

DESENVOLVIMENTO DE UM EQUALIZADOR DIGITAL DE ÁUDIO

HEITOR G. C. FERNANDES, RODRIGO V. ANDREÃO

Coordenadoria de Engenharia Elétrica, Campus Vitória, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
do Espírito Santo - Ifes

Av. Vitória, 1729, 29040-780, Vitória, ES, Brasil

E-mails: heitorfernandes02@hotmail.com, rodrigova@ifes.edu.br

Abstract— Digital processing technologies have diversified the possibilities of audio signal processing, leading to more stability, precision, reliability and flexibility of the systems employed. In case of audio equalizers, substantial advances were made through implementing numerous techniques of digital filters. In this context, this project proposes to explore and utilize these techniques in an embedded system, which enables filters parameterization through an intuitive interface. To reach this purpose, were used techniques of filter implementation in second-order sections, in cascade, stability test and a gradual transition technique of the filter coefficients. The interface developed permits the user to choose among Butterworth, Shelving e Peak filter types. The latter is also capable to change the whole configuration of the following parameters: gain, central frequency and selectivity factor.

Keywords— Digital Audio Processing. Parametric Equalizer. Digital Filters Implementation. Shelving Filters. Peak Filters.

Resumo— As tecnologias de processamento digital têm diversificado as possibilidades de tratamento de sinais de áudio, trazendo estabilidade, precisão, confiabilidade e flexibilidade aos sistemas utilizados. Em se tratando de equalizadores de áudio, os grandes avanços obtidos foram conquistados através do uso de várias técnicas de implementação de filtros digitais. Neste contexto, este trabalho se propõe a discutir e utilizar estas técnicas em um sistema embarcado possibilitando a parametrização dos filtros através de uma interface intuitiva. Para alcançar este objetivo foram utilizadas as técnicas de implementação de filtros em seções de segunda ordem, em cascata, teste de estabilidade e uma técnica de transição gradual dos coeficientes dos filtros. A interface desenvolvida permite ao usuário escolher entre os filtros do tipo Butterworth, *Shelving* e *Peak*, chegando a ser possível, no caso deste último, a total configuração dos parâmetros ganho, frequência central e fator de seletividade.

Palavras-chave— Processamento Digital de Áudio. Equalizador Paramétrico. Implementação de Filtros Digitais. Filtros *Shelving*. Filtros *Peak*.

1 Introdução

O processamento de áudio sempre foi uma necessidade para os meios de comunicação e para sistemas de sonorização profissional. Dentre os diversos tipos de processamento que podem ser feitos para alterar as características do som ouvido e transmitido em um sistema, a equalização pode ser considerada o mais básico.

Segundo Holters e Zolzer (2006) equalizadores são equipamentos que podem ser configurados para enfatizar ou atenuar certas bandas de frequência ou para compensar um reforço não desejado dado por algum outro equipamento ou ainda pela acústica da sala.

No contexto do processamento de sinais de áudio, a tecnologia digital vem tomando o espaço que antes era ocupado pelos dispositivos analógicos. Falando particularmente de filtros digitais, Hirano, Nishimura e Mitra (1974) afirmam que estabilidade, precisão, confiabilidade e flexibilidade são as principais vantagens da tecnologia digital sobre a analógica.

Em se tratando de equalizadores, os digitais têm muitas vantagens sobre os analógicos, isto porque oferecem a chance de, através de técnicas de processamento digital de sinais, solucionar problemas como distorção de atraso de grupo e dificuldade de se alcançar uma resposta em frequência plana. (Fernandes *et al.*, 1999).

Uma importante particularidade da implementação de equalizadores em relação a outros processos de filtragem é a necessidade de se considerar a possibilidade de alteração dos filtros durante a execução. Esta característica pode se tornar crítica caso não seja analisada e tratada, podendo conduzir os filtros a regiões de instabilidade durante as transições, gerando ruídos indesejáveis e comprometendo a qualidade do sinal de áudio. Trata-se de um problema de implementação que não é destacado na literatura.

De modo a resolver tal questão, este trabalho utiliza uma técnica original para contornar este problema, minimizando os efeitos gerados a partir das transições de filtros. A estabilidade do sistema é garantida através do emprego do teste de estabilidade de Schur-Cohn em todas as etapas das transições dos filtros, impedindo que seja estabelecida uma condição instável. Por fim, este trabalho discute o desenvolvimento de um equalizador digital de áudio configurado através de uma tela sensível ao toque, focando em atender alguns problemas de implementação que são aqui discutidos.

2 Filtros digitais

Segundo Manolakis e Ingle (2011) pode-se caracterizar completamente um filtro digital através de sua resposta ao impulso. Entretanto, a resposta ao impulso de um sistema real pode ter um número infinito de amostras com amplitude diferente de zero e não há

condições de realizar computacionalmente a operação de convolução com um vetor de tamanho infinito. Portanto, divide-se os filtros digitais em dois grupos principais: Filtros com resposta ao impulso finita (FIR – *Finite Impulse Response*) e filtros com resposta ao impulso infinita (IIR – *Infinite Impulse Response*).

O projeto de um filtro IIR normalmente parte da função de transferência de um filtro analógico que atenda às especificações requeridas. E a conexão entre o domínio analógico e digital é feita pela transformação bilinear, que se baseia na equação 1 para relacionar os planos s e z . (Oppenheim, Schaffer e Buck, 1999).

$$s = \frac{2}{T} \left(\frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \right) \quad (1)$$

A não linearidade causada pela compressão do eixo das frequências realizada pela transformação bilinear é discutida amplamente por Orfanidis (1997). Ele propõe em seu trabalho uma solução para aproximar o ganho obtido por filtro digitais na frequência de Nyquist aos obtidos pelos filtros analógicos. Porém, para os fins propostos neste trabalho, não foi necessário o uso destas técnicas.

2.1 Implementação de filtros IIR

Em muitos casos, para alcançar a resposta em frequência desejada, se faz necessário utilizar filtros IIR de alta ordem. Em teoria, não existe impedimento em utilizar esta estratégia. Porém o tamanho finito da palavra do processador usado para esta implementação pode causar o chamado ruído de arredondamento que procede do fato de nem todos os números reais poderem ser representados digitalmente. Isto pode causar distorções ou até mesmo levar o sistema à instabilidade. (Kuo, Lee e Tian, 2013).

Para minimizar estes efeitos divide-se o filtro IIR de alta ordem em seções de ordens menores, costumeiramente de segunda ordem, que serão colocadas em cascata. Desta forma, cada seção deve ter dois polos e dois zeros provenientes do filtro original. (Manolakis e Ingle, 2011).

A estabilidade de sistemas digitais pode ser definida pela localização dos polos de sua função de transferência. Porém, sistemas reais que trabalham com filtros digitais não se preocupam em calcular a posição dos polos, o que se tem nestes casos são os coeficientes dos filtros. Deste modo, se fez necessário um método que determine a estabilidade de um filtro tendo acesso somente a seus coeficientes. (Kuo, Lee e Tian, 2013).

Ainda segundo Kuo, Lee e Tian (2013), a fim de determinar a estabilidade de um filtro de segunda ordem, pode-se utilizar o teste de estabilidade de Schur-Cohn que determina que o par ordenado (a_1, a_2) deve estar contido no plano mostrado na Figura 1.

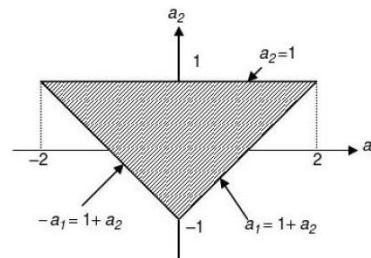


Figura 1. Condição de estabilidade de Schur-Cohn

3 Equalizadores digitais de áudio

Segundo Fonseca (2007), basicamente existem dois tipos de equalizadores, os gráficos e os paramétricos. Os equalizadores apresentam um controle de ganho para cada banda de frequências. Equalizadores paramétricos apresentam menos bandas disponíveis para ajuste, porém esta diferença é compensada pelo conjunto de ajustes disponibilizados ao usuário. Desta forma, é possível construir uma resposta em frequência bastante flexível e detalhada para cada caso de interesse.

Segundo Zölzer (2008) os filtros tipicamente usados em equalizadores paramétricos são os *Shelving* e os *Peak*, e, de maneira complementar, são utilizados filtros passa-baixas (FPB) e passa-altas (FPA) a fim de limitar a faixa de frequências do sinal.

3.1 Filtros Peak

A resposta em frequência de um filtro *Peak* nas frequências extremas do espectro deve ter ganho unitário, de forma a não influenciar as frequências fora de sua banda de atuação. Em contrapartida, as frequências dentro da banda selecionada devem ter seu ganho modificado, chegando ao ganho configurado na frequência central. Kuo, Lee e Tian (2013) expressaram estas especificações de forma matemática nas equações 2, 3 e 4, definindo o ponto de partida do projeto de filtros *Peak* analógicos e digitais.

$$\frac{\partial}{\partial \Omega} |H(\Omega_c)|^2 = 0 \quad (2)$$

$$|H(\Omega_c)|^2 = K^4 = 10^{G/40dB} \quad (3)$$

$$|H(0)|^2 = |H(\infty)|^2 = 1 \quad (4)$$

Ainda segundo Kuo, Lee e Tian (2013), a função de transferência de um filtro *Peak* de segunda ordem pode ser descrita em função dos parâmetros K (ganho normalizado segundo a equação 3, Q (fator de qualidade ou seletividade) e Ω_c (frequência angular no domínio analógico) segundo a equação 5.

$$H(s) = \frac{s^2 + (K/Q)\Omega_c s + \Omega_c^2}{s^2 + (1/KQ)\Omega_c s + \Omega_c^2} \quad (5)$$

Usando a transformação bilinear é possível levar esta expressão ao domínio discreto, determinando assim os coeficientes descritos nas equações contidas na tabela

1. Desta forma obtém-se uma expressão típica de um filtro IIR de segunda ordem, assim como a mostrada pela equação 6.

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (6)$$

Como já discutido é desejável que a implementação tenha a mínima quantidade de operações de multiplicação, para isto normaliza-se os coeficientes em relação ao parâmetro a_0 de tal forma que este seja igual a 1. (Kuo, Lee e Tian, 2013).

3.2 Filtros Shelving

Os filtros *Shelving* podem ser divididos em dois grupos, os *Low-Shelving Filter* (LSF) e os *High-Shelving Filter* (HSF). Como mostrado na figura 2, os LSF atuam nas frequências que são mais baixas do que a sua frequência de corte, enquanto que os HSF atuam nas frequências mais altas que sua frequência de corte.

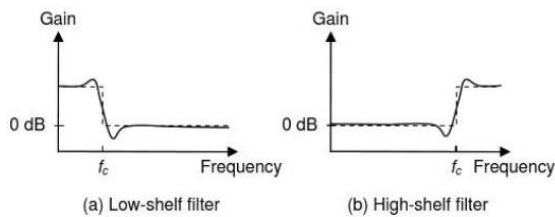


Figura 2. Comparação LSF e HSF

Para garantir estas características, Kuo, Lee e Tian (2013) apresentam as equações 7 e 8 como as funções de transferência de um LSF e de um HSF, respectivamente.

$$H(s) = \frac{s^2 + (\Omega_c \sqrt{K}/Q)s + K\Omega_c^2}{s^2 + (\Omega_c/Q\sqrt{K})s + \Omega_c^2/K} \quad (7)$$

$$H(s) = \frac{K^2 s^2 + (\Omega_c K \sqrt{K}/Q)s + K\Omega_c^2}{s^2 + (\Omega_c \sqrt{K}/Q)s + K\Omega_c^2} \quad (8)$$

A tabela 1 apresenta os coeficientes da função de transferência no domínio discreto obtida através do uso da transformação bilinear para um LSF e HSF.

3.3 Filtros Butterworth

Em muitos equipamentos são utilizados FPB e FPA do tipo Butterworth para limitar a banda de frequência de um determinado sinal. Costumeiramente são usados filtros de segunda ou quarta ordem. As funções de transferência típicas de um FPB e FPA Butterworth de segunda ordem com frequência de corte Ω_c são dadas pelas equações 9 e 10, respectivamente. (Zölzer, 2008).

$$H(s) = \frac{\Omega_c^2}{s^2 + \Omega_c \sqrt{2}s + \Omega_c^2} \quad (9)$$

$$H(s) = \frac{s^2}{s^2 + \Omega_c \sqrt{2}s + \Omega_c^2} \quad (10)$$

A tabela 1 apresenta os coeficientes da função de transferência no domínio discreto obtida através do uso da transformação bilinear para um FPB e FPA para uma topologia Butterworth.

4 Implementação do equalizador

O modelo proposto para a implementação do equalizador pode ser representado pela figura 3, e tem como proposta capturar o áudio analógico, processá-lo através de técnicas de processamento digital de sinais e então ter como saída o áudio analógico modificado. A forma com que o sinal de áudio é processado é ditada pelo usuário através de uma interface gráfica em uma tela LCD sensível ao toque.

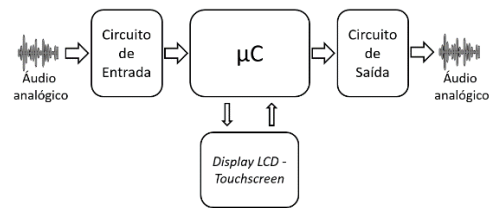


Figura 3. Diagrama de blocos do equalizador

Numa primeira análise sobre o sistema convém destacar a importância dos circuitos de entrada e saída representados na figura 3. O circuito de entrada deve realizar duas funções principais: (1) atribuir ao sinal um valor médio. Esta operação é necessária devido ao sinal de áudio possuir valor médio igual a zero, ou seja, possuir valores positivos e negativos. Isto afetaria o processo de conversão analógica-digital, já que a entrada do microcontrolador não está preparada para suportar valores negativos de tensão; (2) atenuar componentes de frequência que sejam maiores que a frequência de Nyquist (metade da frequência de amostragem). Isto reduz a ocorrência de *aliasing*, aumentando assim a relação sinal-ruído.

De maneira análoga, o circuito de saída deve desempenhar duas funções: (1) retirar o valor médio do sinal proveniente da conversão digital-analógica. (2) filtrar componentes de frequência provenientes da modulação entre o sinal de entrada e o trem de impulsos derivado do processo de amostragem.

De maneira análoga, o circuito de saída deve desempenhar duas funções: (1) retirar o valor médio do sinal proveniente da conversão digital-analógica. (2) filtrar componentes de frequência provenientes da modulação entre o sinal de entrada e o trem de impulsos derivado do processo de amostragem.

Para realizar o processamento e toda as operações necessárias, foi escolhido o microcontrolador ATSAM4E16E, que possui os seguintes atributos principais: núcleo ARM Cortex-M4; frequência máxima do *clock* de 120 MHz; unidade de processamento em ponto flutuante, do inglês *Floating Point Unit* (FPU); e palavra de 32 bits; conversores analógico-digital e digital-analógico, ambos com 12 bits de resolução.

Tabela 1. Coeficientes dos diferentes tipos de filtros utilizados. Onde $\bar{\omega}_c = \Omega_c T/2$.

	<i>Peak</i>	LSF	HSF	FPB	FPA
b_0	$1 + \bar{\omega}_c \frac{K}{Q} + \bar{\omega}_c^2$	$1 + \bar{\omega}_c \frac{\sqrt{K}}{Q} + K \bar{\omega}_c^2$	$K \left(K + \bar{\omega}_c \frac{\sqrt{K}}{Q} + \bar{\omega}_c^2 \right)$	$\bar{\omega}_c^2$	1
b_1	$2(1 - \bar{\omega}_c^2)$	$2(1 - K \bar{\omega}_c^2)$	$2K(K - \bar{\omega}_c^2)$	$2\bar{\omega}_c^2$	2
b_2	$1 - \bar{\omega}_c \frac{K}{Q} + \bar{\omega}_c^2$	$1 - \bar{\omega}_c \frac{\sqrt{K}}{Q} + K \bar{\omega}_c^2$	$K \left(K - \bar{\omega}_c \frac{\sqrt{K}}{Q} + \bar{\omega}_c^2 \right)$	$\bar{\omega}_c^2$	1
a_0	$1 + \frac{\bar{\omega}_c}{(KQ)} + \bar{\omega}_c^2$	$1 + \frac{\bar{\omega}_c}{Q\sqrt{K}} + \frac{1}{K\bar{\omega}_c^2}$	$1 + \frac{\bar{\omega}_c}{Q} \sqrt{K} + K \bar{\omega}_c^2$	$1 + \sqrt{2}\bar{\omega}_c + \bar{\omega}_c^2$	$1 + \sqrt{2}\bar{\omega}_c + \bar{\omega}_c^2$
a_1	$1 - \bar{\omega}_c^2$	$2 \left(1 - \frac{1}{K\bar{\omega}_c^2} \right)$	$2(1 - K \bar{\omega}_c^2)$	$2\bar{\omega}_c^2 - 2$	$2\bar{\omega}_c^2 - 2$
a_2	$1 - \frac{\bar{\omega}_c}{(KQ)} + \bar{\omega}_c^2$	$1 - \frac{\bar{\omega}_c}{Q\sqrt{K}} + \frac{1}{K\bar{\omega}_c^2}$	$1 - \frac{\bar{\omega}_c}{Q} \sqrt{K} + K \bar{\omega}_c^2$	$1 - \sqrt{2}\bar{\omega}_c + \bar{\omega}_c^2$	$1 - \sqrt{2}\bar{\omega}_c + \bar{\omega}_c^2$

A escolha de um microcontrolador para realizar as funções de um processador digital de sinais, do inglês *Digital Signal Processor* (DSP), se justifica pela alta capacidade de processamento dos microcontroladores atuais. Além disto, microcontroladores tem menores custos e maiores facilidades de programação quando comparados aos DSPs.

O *firmware* embarcado no microcontrolador foi desenvolvido de forma a priorizar o processamento do áudio, desde a leitura do conversor analógico-digital até a escrita no conversor digital-analógico. Paralelamente às operações relativas aos filtros, o dispositivo realiza a atualização da tela e o cálculo de novos coeficientes quando estas tarefas se fazem necessárias. Para tanto, foi adotada a estratégia de manter todas as operações de filtragem dentro da rotina de interrupção do *timer*. Visto que foi escolhida a frequência de amostragem de 48 kHz, é essencial que todos estas etapas sejam processadas em um período menor que o período de amostragem, a saber 20,83 μ s.

4.1 Estabilidade

Os coeficientes dos filtros digitais são calculados sempre que o usuário altera algum parâmetro especificado. Para garantir a estabilidade dos filtros projetados, estes foram implementados utilizando seções de segunda ordem. Desta forma, havendo a garantia de estabilidade de cada uma das seções, por consequência garante-se a estabilidade do conjunto.

Para eliminar a possibilidade de ser gerado uma seção instável, foi implementado um algoritmo com base no teste de estabilidade de Schur-Cohn, descrito na seção 2.1. Sendo assim, a análise de estabilidade é feita sobre os valores dos coeficientes calculados, não se fazendo necessário a determinação da localização dos polos da função de transferência.

4.2 Efeitos de transição de filtros

Este projeto utilizou filtros do tipo IIR para compor o sistema desenvolvido. Este tipo de filtro gera

uma saída em função de suas entradas, atual e anteriores, e saídas anteriores. Esta característica gera um problema no momento em que os parâmetros são alterados durante a operação. Isto se deve ao fato do novo filtro usar as saídas obtidas com o filtro anterior para gerar suas saídas. Como consequência, surgem pequenas variações na saída até que o sistema se estabilize novamente.

A fim de reduzir este efeito adotou-se a estratégia de dividir cada alteração dos filtros em vários degraus. Desta forma os coeficientes anteriores vão sendo alterados gradativamente até que sejam iguais aos novos coeficientes calculados.

Foi estipulado um número de 256 degraus para que fosse feita a alteração gradual dos coeficientes. Sendo assim, a cada vez que um filtro é alterado, seus coeficientes são modificados 256 vezes até que estes atinjam o valor real calculado.

É necessário ressaltar que todos os coeficientes devem ser alterados ao mesmo tempo, de forma a garantir a estabilidade durante as transições. Caso não seja tomado este cuidado, corre-se o risco de acontecer a situação mostrada na figura 4. A seta contínua indica o caminho percorrido pelos coeficientes a_1 e a_2 durante uma transição. Nota-se que, como os dois coeficientes são alterados simultaneamente, há a garantia de estabilidade durante a transição. Por outro lado, as setas pontilhadas mostram o caminho percorrido pelo par ordenado (a_1, a_2) quando somente uma destas variáveis é modificada por vez. Desta maneira existe o risco de levar o sistema a uma condição instável, quando os coeficientes estão fora da zona de estabilidade de Schur-Cohn.

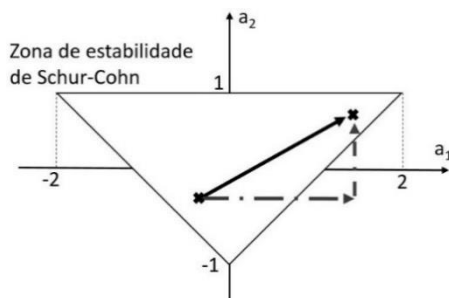


Figura 4. Caminhos possíveis para a transição de filtros

Para que esta estratégia seja efetiva, a cada vez que um degrau é efetuado, o sistema aguarda a execução da rotina de interrupção do *timer* e, por consequência, uma nova amostra na entrada do filtro. Desta forma garante-se a estabilidade do sistema mesmo durante as transições.

5 Resultados e discussões

5.1 Resposta em frequência do sistema

Para analisar a resposta em frequência do sistema foi estipulado um conjunto de filtros a serem configurados no equalizador. E, neste contexto, foram aplicados sinais conhecidos de áudio ao sistema. Desta maneira foi possível comparar os valores medidos com as respostas obtidas de maneira teórica utilizando o software MATLAB®.

Foram analisadas as respostas de cada tipo de filtro individualmente e em conjunto. Sendo assim, verificou-se que a implementação apresentou resultados satisfatórios, visto que os valores medidos se aproximaram dos valores teóricos. Vale ressaltar que as medições trazem consigo os erros de todo o processo, que vão desde os circuitos de entrada e saída até os processos de conversão entre o domínio analógico e digital.

5.2 Estabilidade e transição dos filtros

A filtros calculados e implementados se mostraram estáveis em todas as configurações testadas, não comprometendo o sinal de áudio durante a execução. A implementação dos filtros em seções de segunda ordem foi fundamental para que fosse possível analisar a estabilidade em cada seção separadamente, garantindo assim que, quando todas as seções são estáveis (segundo o teste de Schur-Cohn), o sistema como um todo também o é.

A técnica utilizada para promover as transições foi testada aplicando-se um sinal conhecido (tom puro de 5 kHz) no sistema e capturando sua saída enquanto as configurações dos filtros são variadas.

Na figura 5 é mostrado o espectrograma do sinal capturado em uma situação onde não foi utilizado o método de transição gradual dos filtros. Nota-se que em um instante entre 10 e 15 segundos surge um sinal com espectro largo e que dura cerca de 10 segundos. Este

período de tempo em que se nota a presença deste sinal espúrio é justamente o período no qual se variou as configurações dos filtros.

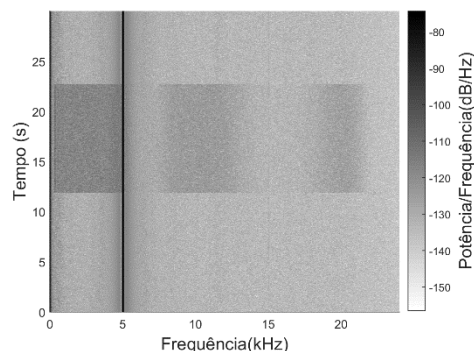


Figura 5. Espectrograma da saída sem a utilização da transição gradual

Por outro lado, na figura 6, é mostrado o espectrograma do sinal de saída obtido utilizando a técnica de transição gradual. É necessário destacar que os dois ensaios foram executados em iguais condições, variando as configurações de maneira semelhante e pelo mesmo período de tempo, de modo a eliminar quaisquer outras influências neste resultado.

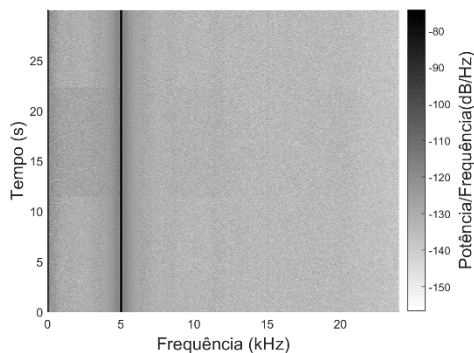


Figura 6. Espectrograma da saída utilizando a transição gradual

É possível notar que na figura 6 a presença do ruído causado pela transição dos filtros é muito menos significativa que na situação anterior. Este comportamento demonstra a eficiência do método proposto para lidar com o problema das transições de filtros com o sistema em execução. Vale ressaltar que quanto maior for o número de degraus utilizados para realizar esta transição gradual, menor será o impacto das transições sobre o sinal de saída.

5.3 Comportamento temporal do sistema

Um aspecto importante deste projeto é seu comportamento temporal. A principal questão neste contexto é executar todas as operações relativas ao processamento do sinal de entrada dentro de um período de amostragem. Por este motivo, foi atribuída a máxima prioridade para a execução desta tarefa.

De acordo com as medições realizadas, a rotina de interrupção é processada em 22,06% do período de amostragem, significando que há margem para crescimento do número de operações realizadas nesta rotina.

Isto possibilitaria a implementação de mais filtros ou outros tipos de processamento, ou até mesmo um aumento na frequência de amostragem.

5.4 Resultados sonoros

Para realizar a análise do resultado sonoro obtido ao utilizar o equalizador desenvolvido, utilizou-se um dispositivo reproduzidor de músicas e um *mixer* de áudio para amplificar o sinal. Isto possibilitou a audição do sinal de saída do equalizador através de um fone de ouvido.

Nestas condições o sistema apresentou desempenho compatível com os parâmetros especificados pelos filtros. Entretanto, foi identificada a presença de um ruído com componentes audíveis em vários pontos do espectro. Este ruído pode ser atribuído à baixa resolução do ADC e do DAC utilizados. Costumeiramente em sistemas profissionais de processamento de áudio são utilizados conversores com 24 bits de resolução. Por outro lado, o sistema desenvolvido utilizou conversores com apenas 12 bits de resolução. Esta diferença reduz consideravelmente a relação sinal-ruído do sinal de saída, gerando até mesmo componentes audíveis.

Além disto, foi detectada a influência dos filtros dos circuitos de entrada e saída na resposta em frequência do sistema. Sendo assim, foi identificada uma atenuação nas frequências mais altas do espectro, prejudicando de certa maneira o resultado final. Para atenuar este efeito, sugere-se o uso de filtros com ordens maiores, a fim de evitar que estes influenciem na faixa audível do sinal.

6 Conclusão

Neste projeto foi desenvolvido um equalizador digital de áudio comandado através de uma tela sensível ao toque. Através da análise dos resultados obtidos nas várias etapas do desenvolvimento ficou demonstrado que o objetivo foi realizado.

O microcontrolador escolhido para a execução deste trabalho teve desempenho suficiente para executar todas as operações de filtragem. Além disto, foi demonstrado que existe a possibilidade de ampliação do sistema, visto que o processamento dos sinais ocupa menos de 25% do tempo.

Não foram observadas variações na saída do equalizador enquanto o operador realiza alterações nas configurações dos filtros. Isto demonstra a eficácia da técnica de transição de filtros utilizando degraus.

Finalmente, apresentou-se o modelo desenvolvido de equalizador operando sobre sinais de áudio e apresentando em sua saída os sinais processados. É necessário ressaltar que o sistema desenvolvido não se enquadra no padrão de qualidade utilizado nos sistemas profissionais de processamento de áudio. Isto se deve, principalmente, ao fato de terem sido utilizados um ADC e um DAC com baixa resolução (12bits). Porém, a principal contribuição pretendida por este trabalho foi

discutir técnicas de implementação de filtros digitais em microcontroladores, possibilitando assim aplicações destas técnicas em outras áreas não correlacionadas.

Referências Bibliográficas

- Fernandes, GFP, Martins, LGPM, Sousa, MFM, Pinto, FS & Ferreira, AJS 1999, 'Implementation of a New Method to Digital Audio Equalization', *106th AES Convention*, pp. 8-11.
- Fonseca, N 2007, *Introdução à Engenharia de Som*. Lisboa: FCA.
- Hirano, K, Nishimura, S & Mitra, SK 1974, 'Design of Digital Notch Filters', *Communications, IEEE Transactions on*, 22, pp. 964-970.
- Holters, M & Zolzer, U 2006, 'Graphic equalizer design using higher-order recursive filters', *9th International Conference on Digital Audio Effects*, pp. 37-40.
- Setubal, PJ., Noceti Filho, S & Seara, R 2003, 'Equalização de Áudio: Considerações Relevantes', *I Congresso Brasileiro de Engenharia de Áudio da AES Brasil*. São Paulo, pp. 29-34.
- Kuo, SM., Lee, BH. & Tian, W 2013, *Real-Time Digital Signal Processing : Fundamentals, Implementations and Applications*. 3rd edn, John Wiley & Sons, Somerset, NJ.
- Manolakis, DG & Ingle, VK 2011, *Applied Digital Signal Processing*. Cambridge University Press, New York, NY
- Oppenheim, AV, Schafer, RW & Buck, JR 1999, *Discrete-Time Signal Processing*. 2nd edn. Prentice-Hall, Inc, Upper Saddle River, NJ
- Orfanidis, SJ 1997, 'Digital Parametric Equalizer Design With Prescribed Nyquist-Frequency Gain', *JAES*, 45.
- Zolzer, U 2008, *Digital Audio Signal Processing*. 2nd edn. John Wiley & Sons.