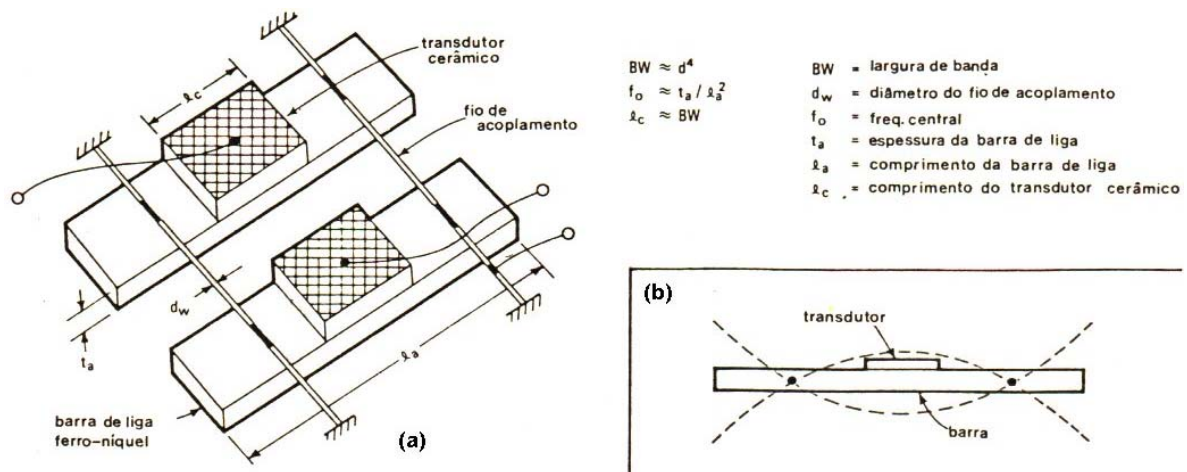


Figura 01 VERSÁTIL – Filtros mecânicos a flexão (a), estão abrindo caminho em telefonia, navegação e “modem”. São simples modelos de dois ressonadores, que empregam transdutores cerâmicos e barras de ferro – níquel. Cada barra vibra em flexão, como é mostrado em (b).

Para bandas estreitas de frequência, tanto o “Q” quanto a estabilidade de frequência devem ser altos a ponto de manter reduzidas perdas por inserção e a distorção do sinal. Reduzindo-se o tamanho do transdutor cerâmico, relativamente ao da barra de liga, que possui maior “Q” e maior estabilidade, produzem-se estes resultados. Em filtros de banda estreita, essa redução nas dimensões é acompanhada de uma redução no acoplamento eletromecânico (quanto menos material transdutor for usado, menor será o acoplamento necessário).

A estabilidade, a longo prazo, do filtro cerâmico a flexão está relacionada à sua largura de banda:

$$\Delta f = 0,02 (Bw) [\log (t/t_0)]$$

onde Δf é a variação na frequência central, Bw é a largura de banda a 3 dB, expressa em Hz e t é o tempo, em dias. O tempo inicial, t_0 , representa o tempo necessário para construir o filtro. Portanto, se t_0 é igual a 10 dias, um filtro Omega que possua uma largura de banda de 50 Hz vai variar menos de 3 Hz em 10 anos.

Igualmente importante é a estabilidade com a temperatura. Para obtê-la, o fabricante do filtro precisa não somente “casar” o tamanho do transdutor com a largura de banda, mas também compensar a variação positiva de temperatura do transdutor de cerâmica, com a variação negativa de temperatura da barra de liga. (O coeficiente de temperatura de frequência da barra de liga ferro - níquel pode ser ajustado por meio de tratamento térmico, para ter uma inclinação no sentido oposto àquele do transdutor). Variação de frequência com a temperatura é, principalmente, uma função da largura de banda e é apenas levemente dependente da frequência central. Por exemplo, um filtro de 50 Hz de largura de banda exibe uma variação de frequência de ± 4 Hz, em 10,2 kHz, ao longo de uma variação de temperatura de $\pm 30^\circ\text{C}$, enquanto que um filtro de largura de banda de 25 Hz varia somente de ± 2 Hz, com a mesma variação de temperatura, mesmo a 13,6 kHz.

Como já foi assinalado, em receptores Omega, a fase do sinal transmitido, na saída do filtro, não pode variar com mudanças na amplitude dos sinais de entrada. As variações de fase, seja qual for o tipo de filtro, são causadas por flutuações na frequência do ressonador, quando o sinal varia em amplitude. Entretanto, em filtros de alto “Q”, tal como um filtro mecânico de baixa frequência, que possui Q's em seu ressonador que vão desde 1.000 até 4.000, a variação é pequena, mantendo geralmente a variação de fase abaixo de $0,5^\circ$

EM CONTROLES AUTOMÁTICOS DE TRENS

Em aplicações do tipo Omega, os filtros são projetados com uma amplitude arredondada da banda passante e uma variação linear de fase versus frequência, de forma a reduzir o “ringing”, devido ao ruído de impulso. Os filtros de baixa frequência, mecânicos, usados em sistemas de controle de trens, precisam ter suas características de fase e amplitude controladas rigidamente. Em tal sistema, são usados filtros tendo 15 diferentes frequências centrais, na faixa de 5 a 10 kHz, para funções do tipo de regulação da velocidade, despacho de trens e segurança.

Oito das 15 frequências centrais são para comando da velocidade do trem, medição e detecção de excesso de velocidade. Os sinais de comando são codificados em variação de frequência, por um par de frequências, relacionado com um código digital de 6 bits, de maneira a se obter oito comandos únicos de velocidades, e uma antena, sob os trilhos, transmite os dados. O receptor do trem detecta os comandos, decodificando a informação por meio de um aparato de oito filtros em “pente” (*comb-set*), de 5 a 10 kHz, com larguras de banda de 28 Hz, bem como controles de precisão para “ringing” e perda por inserção.

Devido à baixa relação sinal-ruído em um sistema de controle automático de trens, as variações na perda por inserção, de filtro para filtro, precisam ser mantidas abaixo de $\pm 0,9$ dB e a apenas $\pm 0,8$ dB, em uma faixa de temperaturas de -20°C até $+65^{\circ}\text{C}$. Para este tipo de rendimento, o Q do ressonador do filtro precisa ser muito alto (por exemplo, da ordem de 2.800).

Apesar de o desempenho elétrico ser crítico, ainda mais importante é a natureza à prova de falhas de construção em escala de um filtro mecânico. A FIG. 02 mostra a topologia de um aparato elétrico em escala, para um filtro mecânico à prova de falhas, que inclui uma barreira mecânica que isola a entrada e a saída do mesmo, evitando, desta forma, qualquer curto entre os estágios. Todos os outros curtos-circuitos são à terra e resultam em saída inexistente. Da mesma forma, qualquer abertura de circuitos, causada por ruptura dos terminais ou fios de acoplamento, produzirá saída nula. Uma condição de saída nula desliga o sistema de controle automático, até que um reparo possa ser realizado, e o trem é operado manualmente, nesse interim.

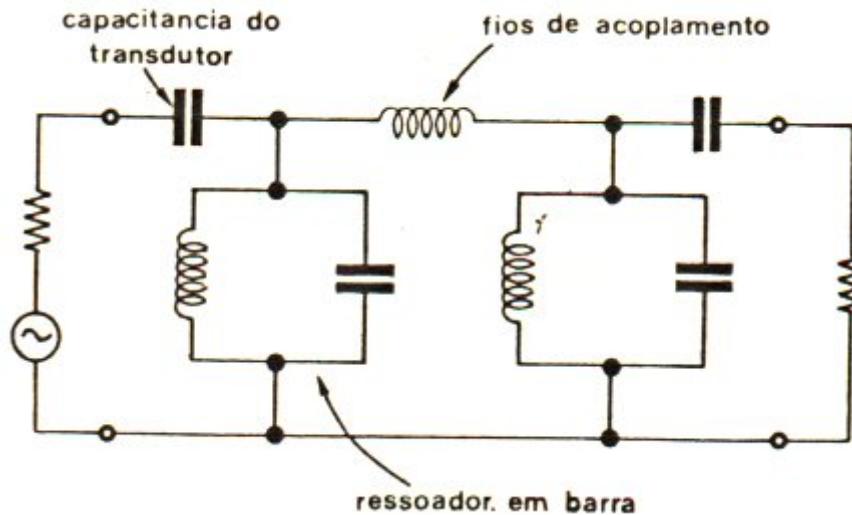


Figura 02 – À PROVA DE FALHAS. Os filtros mecânicos podem ser feitos à prova de falhas, quando munidos de uma barreira mecânica que isola suas seções de entrada e saída. Esta representação elétrica equivalente mostra que qualquer curto à terra ou qualquer circuito aberto nos fios de acoplamento resultaria em saída nula.

Em contraste, um filtro de retícula de cristal não é à prova de falhas, tanto para circuito interrompido quanto para curto-circuito. Além disso, na faixa de 5 a 10 kHz, o volume e peso de um filtro de baixa frequência, mecânico, é menor que um décimo daquele de um filtro de retícula de cristal. A configuração à prova de falhas é o “item maior” dos filtros mecânicos de baixa frequência, que medem, aproximadamente, apenas 5 por 4 cm. Adicionalmente, devido à simplicidade de construção, o tempo médio entre falhas está na ordem de 3×10^7 horas – ou mais ou menos uma falha em 400 partes, em um período de 10 anos. Este é o tipo de confiabilidade necessária, não apenas para sistemas de transporte, mas também para equipamentos telefônico, que é projetado para uma vida longa, de 20 anos ou mais.

FILTROS DE SINALIZAÇÃO PARA TELEFONE

De fato, uma das aplicações mais comuns dos filtros cerâmicos de baixa frequência é a sinalização para circuitos telefônicos. O propósito de um circuito de sinalização é duplo: ele comunica a condição “desocupado” ou “ocupado”, para indicar quando uma chamada telefônica pode ser realizada, e transmite o número que está sendo chamado, por meio dos pulsos do disco. Em todos os sistemas internacionais, e alguns dos domésticos, a sinalização é feita fora da faixa, isto é, a informação da sinalização é mais elevada em frequência que a banda de transmissão de voz e é separada por um filtro de canal de voz. O filtro de sinalização precisa transmitir os dados de pulsos de disco a uma velocidade de 16 pulsos por segundo, de forma que a largura de banda seja, no mínimo, de 50 Hz e, mais comumente, ao redor de 100 Hz.

A filtragem do sinal pode ser obtida em audiofrequências de 3.825 ou 3.850 Hz, ou a frequências intermediárias, que são adjacentes à banda de frequências do filtro de canal de voz. Alguns destes filtros de sinalização usam dois ressonadores, como na FIG. 01; outros, usam indutores de três barras, de entrada e saída, para casamento de impedâncias.

O acoplamento capacitivo entre terminais de entrada e saída de um filtro pode também melhorar a seletividade de fim de banda, que é uma medida da inclinação da resposta, fora da banda passante. A FIG. 03 mostra a resposta em frequências de um filtro de sinalização de dois ressonadores, que tem um capacitor entre sua entrada e saída, dando origem a dois pólos de atenuação (zeros de transmissão). Nas frequências dos pólos de atenuação, a corrente do capacitor é aproximadamente igual em magnitude (mas oposta em fase) à corrente de saída do filtro, causando daí um cancelamento do sinal. A variação de frequência deste filtro é de apenas ± 2 Hz, ao longo de uma faixa de temperaturas de 0°C a 60°C. Em geral, o desvio de frequência será menor que 10 ppm/°C, sem importar o desenho particular do filtro.

O filtro da FIG. 03 é uma unidade de dois ressonadores de 3.825 Hz, que possui uma banda passante de 50 Hz, a 3 dB. Devido à sua largura de banda fracional ser maior que 1%, a perda por inserção, à temperatura ambiente, é nominalmente igual a 1,4 dB, variando menos de $\pm 0,4$ dB entre 0°C e 60°C. Mesmo sendo tão baixa,

esta variação não é baixa o suficiente para algumas aplicações telefônicas, como filtros de tons piloto.

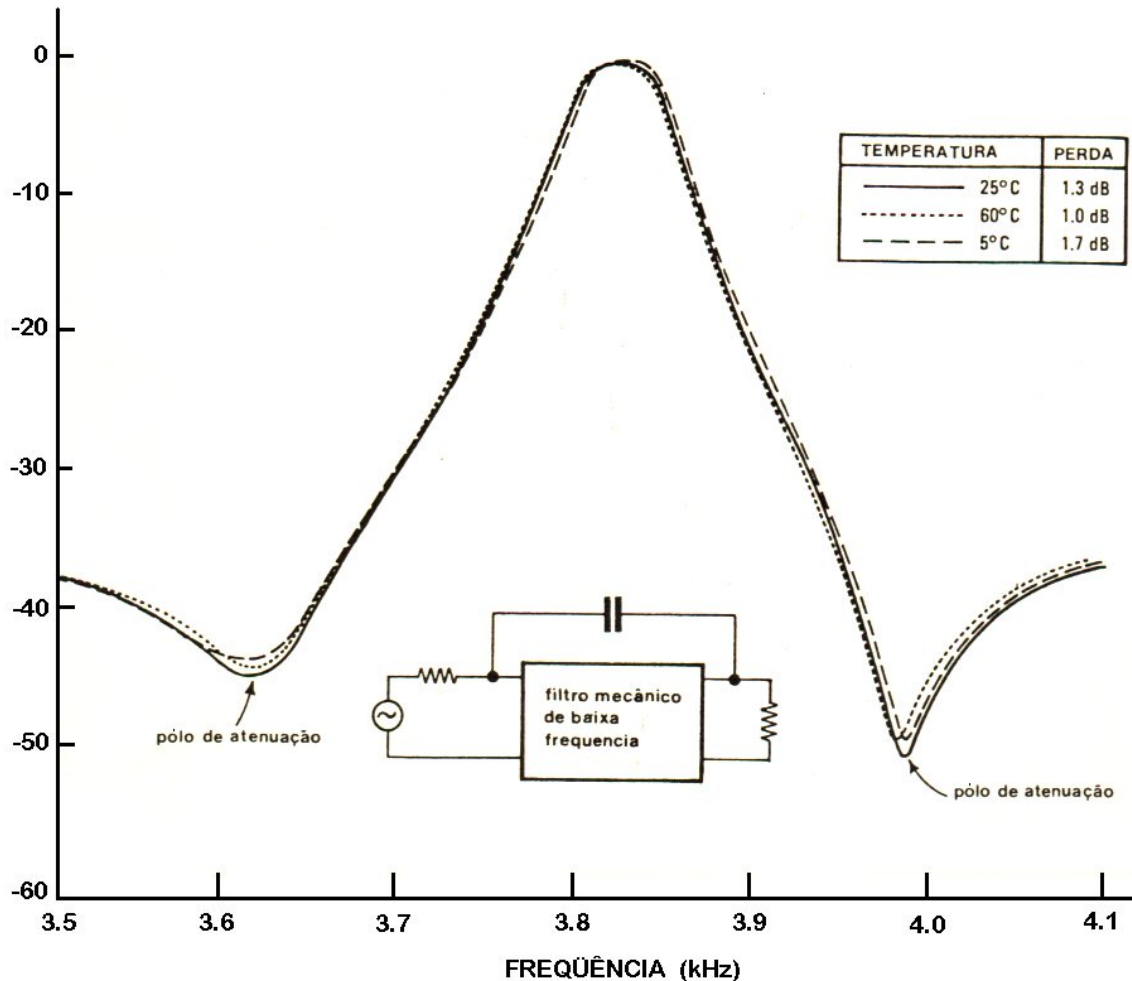


FIGURA 03 – EXTREMAMENTE SELETIVO. Provavelmente o uso mais difundido dos filtros mecânicos seja em circuitos sinalizadores para telefonia. Aqui, um capacitor em ponte é usado em paralelo a um filtro sinalizador de dois ressonadores, para incrementar sua seletividade no fim de banda. O capacitor cria um par de pólos de atenuação.

PARA TONS PILOTO DE TELEFONES, TAMBÉM

Em sistemas de multiplexação de telefonia, os tons pilotos controlam o nível dos sinais recebidos, assim como fazem soar alarmes, em caso de variações anormais do tom de entrada. Para cada grupo de mensagens a ser transmitido, um tom piloto é gerado, em frequências que não interferem com o canal de voz, como, por exemplo, a 84.080 Hz. Esses sinais simples, senoidais e de nível constante, são captados com um filtro de tom piloto de banda estreita e, então, subseqüentemente, são amplificados, detectados e comparados com uma referência fixa, produzindo um diferença (erro) em forma de tensão, que é usada para variar o ganho do sistema. A perda por inserção do filtro não pode variar, sequer com o tempo ou com a temperatura, por ser o nível do sinal em todo o sistema uma função da perda do filtro.

Até recentemente, filtros a cristal de quartzo eram usados no sistema do tom piloto, devido às largas variações de Q dos materiais cerâmicos piezelétricos. No entanto, com o desenvolvimento de materiais cerâmicos estáveis em função da temperatura, é agora possível construir filtros mecânicos de tom piloto que tem menos de $\pm 0,2$ dB de variação, devida à perda por inserção, ao longo de uma faixa de temperatura de 10°C até 50°C. Esses filtros têm dois ressonadores e uma largura de faixa de 28 Hz a 3 dB, em uma frequência central de 12.080 Hz. Nessa aplicação, misturadores pouco dispendiosos podem ser usados para traduzir os tons piloto para uma única frequência, de maneira que somente um tipo de filtro precisa ser desenvolvido, resultando em redução de custos, tanto dos filtros como de seus circuitos associados.

ATÉ MESMO EM “MODEMS” FSK

A mistura de frequências é uma técnica também efetiva para “modems” codificados por frequência (FSK modem), operando na faixa de voz, em canais telefônicos. Ao invés de um filtro para cada canal de dados, dentro do espectro de áudio (por exemplo, a 480 Hz, 720 Hz, 960 Hz, etc.) um único filtro é usado, a uma frequência intermediária, que é então misturada para se obter a frequência desejada, na faixa de áudio. Isto quer dizer que, para um mesmo ritmo de dados, filtros idênticos (exceto

por uma unidade de cristal), podem ser empregados para cada uma das nove frequências básicas. O filtro mecânico desenhado para um ritmo de 150 bits por segundo, tem uma frequência central de 17,04 kHz e uma largura de banda de 120 Hz, que é a diferença entre a marca binária e as frequências do espaço (± 60 Hz, fora da frequência central do canal). Outros filtros mecânicos para “modems” FSK são projetados para velocidades de processamento de 100 ou 75 bits por segundo.

Os filtros mecânicos FSK são usualmente tipos de quatro ou seis ressonadores, com ou sem pólos de atenuação, e também com várias formas de curvas de atenuação da banda passante. Conectando em cascata um par de seções de dois ressonadores e acoplando capacitivamente as seções, proporciona-se ótima seletividade de fim de banda. No entanto, este método tem o problema de ser altamente suscetível a “descasamento” das duas seções. Uma alternativa mais eficiente é conectar em cascata duas seções e, então, inserir um sistema isolador entre elas, ou empregar mais de dois ressonadores por seção, como é mostrado na FIG. 04.

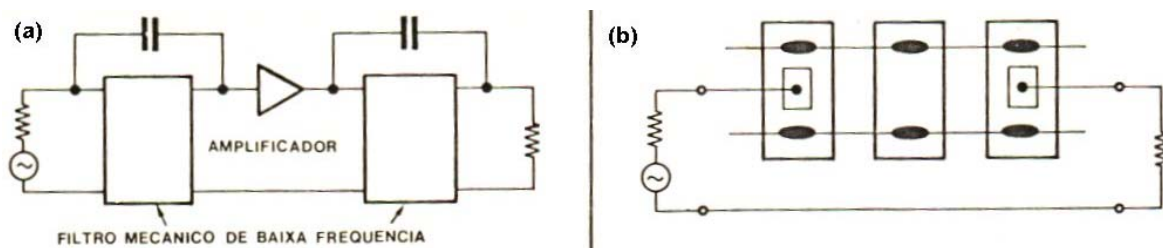


FIGURA 04 – Para aplicações com “modems” codificados em variação de frequência, a seletividade do fim de banda pode ser incrementada de várias maneiras: acoplamento por amplificador (a) ou seções em cascata, empregando mais de dois ressonadores por seção (b), ou mesmo adicionando-se capacitores em ponte.

De todos os desenhos em cascata, utilizados para incrementar a seletividade de fim de banda, o mais fácil de confeccionar é aquele que envolve o acoplamento amplificado de duas seções idênticas. Acoplamento amplificado de seções não idênticas, cada uma das quais realizando diferente curva de resposta, também produz boa

seletividade, mas esta configuração é mais susceptível à frequência do ressonador e a variações de acoplamento, do que aquela com seções idênticas. Seções de múltiplos ressonadores podem também ser conectadas em cascata, com bons resultados.

Ainda maior seletividade é possível, quando usamos conexão em ponte, por meio de capacitor, entre a entrada e a saída das seções de ressonador duplo. Neste caso, a frequência ótima de fim de banda é obtida quando o capacitor em ponte é diferente para as duas seções, de maneira a trazer um par de pólos de atenuação mais próximo à banda passante e permitir ao outro par ficar mais longe, de modo a manter a resposta de fim de banda abaixo de determinado limite.

AS POSSIBILIDADES SÃO NUMEROSAS

Além do sistema de filtros acoplados por fios, que usa barras de flexão, existem inúmeros tipos de filtros mecânicos, tais como diapasões de dois ou três pontas, ressonadores em formato de “H”, barras de flexão multimodo, anéis abertos, etc.. Alguns deles usam acoplamento mecânico entre os ressonadores, enquanto outros usam acoplamento elétrico, em forma de uma escala ou retícula híbrida. Filtros a diapasão têm frequências centrais tão baixas como 300 Hz, enquanto que, aqueles em forma de “H”, podem operar a menos de 100 Hz. Ambos os tipos proporcionam bandas passantes muito estreitas, com menos de 1% da frequência central.

Nas aplicações de filtragem onde as larguras de banda tenham que ser maiores que 1 ou 2%, são requeridos um tamanho menor e maior estabilidade que a de um filtro LC e as bobinas podem ser usadas para ressonar com a capacitância do transdutor. Isto torna possível projetar um filtro mais “largo” que possua seletividade aumentada, desde que as respostas acústicas indesejáveis não estejam dentro da banda passante ou próximas a ela. Quando projetada como um transformador, a bobina de entrada pode ser também usada para “casamento” de impedância ou para redução de resposta para microfones.

Em adição às diversas aplicações examinadas aqui, os filtros mecânicos de baixa frequência são usados em telemetria, receptores de sonar, equipamento de teste, e monitoração de circuitos. Em resumo, eles são ótima escolha, quando a aplicação pede por um filtro pequeno, estável e estreito em banda.

BIBLIOGRAFIA

R. A. Johnson, M. Borner, and M. Konno. "Mechanical Filters: a Review of Progress". IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics. Vol. SU-18. July 1971, pp. 155-170.

R. A. Johnson. "Mechanical Bandpass Filters" in "Modern Theory and Design". ed. G. C. Temes and S. K. Mitra. Wiley, New York. 1973.

D. P. Havens and P. Isais. "Characteristics of Low-Frequency Mechanical Filters". Proceedings of the 1974 Ultrasonics Symposium. Nov. 1974, pp. 599-602.

D. F. Sheahan and R. A. Johnson. "Modern Crystal and Mechanic Filters". IEEE Pres, New York. 1977.

© Copyright revista Electronics Internacional.