



**UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PELOTAS
ESCOLA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA/ELETRÔNICA**



**ESTUDOS SOBRE A AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE
AMPLIFICAÇÃO E REPRODUÇÃO DE SOM ATRAVÉS DE
TÉCNICAS ADAPTATIVAS**

RELATÓRIO FINAL DE BOLSISTA

PERÍODO: 2003

**Aluno: Rafael da Cruz Haical
Orientador: Márcio Holsbach Costa**

SUMÁRIO

1. Dados de Identificação	1
1.1 Nome da Universidade.....	1
1.2 Escola / Curso	1
1.3 Título.....	1
1.4 Período das Atividades	1
1.5 Nome do Bolsista.....	1
1.6 Nome do Orientador	1
2. Avaliação	2
3. Introdução	3
4. Objetivos.....	3
5. Justificativa	3
6. Fundamentos Teóricos	4
6.1 Filtros Adaptativos.....	4
6.1.1 Filtragem de Sinais.....	4
6.1.2 Algoritmo Adaptativo LMS	5
6.1.3. Algoritmo NLMS.....	6
6.1.4. Desempenho de um Filtro Adaptativo Controlado pelo Algoritmo LMS... 7	
6.2 Processador digital de Sinais ADSP-21061	8
6.3 Placa de Aquisição sharc Ez-Kit Lite	9
6.4 Alto-Falante	10
6.4.1.Elementos de um Alto-Falante.....	11
6.4.2 Processador Digital de Sinais ADSP 21061	14
6.4.3 Paâmetros thielle-Small	16
6.4.4.Alto-Falante de Bobina Dupla	20
6.5. Microfones	21
6.5.1. Microfone de Carvão	21
6.5.2. Microfone de Bobina Móvel o Fita Metalica.....	21
6.5.3. Microfone de Cristal	22
6.5.4. Microfone Eletrostático.....	22
6.5.5. Microfone Eletreto	23

6.6 Amplificador Operacional	26
6.6.1 Simbologia	26
6.6.2 Um pouco da História dos Amplificadores Operacionais.....	27
6.6.3 Características Ideais.....	27
6.6.4 Impedâncias de Entrada e Saída.....	27
6.5.5 Ganho de Tensão.....	29
6.6.6 Resposta em Freqüência.....	29
6.6.7 Sensibilidade à Temperatura	29
6.6.8 Modos de Operação	29
6.6.9 Circuitos Básicos.....	29
6.7. Amplificadores de Potência	33
6.7.1 Classificação dos Estágios de Saída.....	34
7 Procedimentos Metodológicos	37
7.1 Diagrama em Blocos do Sistema	37
7.1.1 Etapa de Aquisição e Amplificação do Sinal de Referência	38
7.1.2 Etapa de Ajuste do Filtro Adaptativo pelo Algoritmo NLMS	38
7.2 Sistema de Pré Amplificação dos Microfones de Aquisição	38
7.3 Pré-Amplificador para o Alto-Falante	39
7.4 Amplificador de Potência e Alto-Falantes.....	40
7.5 Controlador Adaptativo	41
7.6 Programação da Placa Ez-Kite Lite	41
7.7 O sistema Implementado	41
8. Resultados	43
8.1 Determinação da Resposta ao Impulso	43
8.2 Convergência do Processo de Adaptação	46
8.3 reposta em Freqüência	46
9. Discussão e Conclusões.....	48
10. Propostas para a Continuação do Trabalho	48
11. Bibliografia.....	48
12. Apreciação e Crítica	50

1 DADOS DE IDENTIFICAÇÃO

1.1 Nome da Universidade: Universidade Católica de Pelotas

1.2 Escola/Curso: Curso de Engenharia Elétrica – Escola de Engenharia e Arquitetura

1.3 Título: Estudos sobre a Avaliação de Sistemas de Amplificação e Reprodução de Som através de Técnicas Adaptativas.

1.4 Período de Atividades do Bolsista: março à dezembro de 2003

1.5 Nome do Bolsista: Rafael da Cruz Haical

1.6 Nome do Orientador: Márcio Holsbach Costa

2 AVALIAÇÃO

Neste período pude avançar e finalizar meus estudos sobre a Avaliação de Sistemas de Amplificação e Reprodução de Som através de Técnicas Adaptativas. Em decorrência disto, este período de pesquisa foi muito importante, pois foi onde conseguimos implementar e avaliar o sistema em questão.

Durante este período pude colocar em prática uma série de conhecimentos aprendidos ao longo do curso de Engenharia Eletrônica. Também pude aperfeiçoar minha prática na elaboração de relatórios e o desenvolvimento de projetos segundo princípios científicos.

A conclusão a que chego ao fim deste período de pesquisa, é que estas atividades extracurriculares são de suma importância, à medida que propiciam ao aluno bolsista desenvolver trabalho de bancada, trabalhar em busca de soluções para problemas que ocorrem no decorrer do projeto, estudar e colocar em prática o que foi estudado, etc, ou seja, oportunizam ao aluno vivenciar situações que poderão ocorrer na trajetória de sua vida profissional.

Pelotas, 9 de dezembro 2003.

Rafael da Cruz Haical
(bolsista)

Márcio Holsbach Costa
(orientador)

3 INTRODUÇÃO

Este relatório apresenta os resultados finais do estudo sobre a avaliação de sistemas de amplificação, e reprodução de som através de técnicas adaptativas.

Os tópicos aqui abordados, foram resultado de trabalho individual e em conjunto com meu orientador Márcio Holsbach Costa e também os alunos da iniciação científica Márcio da Silva Goulart e Fábio Pires Itturriet.

4 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo avaliar a resposta em frequência de alto-falantes de forma rápida e confiável, permitindo que seja realizado o processo de controle de qualidade na própria linha de produção.

5 JUSTIFICATIVA

Este trabalho justifica-se pelo fato de que nas indústrias de produção de alto-falantes o controle de qualidade é realizado por amostragem. Isto decorre da necessidade de retirada do produto da linha de montagem devido ao elevado nível de ruído acústico encontrado no local. Como consequência a avaliação em larga escala é prejudicada. Uma interessante alternativa para possibilitar a avaliação rápida e confiável *in loco* é a utilização de filtros adaptativos devido a sua elevada robustez à interferências externas.

6 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Nesta seção são introduzidos os diversos aspectos e conceitos teóricos necessários à compreensão do trabalho.

Vários estudos e experimentos vêm sendo desenvolvidos na área de identificação de sistemas e em especial com relação à técnica de filtragem adaptativa, mas as dificuldades em obter-se os resultados desejados são grandes e variadas, devido principalmente a aspectos tais como, não-linearidades, atrasos de propagação e frequência de amostragem. Em decorrência disto, há a necessidade de um estudo detalhado sobre as variáveis que podem afetar o desempenho destes filtros.

6.1 Filtros Adaptativos

Os filtros adaptativos são ferramentas extremamente úteis na área de processamento de sinais, principalmente em aplicações de tempo real onde pouca ou quase nenhuma informação dos sinais envolvidos é conhecida *a priori* [1].

Suas áreas de aplicação abrangem desde o cancelamento de eco e processamento de sinais de radar ao controle de sistemas eletrônicos e/ou de potência.

6.1.1 Filtragem de Sinais

O principal objetivo da filtragem de sinais é melhorar a qualidade do sinal de acordo com um determinado critério de desempenho, através disto são mostradas a seguir algumas considerações sobre filtros.

Um filtro é um sistema que transforma o sinal de entrada, de uma determinada maneira, em um sinal de saída (Fig 1). Os sinais geralmente são considerados com relação às suas características tanto no domínio tempo como no domínio de frequência. Da mesma forma, os requisitos de saída do filtro podem ser gerados em termos de tempo ou frequência.



Figura 1. Representação simbólica de um filtro.

6.1.2 Algoritmo Adaptativo LMS

Há vários sinais de interesse na natureza. Alguns destes se caracterizam por uma certa regularidade em suas propriedades, o que lembra um sinal periódico. Entretanto, não podem ser definidos como tal porque existe uma pequena variação estatística a cada momento. Em geral, esses sinais são medidos conjuntamente com interferências indesejáveis, que devem ser eliminadas.

Usualmente, os filtros clássicos baseados em frequências de corte constantes não são eficientes para remoção dessas interferências, porque as características estatísticas tanto do sinal quanto da interferência variam no tempo. Portanto é necessário a utilização dos filtros adaptativos. De uma forma geral, os diversos algoritmos da família LMS (*Least Mean Square*), também chamados de algoritmos de gradiente estocástico, são determinados a partir da seguinte equação [2]

$$\mathbf{c}(n+1) = \mathbf{c}(n) + \mu \left[-\nabla E \{ e^2(n) \} \right] \quad (1)$$

Esta equação pode ser interpretada como sendo um procedimento recursivo, onde novas atualizações do vetor $\mathbf{c}(n) = [c_0(n) \ c_1(n) \ \dots \ c_{N-1}(n)]^T$ são determinadas a partir de seu valor no instante de tempo anterior mais uma parcela proporcional (onde o fator de proporcionalidade é dado pelo parâmetro μ) ao gradiente da superfície do sinal de erro em termos médios quadráticos.

O algoritmo LMS é importante pela sua simplicidade e facilidade de computação. Se o sistema adaptativo é um combinador linear, como mostra a figura 2, e o sinal de entrada $x(n)$ e a resposta desejada $d(n)$ estão disponíveis a cada iteração, o algoritmo LMS é geralmente a melhor escolha para muitas aplicações de processamento adaptativo de sinais [3].

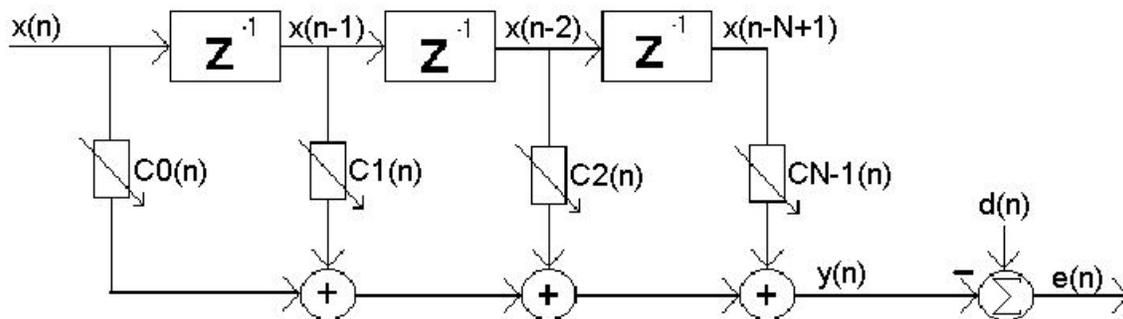


Figura 2. Combinador linear adaptativo com sinal de resposta desejado e sinal de erro.

Na figura 2, o sinal de erro é dada por:

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (2)$$

onde $y(n) = \mathbf{c}^T(n)\mathbf{x}(n)$ é uma estimativa do sinal desejado e o vetor de amostras do sinal de excitação $x(n)$ é definido como $\mathbf{x}(n) = [x(n) \ x(n-1) \ \dots \ x(n-N+1)]^T$.

Muitos algoritmos adaptativos estimam o gradiente da superfície do erro médio quadrático $\xi = E\{e^2(n)\}$ através de diferenças entre pequenos termos de $e^2(n)$. Já o algoritmo LMS utiliza o próprio $e^2(n)$, como uma estimativa do MSE [3].

Então, a cada iteração do processo adaptativo, temos uma estimativa do gradiente. Através da equação (2) tem-se que:

$$\nabla [E\{e^2(n)\}] \cong \nabla [e^2(n)] = \begin{bmatrix} \frac{\partial e^2(n)}{\partial c_0} \\ \dots \\ \frac{\partial e^2(n)}{\partial c_{N-1}} \end{bmatrix} = 2e(n) \begin{bmatrix} \frac{\partial e(n)}{\partial c_0} \\ \dots \\ \frac{\partial e(n)}{\partial c_{N-1}} \end{bmatrix} = -2e(n)\mathbf{x}(n) \quad (3)$$

Substituindo (3) em (1) pode-se obter a equação de atualização do algoritmo LMS:

$$\mathbf{c}(n+1) = \mathbf{c}(n) + \mu e(n)\mathbf{x}(n) \quad (4)$$

onde μ é a constante de ganho que regula a velocidade e a estabilidade da adaptação.

O algoritmo LMS pode ser implementado sem operações de média, divisão, raiz, ou diferenciação e é elegante em sua simplicidade e eficiência [2]. Entre os diversos membros da família LMS encontra-se o algoritmo NLMS, o qual é um dos mais utilizados na prática.

6.1.3 Algoritmo NLMS

O algoritmo NLMS ou LMS normalizado é uma variação do LMS. Ele aplica em sua fórmula uma normalização do erro. Essa normalização provoca a utilização de passos de convergência variáveis, de acordo com a potência do sinal de entrada $x(n)$. O passo de convergência $\mu = \beta / [\mathbf{x}^T(n)\mathbf{x}(n) + \delta]$ será inversamente proporcional à potência do sinal de entrada $x(n)$. A equação de atualização do NLMS é dada por [3].

$$\mathbf{c}(n+1) = \mathbf{c}(n) + \frac{\beta}{\mathbf{x}^T(n)\mathbf{x}(n) + \delta} e(n)\mathbf{x}(n) \quad (5)$$

Onde δ é uma constante pequena e positiva que evita divisões por zero quando o produto $\mathbf{x}^T(n)\mathbf{x}(n)$ for nulo.

6.1.4 Desempenho de um Filtro Adaptativo Controlado pelo Algoritmo LMS

Algumas características do processo de adaptação são de grande utilidade para a análise e o entendimento do comportamento dos filtros adaptativos. A mais importante delas é a curva de aprendizado que caracteriza o desempenho de um filtro adaptativo e é amplamente utilizada em estudos teóricos e experimentais [3].

A curva de aprendizado relaciona o erro médio quadrático (EMQ) em função do tempo. Quando o filtro adaptativo inicia sua operação, os seus coeficientes podem possuir valores bem diferentes do vetor de coeficientes ótimo (\mathbf{c}^o - conjunto de coeficientes que minimiza o erro médio quadrático, ou sob outro ponto de vista, que produz a melhor estimativa de $d(n)$ através de $y(n)$ em termos médios quadráticos), causando um EMQ grande. Durante a execução do algoritmo, os coeficientes vão se aproximando de \mathbf{c}^o , causando, por consequência, uma diminuição do EMQ, esta fase é chamada de adaptação. Após esta fase o filtro entra no modo de regime permanente.

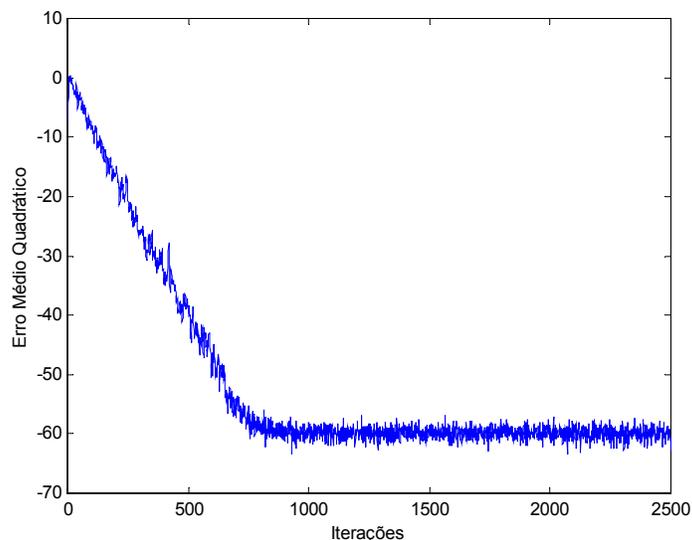


Figura 3. Desempenho do filtro adaptativo para um passo de convergência de 0,01, 2500 iterações, 40 realizações (promediações), 10^{-6} de variância do ruído aditivo, variância unitária para o sinal de excitação e planta com 10 coeficientes.

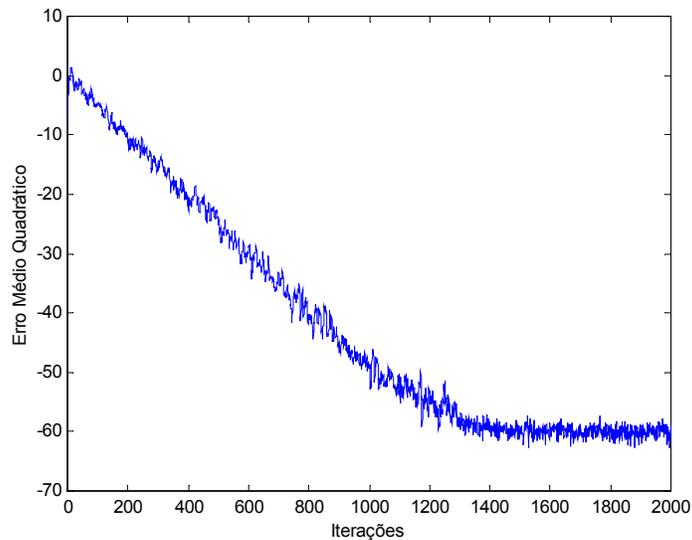


Figura 4. Desempenho do filtro adaptativo para um passo de convergência de 0,006, 2000 iterações, 50 realizações (promediações), 10^{-6} de variância do ruído aditivo, variância unitária para o sinal de excitação e planta com 10 coeficientes.

As figuras 3 e 4 mostram exemplos da operação de um filtro adaptativo, baseado no algoritmo LMS.

Na figura 3 foi utilizado um passo de convergência de 0,01, 2500 iterações, 40 realizações (promediações), 10^{-6} de variância do ruído aditivo, variância unitária para o sinal de excitação e planta com 10 coeficientes.

Na figura 4 foi utilizado um passo de convergência de 0,006, 2000 iterações 50 realizações (promediações), 10^{-6} de variância do ruído aditivo, variância unitária para o sinal de excitação e planta com 10 coeficientes

No eixo vertical das figuras 3 e 4 temos o erro médio quadrático e no horizontal o número de iterações do algoritmo. Comparando as figuras 3 e 4, nota-se que quanto maior o passo de convergência mais rápido é o período de adaptação.

6.2 Processador Digital de Sinais ADSP-21061

O ADSP-21061 é um processador digital de sinais de 32 bits de ponto-flutuante e ciclo de instrução de 20ns operando em 40MHz. Com uma memória cache de instrução interna, o processador pode executar muitas instruções em um único ciclo. Inclui também uma memória SRAM de 1Mbit, temporizador interno e controlador DMA [4]. Este processador será o núcleo de nosso sistema.

6.3 A Placa de Aquisição Sharc Ez-Kit Lite

A placa de aquisição de sinais Sharc Ez-Kit Lite é baseada no processador ADSP-21061. A mesma possui um Codec com um par estéreo de conversão A/D e porta serial de 16 bits. Como acompanhamento deste sistema é fornecido um *software* de compilação e depuração, manual de utilização e uma biblioteca em C para controle do sistema [5].

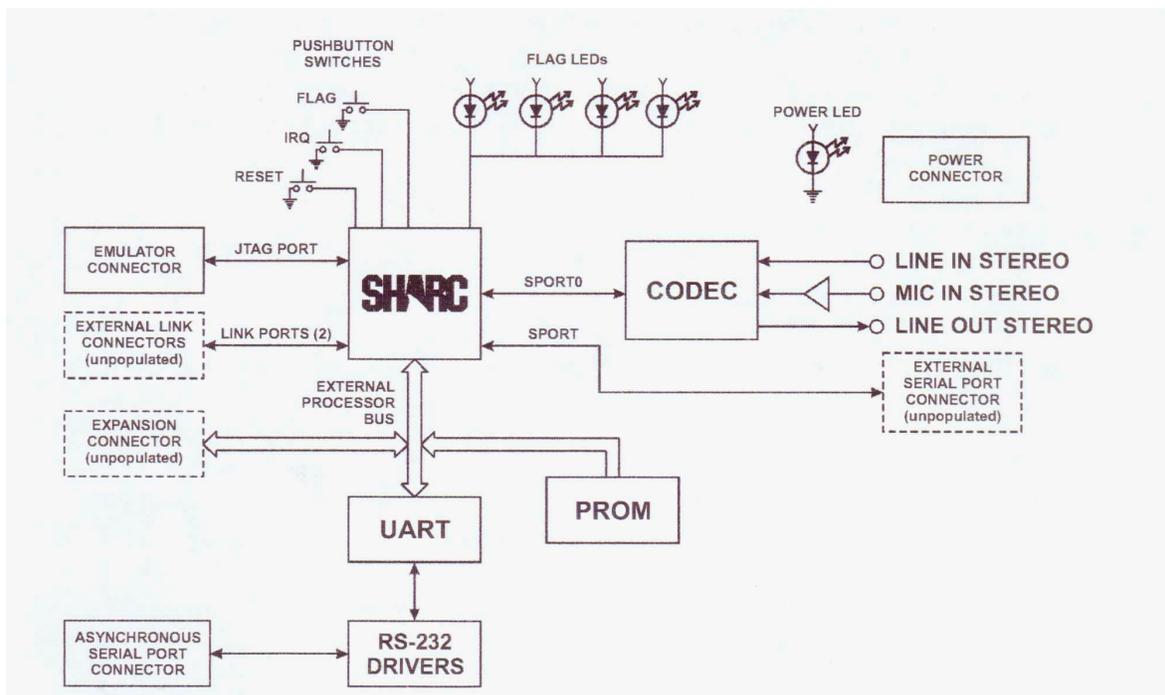


Figura 5. Diagrama em blocos da placa SHARC EZ-KIT Lite.

- **Características**

- a) Processador ADSP21061 40 MHz de clock;
- b) Conversor AD1847 16-bit Stereo SoundPort Codec;
- c) Interface RS-232;
- d) EPROM;
- e) Push-Buttons (para flag,IRQ e RESET);
- f) Possui um conjunto de leds programáveis;
- g) Tensão de alimentação regulável;
- h) Possibilidade de expansão de conectores(hardware).

- **Aquisição de Dados**

O AD1847 SoundPort Stereo Codec converte dados de áudio e controla todas as funções com um simples circuito integrado [6].

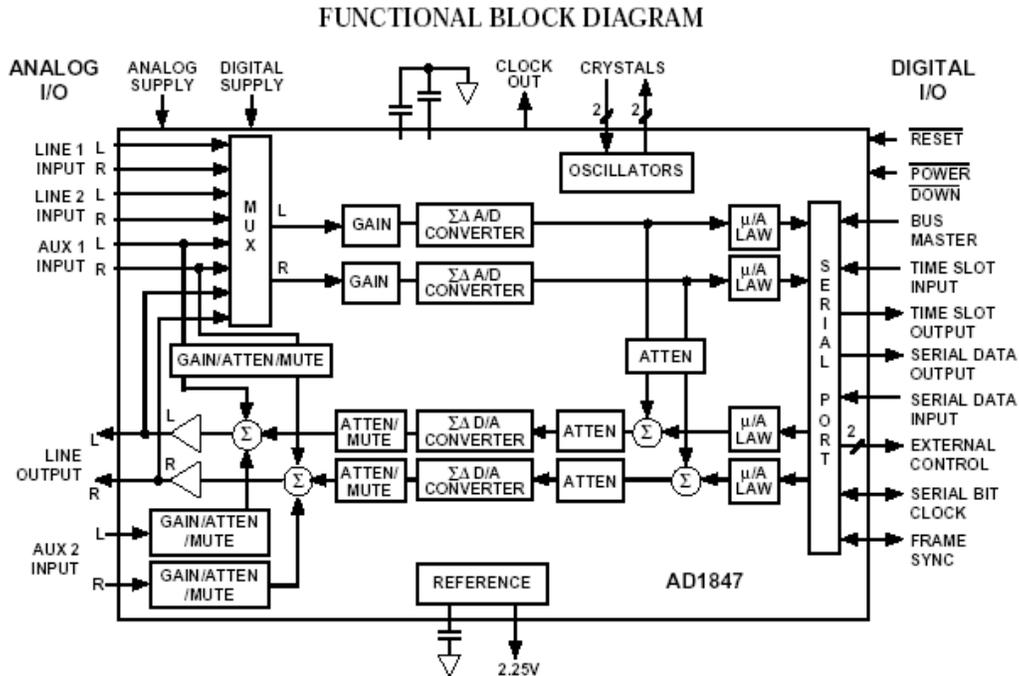


Figura 6. Diagrama em blocos do funcionamento do AD1847.

O AD 1847 possui as seguintes características:

- a) permite variar ganhos;
- b) entrada e saída analógica;
- c) conversor digital/analógico;
- d) conversor analógico/digital;
- e) atenuador com combinação digital.

6.4 Alto-Falante

Os primeiros alto-falantes surgiram entre 1924 e 1925, como equipamento capaz de ampliar o som produzido pelos fonógrafos elétricos primitivos. Os diminutos movimentos comunicados à agulha, quando de sua passagem pelo sulco do disco, eram transformados em sinais elétricos que precisavam ser reconvertidos em vibrações mecânicas. E essa função não podia ser exercida pelas cornetas acústicas dos fonógrafos mecânicos. Surgiu assim, o alto-falante de bobina móvel, desenvolvido pelos norte-americanos. A simplicidade de sua construção e a boa qualidade de reprodução sonora possibilitadas pelo novo dispositivo fizeram com que ele permanecesse praticamente inalterado até hoje.

O alto-falante é um transdutor eletroacústico, da mesma forma que o microfone, no entanto a função do alto-falante é converter o sinal elétrico em vibração sonora, essa conversão se dá no sentido inverso do microfone. Nos alto-falantes é preciso fornecer altas

pressões acústicas, e portanto o nível de sinal elétrico aplicado a ele deve ser muito grande, isso implica no uso de amplificadores de potência.

O princípio de funcionamento de um alto-falante pode ser visto na figura 7. Um alto-falante é constituído basicamente de quatro elementos: estrutura, cone, bobina móvel e imã.

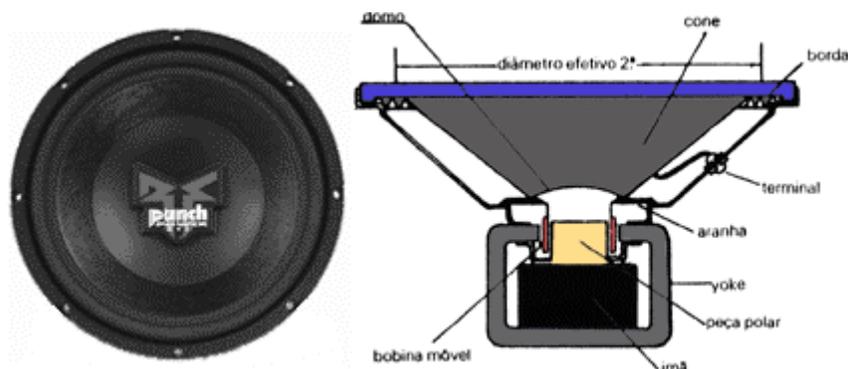


Figura 7. Estrutura e princípio de funcionamento do alto-falante.

O seu princípio de funcionamento é simples, dois ímãs tanto podem se atrair como se repelir. O que ocorre no alto-falante é o mesmo, pois o ímã gera um campo magnético fixo, enquanto a bobina, ao ser percorrida por uma corrente elétrica, também gera um campo magnético que tanto pode se opor quanto se igualar em sentido ao do ímã. Isto acontece porque o sinal aplicado a bobina do alto-falante é de corrente alternada, assim sendo quando a corrente circula num sentido da bobina, é criado um campo magnético que faz com que a bobina seja repelida, e quando a polaridade se inverte faz com que a corrente circule no sentido contrário e com isso a bobina seja atraída pelo ímã.

A conversão de sinal elétrico para sonoro se dá ao prendermos a bobina em um cone, que por sua vez encontra-se fixo a estrutura. O movimento da bobina para frente e para trás faz com que o cone, ao se deslocar, movimente o ar, provocando uma pressão sonora. Ou seja se injetarmos um sinal de 1KHz a um alto-falante, seu cone deverá se movimentar 1000 vezes em cada segundo. Como pode ser percebido isso influi na estrutura de um alto-falante, já que fica evidente que um alto-falante de grandes dimensões e elevado peso do conjunto cone-bobina terá dificuldades de efetuar movimentos rápidos (alta frequência) [1].

6.4.1 Elementos de um Alto-Falante

Na figura 8 encontram-se os elementos que compõem um alto-falante. Cada um destes elementos será explicado a seguir [8].



Figura 8. Estrutura do alto-falante.

- **Ímã**

O Ímã fornece o campo magnético presente no entreferro. Tem a forma de um anel e é geralmente fabricado com um material chamado ferrite.

- **Centrador**

É uma peça plástica ou de papelão que centra e mantém o ímã a uma distância constante em relação ao pólo.

- **Centragem**

A Centragem mantém a bobina móvel centralizada no entreferro permitindo que o cone efetue movimentos para dentro e para fora. Juntamente com a borda do cone, determina a frequência de ressonância do alto-falante. É confeccionada em tecido de algodão impregnado com resina fenólica, polimerizada a quente.

- **Entreferro**

O entreferro é o espaço livre entre a chapa polar e o pólo. No entreferro é gerado um forte campo magnético pelo Ímã, e nele trabalha a bobina móvel.

- **Carcaça**

A carcaça tem a finalidade de servir de suporte para todos os componentes do alto-falante. É geralmente confeccionada em chapa de aço ou alumínio e tem a forma de um cesto.

- **Cone**

O cone transmite as vibrações geradas na bobina móvel para o ar, provocando o som. Seu formato é cônico e geralmente é confeccionado em papel ou polipropileno. Para desempenhar bem sua tarefa, o cone deve ser rígido e possuir alto amortecimento interno. De todos os componentes do alto-falante é o que mais influencia na qualidade do som.

- **Calota**

A Calota protege o entreferro da entrada contra poeira e outras partículas estranhas. É confeccionada em papel, alumínio ou plástico.

- **Guarnição**

A guarnição tem duas funções: evitar o vazamento de ar entre o alto-falante e o painel onde está montado e prevenir que, durante o movimento do cone, a borda toque no painel, gerando ruídos.

- **Chapa traseira**

A chapa traseira, junto com as demais peças polares, conduz a energia magnética gerada pelo ímã para o entreferro. Tem o formato de uma arruela e é feita de ferro.

- **Pólo**

O Pólo, junto com as demais peças polares, conduz a energia magnética gerada pelo Ímã para o Entreferro. Tem o formato de um cilindro e é feito de ferro.

- **Chapa polar**

A chapa polar, junto com as demais peças polares, conduz a energia magnética gerada pelo ímã para o entreferro. Tem o formato de uma arruela e é confeccionada em ferro.

- **Bobina móvel**

A bobina móvel, que trabalha dentro do entreferro, transforma as ondas elétricas recebidas do amplificador em vibrações que, transmitidas ao ar pelo cone, causam o fenômeno sonoro. É composta de uma forma, feita de folha de papel ou alumínio, sobre a qual são enroladas várias espiras de fio de cobre ou alumínio.

- **Cordoalhas flexíveis**

As cordoalhas flexíveis fazem a ligação entre a bobina móvel e os terminais, permitindo que o cone execute as vibrações livremente.

- **Terminais**

Os Terminais conduzem a energia elétrica do amplificador até a bobina móvel.

- **Borda**

A borda, que é uma extensão do cone, tem a função de ajudar a centragem a manter a bobina móvel centralizada no entreferro, permitindo ao conjunto oscilante (cone/bobina móvel) executar livremente as vibrações. É normalmente fabricada com espuma de poliuretano ou borracha.

6.4.2 Tipos de Alto-Falantes

Existem diversos tipos de alto-falantes, entre eles estão incluídos o *woofer*, *mid-range*, *full-range* e o *tweeter*, que serão explicados nos sub-itens logo a seguir.

- **Woofers**

Resposta aos graves (baixas frequências): são falantes cuja a faixa de resposta situa-se entre 40Hz e 1KHz aproximadamente. Suas dimensões e peso são normalmente as maiores dentre todos os tipos de alto-falante, o que explica sua característica de não conseguir responder satisfatoriamente as altas frequências. Curvas de resposta (0° e 45°), na caixa de teste da câmara anecóica.(Figura 9)

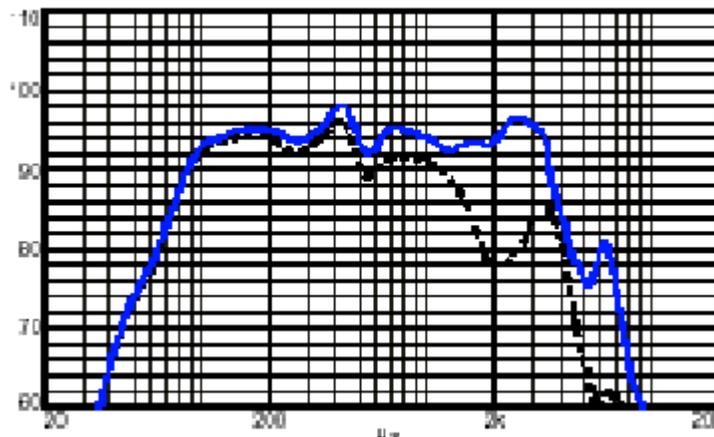


Figura 9. Em azul- Curva de resposta em 0°; Em preto tracejado- Curva de resposta em 45°.

- **Mid-Range**

Sua faixa de trabalho é de 200Hz a 7KHz, caracterizando a faixa de médias frequências no espectro audível. Apesar de terem uma forma construtiva semelhante aos *woofers* (ao menos na aparência), esses alto-falantes são mais leves, o que possibilita a extensão de sua faixa de resposta em frequências. Curvas de resposta (0° e 45°), na caixa de teste da câmara anecóica são apresentados na figura 10.

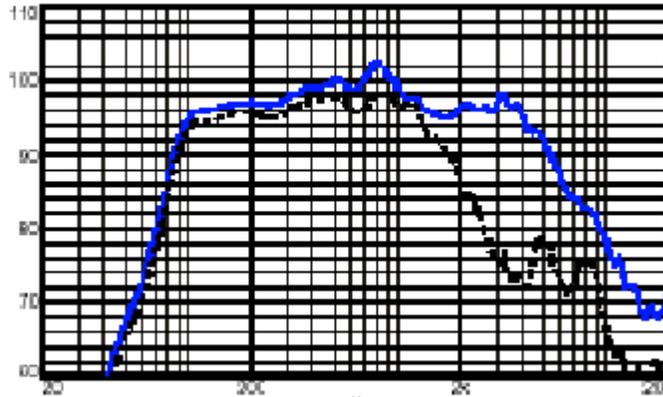


Figura 10. Em azul- Curva de resposta em 0°; Em preto tracejado- Curva de resposta em 45°.

- **Full-Range**

Resposta ampla caracterizam-se por cobrirem uma faixa maior que a dos *mid-range*, normalmente entre 100Hz e 10KHz, sendo utilizado em sistemas de menor potência, como ao de sonorização ambiente. Exemplo de curva de resposta é apresentada na figura 11.

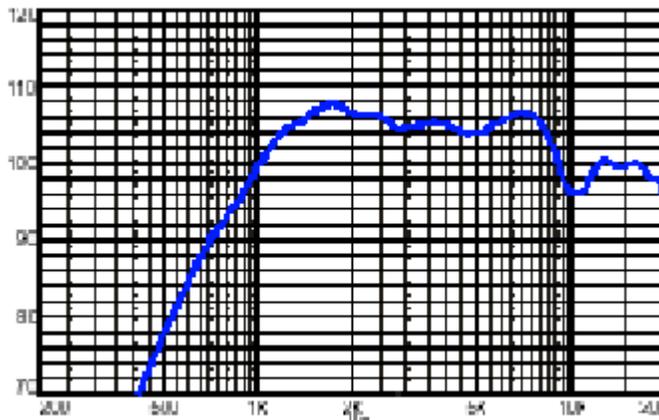


Figura 11. Em azul- Curva de resposta.

- **Tweeter**

Resposta aos agudos (altas frequências) sua frequência situa-se na faixa de 5KHz, indo até o final da faixa audível, em torno de 20KHz. Um exemplo de curva de resposta é apresentado na figura 12.

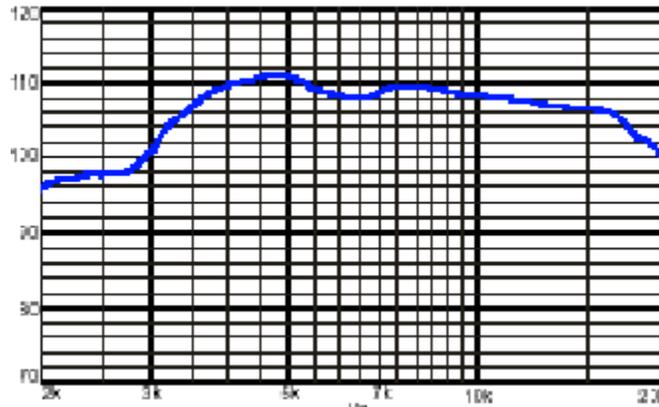


Figura 12. Em azul- Curva de resposta.

6.4.3 Parâmetros Thiele-Small

A base de parâmetros para modelagem de alto-falantes adotada mundialmente são os parâmetros de Thiele-Small. A partir deles é possível efetuar o cálculo de gabinetes acústicos e, através de simulações em computador, conseguir inclusive prever a resposta em frequência destes. Esta interconectividade à informática tem permitido, acima de tudo, que o projeto de gabinetes torne-se cada vez mais popular e difundido. Afirma-se que o verdadeiro conhecimento do significado das leis físicas relacionadas aos fenômenos envolvidos no funcionamento dos alto-falantes e gabinetes acústicos continuam restritos a pessoas especializadas e, projetar um gabinete acústicos através de um programa de computador, decididamente não é conhecer acústica, alto-falantes e gabinetes, mas já é uma boa solução para o uso prático e dirigido. Os parâmetros Thiele-Small são: impedância, sensibilidade, densidade de fluxo magnético, potência nominal, potência máxima, frequência de ressonância, eficiência, frequência de pico, F3, resistência ôhmica DC, fator de qualidade mecânica, fator de qualidade elétrica, fator de qualidade total, volume equivalente, volume interno, deslocamento máximo, sensibilidade, potência musical, compliância mecânica, massa mecânica, fator de força e área efetiva do cone. Cada um destes parâmetros é explicado a seguir [9].

- **Impedância**

É a oposição à passagem de corrente elétrica que o falante apresenta a uma dada frequência, os fabricantes fornecem em catálogo o dado de impedância nominal, que deve

ser usada para efeitos de cálculo de um sistema de amplificação. Os valores normalmente encontrados em alto-falantes profissionais são de 8 e 16 Ohm.

- **Sensibilidade**

É o nível de intensidade sonora em db SPL, medido a 1 metro do falante, quando a ele é aplicada uma potência de 1Watt. Esta medida é efetuada em câmara anecoica, utilizando equipamentos específicos para este fim. Os valores encontrados em alto-falantes profissionais encontram-se na faixa de 90 a 110 dbSPL.

- **Densidade do fluxo magnético**

Expressa a intensidade do campo magnético produzido pelo imã do alto-falante. Quanto maior for este valor, maior poderá ser a eficiência do transdutor na transformação do sinal elétrico em pressão sonora. Os valores encontrados em alto-falantes profissionais situam-se na faixa de 15000 a 18000 Gauss.

- **Potência nominal**

É o maior valor de potência, expresso em Watt RMS, que pode ser aplicado continuamente ao falante, sem que se verifique um determinado nível de distorção.

- **Potência máxima**

É o máximo valor de potência que pode ser aplicado no falante, sem que ocorram danos as suas partes elétricas ou mecânicas. Este valor pode variar dependendo da norma adotada para o teste, mas situa-se normalmente entre duas a quatro vezes a potência nominal.

- **Frequência de ressonância**

É uma característica mecânica, própria da construção do alto-falante; normalmente vai indicar o limite da resposta em frequência. É nesse ponto que o alto-falante apresentará o seu máximo valor de impedância.

- **Eficiência**

É a relação entre a potência acústica que obtemos de um alto falante e a potência elétrica a ele entregue, expressa em percentagem.

- **Frequência de sintonia(FAB)**

Frequência de um vale entre dois picos.

- **Frequência de pico (Fc)**

Frequência de Ressonância do sistema.

- **F3**

Ponto de menos 3dB em relação à região de resposta plana.

- **Resistência ôhmica DC(Re)**

Próxima e inferior a impedância nominal do alto-falante, e que pode ser medida por um ohmímetro.

- **Fator de qualidade mecânico(Qms)**

Fator de qualidade mecânico para fs ao ar livre, considera apenas as perdas mecânicas, quanto maior o valor de Qms, menos flexível será o conjunto móvel.

- **Fator de qualidade elétrico(Qes):**

Fator de qualidade elétrico para fs ao ar livre, considera apenas as perdas elétricas, quanto menor o valor de Qes, maior a força dinâmica do sistema eletromagnético.

- **Fator de qualidade total, mecânico e elétrico(Qts):**

Fator de qualidade total (mecânico e elétrico), indica o tipo de *subwoofer*. Exemplo: Qts abaixo de 0,5 indicam que o alto-falante é apropriado para caixa acústica, não devendo ser instalado em tampão. (carga acústica baixa). Qts acima de 0,5 indicam que o alto-falante é do tipo *Free Air*, recomendado para utilização em tampão (carga acústica baixa) e em vários sistemas de caixas acústicas.

- **No**

Rendimento de referência de um alto-falante. O "no" indica a relação entre potência acústica produzida pelo falante e potência elétrica aplicada. Podemos perceber que os alto-falantes são, na verdade, grandes geradores de calor, uma vez que a maioria dos falantes tem rendimento em torno de apenas 1%.

- **Volume equivalente de ar (Vas)**

Volume equivalente de ar que tem a mesma compliância do sistema de suspensão do alto-falante (volume acústico do alto-falante). Grandes valores de Vas pedem grandes volumes nas caixas acústicas. O volume Vb da caixa acústica depende também do Qts e Fs. Ao utilizar volumes de caixa menores que os especificados, modifica-se a resposta de frequência, geralmente reforçando uma certa região dos graves, aumentando o Fb e também a excursão do cone do alto-falante.

- **Volume interno (Vb)**

Volume interno líquido da caixa acústica, oferecido ao alto-falante. O valor de Vb influi na resposta de graves, na frequência de corte F3, na de sintonia Fb e no deslocamento do cone.

- **Deslocamento máximo (Xmáx)**

Deslocamento máximo que a bobina apresenta mantendo a mesma quantidade de fio dentro do *gap* do falante.

- **Sensibilidade**

Quanto maior a sensibilidade, maior o nível de pressão sonora obtido com a mesma potência.

- **Potência Musical**

Potência em Watt que o alto-falante deve suportar em regime de programa musical por tempo indeterminado. Admite-se distorção máxima de 5% do amplificador.

- **Compliância mecânica**

É o quanto um determinado corpo se desloca quando aplica nele uma determinada força . É dada em m/N.

- **Compliância mecânica (Cms)**

Compliância mecânica da suspensão do alto-falante.

- **Mms**

Massa mecânica móvel do alto-falante mais a carga de ar que ele desloca. É dada em Kg.

- **Fator de força (bl)**

A força mecânica produzida pela bobina é em função do produto (campo magnético x comprimento fio no fluxo x corrente no fio) [N/A] ou [T.m].

- **Área efetiva do cone(Sd)**

Área efetiva do cone.

- **Circuitos de Thiele Small**

Com a utilização generalizada do modelo originalmente proposto (Fig. 13) foi percebido, ao longo do tempo, a necessidade da representação de comportamentos não-lineares que se evidenciavam mesmo para pequenos sinais, tais como a influência da frequência na componente resistiva da impedância da bobina bem como na própria indutância da bobina (Fig. 14).

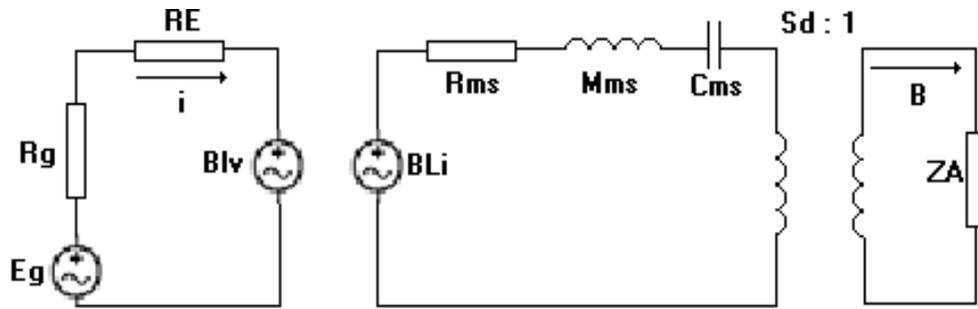


Figura 13. Modelo Linear do Parâmetro Thielle-Small

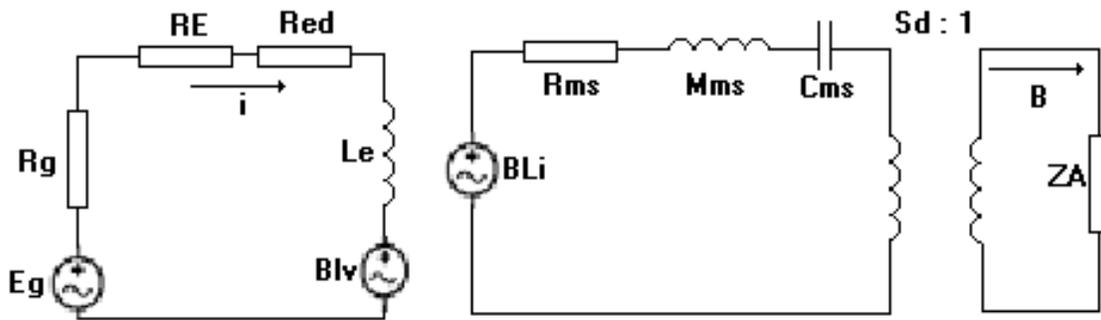


Figura 14. Modelo equivalente não-linear do Parâmetro Thielle Small

6.4.4 Alto-falante de Bobina Dupla

Um alto falante de bobina dupla possui duas bobinas independentes, que podem ser associadas em série ou paralelo. O tipo de associação determina o valor final da impedância, que pode ser maior no caso de uma associação em série ou menor no caso de uma associação em paralelo. O verdadeiro objetivo de um alto-falante bobina dupla é alcançar uma menor impedância para que o amplificador forneça mais potência.

A diferença entre um alto-falante de bobina dupla e um de bobina simples consiste na utilização de dois enrolamentos de bobina (duas bobinas), o que possibilita diferentes modos de associação destas bobinas e muitas vezes acaba complicando a vida dos instaladores.

A maneira como utilizamos estes alto-falantes pode implicar em ganhos ou perdas de potência do amplificador. Um ganho de potência pode ser conseguido através de uma associação paralela entre as bobinas, pois ao utilizarmos esta associação teremos um baixo valor de impedância, resultando então em um alto valor de potência. Com isso explicamos o fato de um alto-falante de bobina dupla apresentar um rendimento maior do que um de bobina simples, quando estes estão sendo comparados com um mesmo amplificador.

Já com a associação em série o que ocorre é um aumento de impedância, que resulta em baixo valor de potência [10].

6.5 Microfones

O microfone é um dispositivo eletromecânico utilizado para converter o som (energia mecânica), em energia elétrica. A capacidade de resposta de um microfone é determinada submetendo o aparelho a várias frequências de som de mesma intensidade e registrando a saída elétrica resultante. Os dois grupos de valores obtidos são indicados graficamente: a frequência e a saída elétrica relativa. Se o gráfico de resposta de frequência apresenta uma linha horizontal, isso significa que o microfone produz o mesmo sinal elétrico para todas as frequências [11].

Os microfones têm muitas aplicações, como por exemplo nos telefones, gravadores de fita, aparelhos auditivos e nas transmissões de rádio e televisão. Os modelos convencionais possuem um diafragma que vibra de acordo com as pressões exercidas pelas ondas sonoras. A conversão de energia sonora em sinal elétrico pode ser efetuada de várias maneiras, sendo mais comuns os processos empregados nos microfones de carvão, de bobina móvel, de fita metálica, de cristal, de modelos eletrostáticos e de eletretos [4].

6.5.1 Microfone de Carvão

O microfone de carvão consiste basicamente em um diafragma, uma determinada quantidade de carvão granulado e uma fonte de energia elétrica em corrente contínua. As vibrações do diafragma, provocadas pelas ondas sonoras, são transferidas aos grânulos de carvão, fazendo variar o valor médio de sua resistência elétrica. Os sinais elétricos resultantes correspondem às ondas sonoras captadas pelo diafragma. Apesar de não apresentarem alta-fidelidade, os microfones desse tipo têm custo baixo e grande durabilidade [12].

6.5.2 Microfone de Bobina Móvel e Fita Metálica

O microfone de bobina móvel funciona com base no eletromagnetismo. Uma bobina móvel, presa à face posterior do diafragma, vibra no campo magnético de um ímã

permanente, conforme as pressões das ondas sonoras. Esse movimento relativo induz nos fios da bobina uma corrente variável [12].

O modelo de fita metálica funciona de maneira semelhante. Uma fita de metal, suspensa entre os pólos de um ímã permanente, funciona como diafragma (Figura 14).

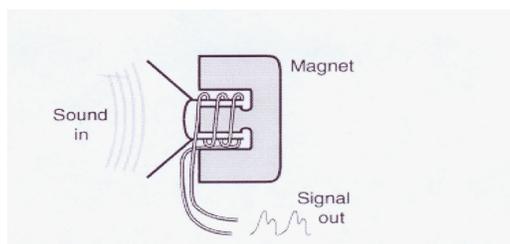


Figura 15. Microfone de bobina móvel.

6.5.3 Microfone de Cristal

O microfone de cristal utiliza o efeito piezoelétrico; quando um pedaço de sal de Rochelle é pressionado ou torcido cria-se entre duas de suas faces uma diferença de potencial. A incidência de uma pressão alternada (criada pela vibração das ondas sonoras) gera então nesse cristal uma corrente elétrica alternada, com impulsos correspondentes a essas vibrações (Figura15).

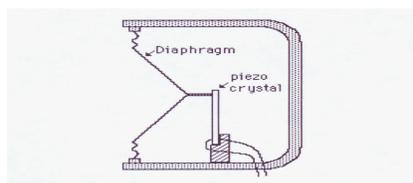


Figura 16. Microfone de cristal.

6.5.4 Microfone Eletrostático

O microfone eletrostático é na realidade um condensador composto de duas placas, uma fixa e outra móvel. Com a vibração da placa móvel (que exerce a pressão do diafragma) aumenta o valor médio da capacidade do condensador [12].

6.5.5 Microfone de Eletreto

Os microfones de eletreto são bastante populares, quer pela sua sensibilidade quer pelo seu baixo custo. Este componente eletrônico possui o princípio de funcionamento de um capacitor.

- **Os Eletretos**

A orientação dos dipolos elementares de um isolante normalmente só existe enquanto dura a ação do campo elétrico [4]. Tão logo cessa o campo elétrico o material volta à situação normal com os dipolos desorientados (Figura 17).

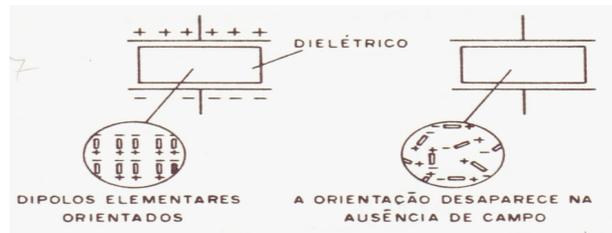


Figura 17. Orientação dos dipolos elementares de um material num campo elétrico.

Existem, entretanto, materiais que mantêm esta orientação mesmo depois que o campo que a estabeleceu desaparece [4].

Pode ser feita uma comparação com o mesmo efeito em termos de magnetismo. Do mesmo modo que existem materiais que retêm o magnetismo depois de sofrerem a ação de um campo e se tornam ímãs permanentes, existem materiais que retêm a polarização elétrica depois de sofrerem a ação de um campo elétrico. Estes materiais não se tornam ímãs, evidentemente, mas sim eletretos, como pode ser visto na figura 18.

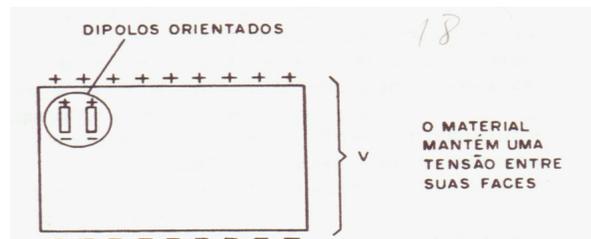


Figura 18. Retenção da polarização elétrica pelos eletretos.

Um exemplo de eletreto natural é o cristal de quartzo. Um exemplo de eletreto artificial é a substância usada na fabricação de discos. Por causa das cargas que são

armazenadas nas partículas do material é que os discos tendem a atrair tão facilmente partículas de pó [4].

No caso do cristal de quartzo a presença de cargas que podem ser orientadas permite uma série de aplicações especiais. Assim, a orientação das cargas tanto é afetada pela ação de forças mecânicas como também produz forças mecânicas quando sob a ação de campos elétricos.

Se o cristal for deformado será obtida uma tensão, e se for aplicado uma tensão será obtida uma deformação [4].

Cristais semelhantes, que manifestam esse efeito piezoelétrico, podem produzir tensões muito altas quando submetidos a esforços mecânicos. É o caso do titanato de bário usado em acendedores de fogão que podem produzir centenas de milhares de volts quando submetidos a uma pancada de certa intensidade (Figura 19).

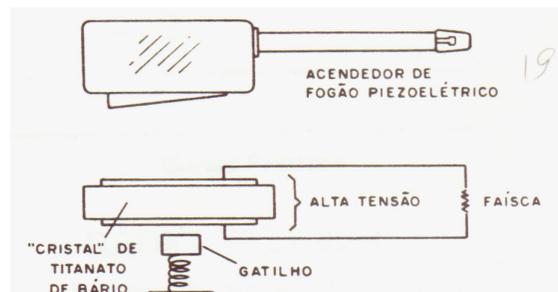


Figura 19. Efeito piezoelétrico.

- **Fabricação dos Eletretos**

Muitos plásticos podem se tornar eletretos no processo de fabricação se suas moléculas forem convenientemente orientadas [4]. Uma maneira de se conseguir isto é aplicando um forte campo elétrico no material quando ele ainda se encontrar num estado de fusão, conforme sugere a figura 20.

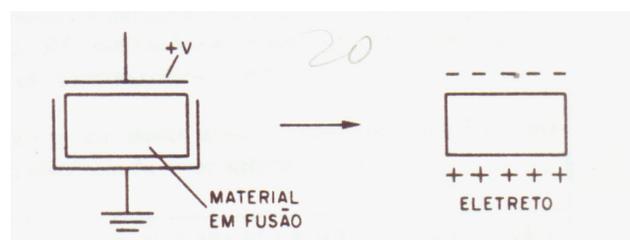


Figura 20. Orientação de moléculas de plásticos, através da fusão destes, formando eletretos.

Na eletrônica os eletretos podem ser usados, então, na construção de diversos tipos de transdutores, isso porque os dipolos elementares que os formam tem sua disposição alterada por praticamente qualquer tipo de influência externa [4].

- **Componentes com Eletreto**

Um eletreto é bastante sensível à vibrações mecânicas, como por exemplo o som. As vibrações alteram a disposição dos dipolos elementares induzindo variações de tensão nas faces do material que correspondem em forma de onda ao som incidente [4].

Ligando o eletreto a um diafragma e a entrada de um transistor de efeito de campo, as vibrações de tensão podem ser amplificadas obtendo-se um microfone de eletreto de grande sensibilidade (Figura 21, [4]).

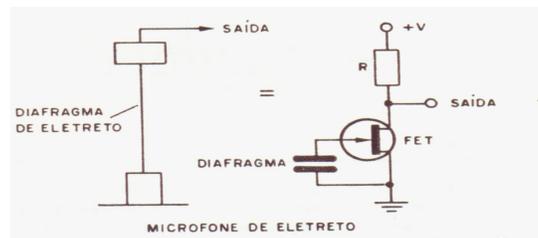


Figura 21. Microfone de eletreto.

No caso do microfone de 2 terminais, o resistor de polarização do transistor de efeito de campo é externo, enquanto que no caso dos eletretos de 3 terminais este resistor é interno, conforme mostra a figura 22 [4].

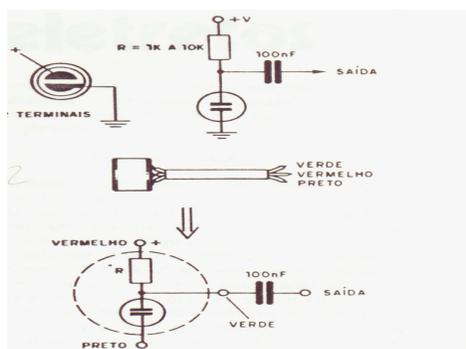


Figura 22. Microfone de 2 terminais.

Igualmente, pode ser obtido o efeito inverso: aplicando um sinal de áudio num eletreto, ele se deforma em vista da alteração de posição dos dipolos, e com isso vibra na mesma frequência. O som pode ser reproduzido com fidelidade.

Outra aplicação muito importante vem do fato de que a variação de temperatura entre as faces do material usado como eletreto também altera a disposição dos dipolos elementares e, com isso, a tensão existente entre as faces. O dispositivo é de altíssima impedância, de modo que só mesmo circuitos sensíveis podem detectar estas tensões. Com isso basta dizer que pode ser obtido um transdutor tão sensível que é capaz de detectar com facilidade o calor irradiado por sua mão a uma distância de 1 metro. Este efeito é denominado piroelétrico e permite a construção de instrumentos ultra-sensíveis para a medida da temperatura [12].

6.6 Amplificador Operacional

O amplificador Operacional (AOP) é um amplificador multi-estágio, com entrada diferencial, cujas características se aproximam, de um amplificador ideal.

6.6.1 Simbologia

A figura 23 apresenta o símbolo do amplificador operacional.

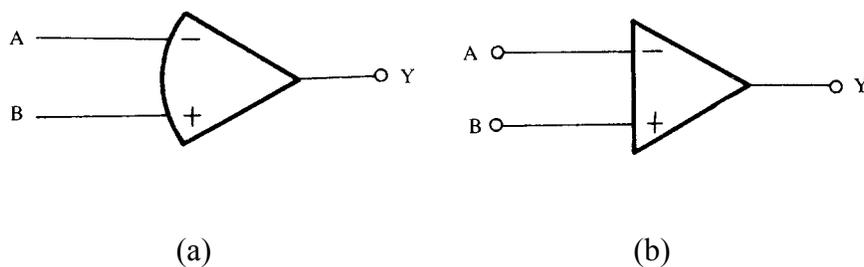


Figura 23. Símbolo do Amplificador Operacional.

onde:

- A: entrada Inversora
- B: entrada não-inversora
- Y: saída

O símbolo da figura 23a é o mais usual e será utilizado neste trabalho [13].

6.6.2 Um pouco da história dos Amplificadores Operacionais

Os amplificadores operacionais foram desenvolvidos na década de 40 e eram construídos com válvulas. Só que apenas no final da década de 40 com o advento do transistor foi possível a construção de AOPs com características razoáveis. Porém, em 1963, surgiu o primeiro AOP monolítico (circuito integrado) lançado pela Fairchild (USA): $\mu A702$. Este AOP apresentava uma série de problemas, tais como: baixa resistência de entrada, baixo ganho, alta sensibilidade a ruídos, necessidade de alimentação positiva e negativa de valores diferentes (por exemplo: $-6V$ e $+12V$) etc. O primeiro AOP realmente “confiável” foi o $\mu A709$, foi lançado pela Fairchild em 1965. A seguir a mesma equipe da Fairchild lançou o famoso $\mu A741$, em 1968. Até hoje estes dois AOPs ocupam posição de destaque. Evidentemente existem hoje diversos AOPs com características superiores às do 709 ou 741.

6.6.3 Características Ideais

As características ideais de um AOP são, entre outras:

- a) resistência de entrada infinita;
- b) resistência de saída nula;
- c) ganho de tensão infinito;
- d) resposta de frequência infinita;
- e) insensibilidade à temperatura (*drift* nulo).

6.6.4 Impedâncias de Entrada e Saída

Consideremos o circuito dado na figura 24. Este circuito representa o modelo de uma fonte alimentando um amplificador, o qual, por sua vez, alimenta outro amplificador e por fim alimenta uma carga.

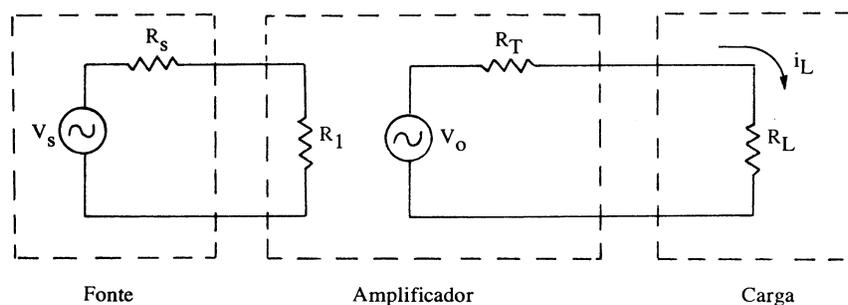


Figura 24. Modelo de uma fonte alimentando um amplificador.

O gráfico da figura 25 mostra as variações de corrente, tensão e potência presentes na carga RL do circuito anterior. O ponto A é o ponto onde se tem a máxima transferência de potência entre o amplificador e a carga. Veremos, porém, que esta situação não é a que mais interessa nos circuitos com AOPs [13].

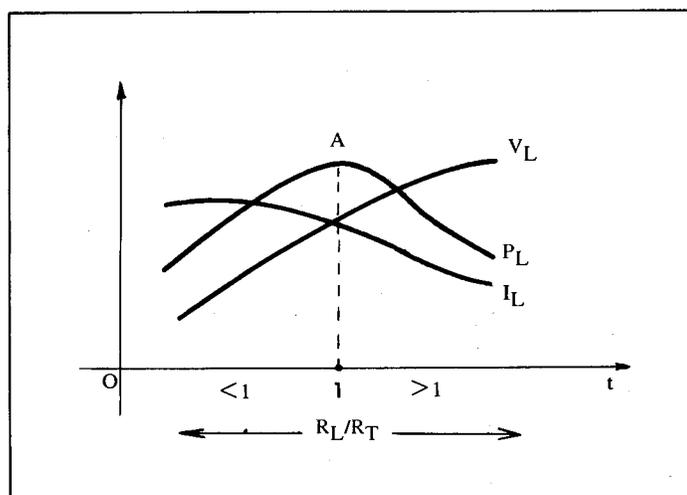


Figura 25. Variações de corrente, tensão e potência presentes na carga RL do circuito da figura 24.

Do circuito da figura 24, podemos obter a seguinte equação:

$$VR1 = V_s \cdot R1 / (R1 + R_s) \quad (6)$$

Se na equação anterior estipularmos uma certa porcentagem de tensão sobre R1, poderemos estabelecer uma relação entre R1 e Rs. Assim, por exemplo:

se $VR1 = 90\% V_s$
temos: $R1 = 9R_s$

se, por outro lado,
 $VR1 = 99\% V_s$
temos: $R1 = 99R_s$

Analisando a equação (6), podemos concluir o seguinte:

$$R1 \rightarrow \infty \Rightarrow VR1 = V_s \quad (7)$$

Ou seja: quanto maior R1 em relação a Rs, maior será a proporção de Vs aplicada sobre R1. Assim sendo, para minimizar a atenuação do sinal aplicado na entrada do amplificador, é necessário que a resistência de entrada do mesmo seja muito alta (idealmente infinita) em relação à resistência de saída da fonte [13].

Por outro lado, para se obter todo o sinal de saída sobre a carga, é necessário que a resistência de saída do amplificador (R_T) seja muito baixa. De fato, sendo:

$$V_{RL} = V_0 - (I_L \cdot R_T) \quad (8)$$

Supondo $R_T = 0$, teremos:

$$V_{RL} = V_0 \quad (9)$$

Nesta condição, a corrente I_L é limitada pelo valor de R_L . Evidentemente, existe um valor máximo de I_L que pode ser fornecido pelo amplificador [13].

6.6.5 Ganho de Tensão

Para que a amplificação esteja o mais próximo possível de um comportamento ideal, é necessário que o amplificador possua um alto ganho de tensão. Idealmente este ganho seria infinito.

6.6.6 Resposta em Frequência

É desejável que um amplificador tenha uma largura de faixa (BW) muito ampla de modo que um sinal de qualquer frequência possa ser amplificado sem sofrer corte ou atenuação. Idealmente BW deveria ser infinito [13].

6.6.7 Sensibilidade à Temperatura

As variações térmicas podem provocar alterações acentuadas nas características elétricas de um amplificador. A esse fenômeno chamamos *drift*. Seria ideal que um AOP não apresentasse sensibilidade às variações de temperatura [13].

6.6.8 Modos de Operação

Basicamente o AOP trabalha em três modos:

- **Sem Realimentação**

Este modo é também denominado operação em malha aberta e o ganho do AOP é o estipulado pelo próprio fabricante, ou seja, não se tem controle sobre o mesmo. Este tipo de

operação é muito útil quando se deseja implementar circuitos comparadores. Na figura 26 temos um AOP em malha aberta.

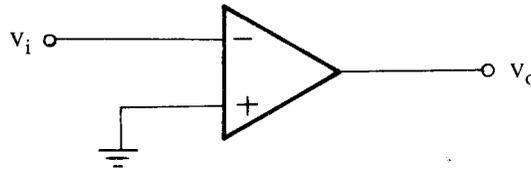


Figura 26. Operacional sem realimentação [13].

- **Com Realimentação Positiva**

Este tipo de operação é denominada operação em malha fechada. Apresenta como inconveniente o fato de poder conduzir o circuito à saturação. Uma aplicação prática da realimentação positiva é a implementação de comparadores e osciladores. A figura 27 mostra um AOP submetido à realimentação positiva.

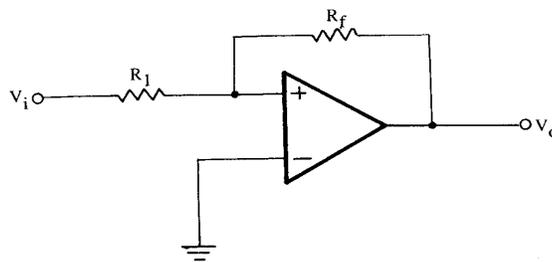


Figura 27. Operacional com realimentação positiva.

Nota-se que a saída é reuplicada à entrada não inversora do AOP através de um resistor de realimentação R_f .

- **Com Realimentação Negativa**

Este modo de operação é o mais importante em circuitos com AOPs. Na figura 28, temos um AOP operando com realimentação negativa.

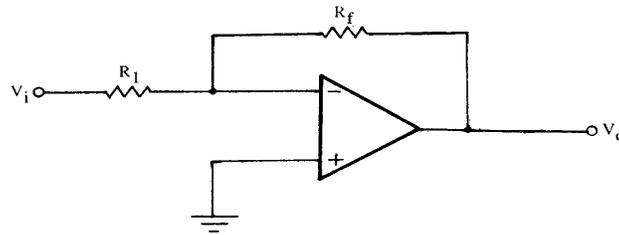


Figura 28. Operacional com realimentação negativa.

Veja que a saída é reaplicada a entrada inversora do AOP através de R_f . As aplicações dos AOPs com realimentação negativa são inúmeras:

- a) amplificador não-inversor;
- b) amplificador inversor;
- c) somador;
- d) seguidor de tensão (*buffer*);
- e) amplificador diferencial;
- f) diferenciador;
- g) integrador;
- h) filtros ativos.

6.6.9 Circuitos Básicos

Dentre os circuitos com realimentação negativa citados acima, foram usados no projeto o amplificador inversor e o seguidor de tensão (*buffer*).

• Amplificador Inversor

O primeiro circuito linear que analisaremos será o amplificador inversor. Esta denominação se deve ao fato de que o sinal de saída estará 180° defasado em relação ao sinal de entrada. A figura 29 apresenta a configuração padrão do circuito amplificador inversor.

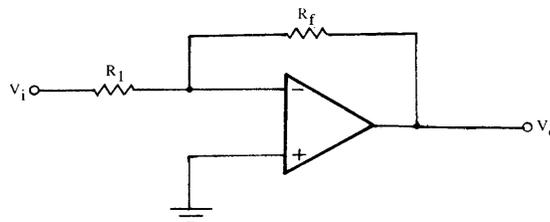


Figura 29. Circuito amplificador inversor.

Aplicando LCK(lei das correntes de Kirchhoff) no ponto “v-” temos:

$$I_1 + I_f = I_{B1} \quad (10)$$

Mas, supondo o AOP ideal, temos:

$$I_{B1} = 0 \quad (11)$$

Logo:

$$[(V_i - V_a) \div R_1] + [(V_o - V_a) \div R_f] = 0 \quad (12)$$

Por outro lado, no ponto “v-” temos um terra virtual, ou seja: $V_a = 0$. Portanto,

$$(V_i \div R_1) + (V_o \div R_f) = 0 \quad (13)$$

E, finalmente:

$$A_{vf} = V_o \div V_i = -R_f \div R_i \quad (14)$$

A equação 14 comprova a controlabilidade do ganho em malha fechada através do circuito de realimentação negativa (R_1 e R_f).

O sinal negativo indica o defasamento de 180° do sinal de saída em relação ao sinal de entrada.

Uma desvantagem do amplificador é que sua impedância de entrada (Z_{if}) é determinada unicamente pelo valor de R_1 , ou seja:

$$Z_{if} = R_1 \quad (15)$$

- **Seguidor de Tensão (*buffer*)**

A figura 30 mostra a configuração denominada seguidor de tensão ou *buffer*. Este circuito apresenta uma altíssima impedância de entrada e uma baixíssima impedância de saída.

O seguidor de tensão apresenta diversas aplicações:

- a) isolador de estágios;
- b) reforçador de corrente;
- c) casador de impedâncias.

Dos circuitos com AOP, o seguidor de tensão é o que apresenta características mais próximas das ideais, em termos das impedâncias de entrada e de saída.

Em alguns casos, um seguidor de tensão pode receber um sinal através de uma resistência em série, colocada no terminal não-inversor (R_s). Neste caso, para que se tenha um balanceamento do ganho e das correntes, é usual a colocação de um outro resistor de mesmo valor na malha de realimentação (R_f). Na figura 29 temos $R_s=R_f$, o que implica em $A_{vf}=1$.

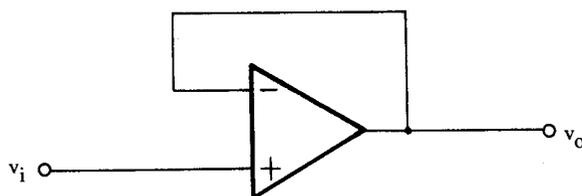


Figura 30. Operacional seguidor de tensão(*buffer*).

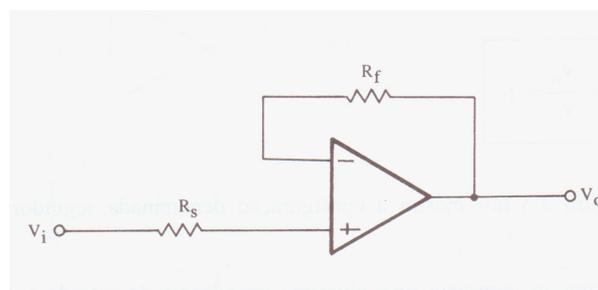


Figura 31. Operacional seguidor de tensão com ganho unitário.

6.7 Amplificadores de Potência

Uma função importante do estágio de saída de um amplificador é fazer o acoplamento com uma resistência de saída baixa, de modo que o amplificador possa fornecer o sinal de saída para a carga sem queda de ganho. Como o estágio de saída é o estágio final do amplificador, ele usualmente lida com sinais de amplitudes relativamente altas. Portanto, as aproximações e os modelos para pequenos sinais não são aplicáveis ou devem ser usados com cuidado. Todavia, a linearidade continua sendo uma exigência muito importante. Nesses casos, uma medida da qualidade do projeto do estágio de saída, a distorção harmônica total, DHT (*total harmonic distortion*-THD), passa a ser importante. Ela é o valor eficaz das componentes harmônicas do sinal de saída, excluindo a fundamental, expresso como uma porcentagem eficaz da fundamental. Um amplificador de áudio de potência com alta fidelidade apresenta uma DHT da ordem de uma fração de 1%[14].

A exigência mais desafiadora no projeto de um estágio de saída é que ele forneça uma quantidade de potência exigida pela carga de modo *eficiente*. Isso significa que a

potência *dissipada* nos transistores do estágio de saída deve ser a menor possível. Essa exigência se origina principalmente do fato de que a potência dissipada em um transistor aumenta sua temperatura da junção interna, e há uma temperatura máxima (na faixa de 150° C a 200° C para os dispositivos de silício) acima da qual o transistor é destruído. Outras razões para exigir uma conversão eficiente de alta potência são o prolongamento da vida das baterias, fontes de alimentação de baixo custo ou para evitar a necessidade de ventiladores [14].

O amplificador de potência é simplesmente um amplificador com estágio de saída de alta potência. Apresentaremos exemplos de amplificadores de potência em circuitos integrados e discretos [14].

6.7.1 Classificação dos Estágios de Saída

- **Amplificadores Classe A e B**

Os estágios de saída são classificados de acordo com a forma de onda da corrente no coletor que resulta quando é aplicado um sinal de entrada. O estágio classe A, cuja forma de onda associada está mostrada na figura 32, é polarizado com uma corrente I_c maior do que a amplitude do sinal da corrente \hat{I}_c . Portanto, o transistor em um estágio classe A conduz durante o ciclo total do sinal de entrada; ou seja, o ângulo de condução é de 360°. Em comparação, o estágio de classe B, cuja a forma de onda associada está mostrada na figura 33, é polarizado com uma corrente contínua nula. Portanto, o transistor em um estágio classe B conduz durante apenas metade do ciclo da senóide de entrada, resultando em um ângulo de condução de 180° [14].

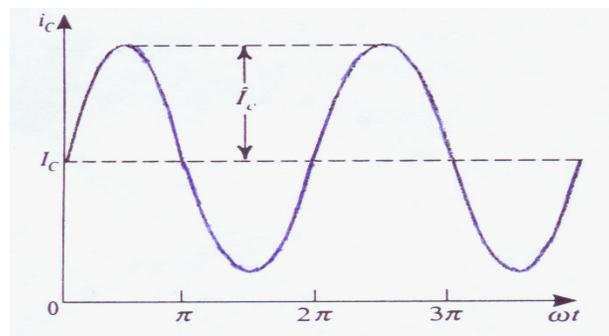


Figura 32. Curva do amplificador de potência classe A [14].

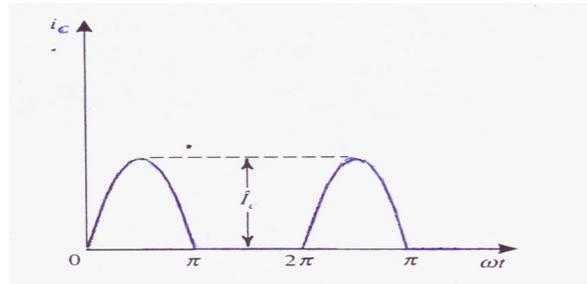


Figura 33. Curva do amplificador de potência classe B [14].

- **Amplificador Classe AB**

Uma classe intermediária entre A e B, apropriadamente denominada classe AB, envolve a polarização do transistor com uma corrente contínua diferente de zero, mas muito menor do que a corrente de pico do sinal senoidal. Isso significa que o transistor conduz por um intervalo ligeiramente maior do que o semiciclo, conforme a figura 34. O ângulo de condução resultante é maior do que 180° , mas muito menor do que 360° . O estágio classe AB tem outro transistor que conduz por um intervalo ligeiramente maior do que o semiciclo negativo, e as correntes dos dois transistores são combinadas na carga. Isso implica que, durante os intervalos próximos da passagem por zero (cruzamento zero) da senóide de entrada, ambos os transistores conduzem [14].

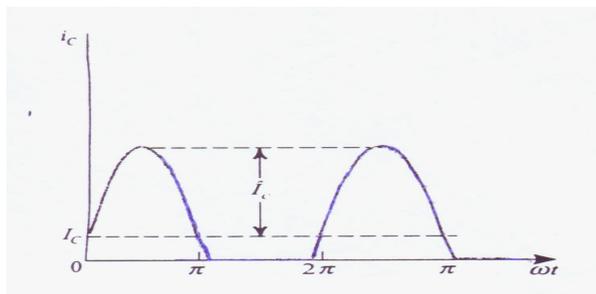


Figura 34. Amplificador de potência classe AB[14].

- **Amplificador Classe C**

A figura 35 mostra a forma de onda da corrente no coletor para um transistor operando como um amplificador em classe C. É observado que o transistor conduz por um intervalo menor do que aquele de um semiciclo; isto é, o ângulo de condução é menor do que 180° . O resultado é a forma de onda da corrente pulsando periodicamente, conforme mostrado. Para obter uma tensão de saída senoidal, essa corrente passa através de circuito paralelo LC, sintonizado para a frequência da senóide de entrada. O circuito sintonizado funciona como um filtro passa-faixas e fornece uma tensão de saída proporcional à

amplitude da componente fundamental na representação da série de Fourier da forma de onda da corrente [14].

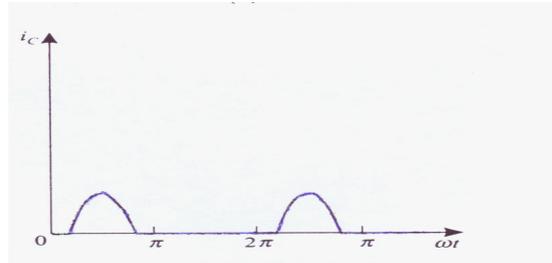


Figura 35. Amplificador de potência classe C [14].

7 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo são apresentadas as diversas partes que compõem o sistema de Avaliação de Sistemas de Amplificação e Reprodução de Som através de Técnicas Adaptativas. São definidas as especificações de projeto e a forma na qual elas foram implementadas.

7.1 Diagrama em Blocos do Sistema

O diagrama em blocos representado pela figura 36 será usado para explicar o sistema utilizado.

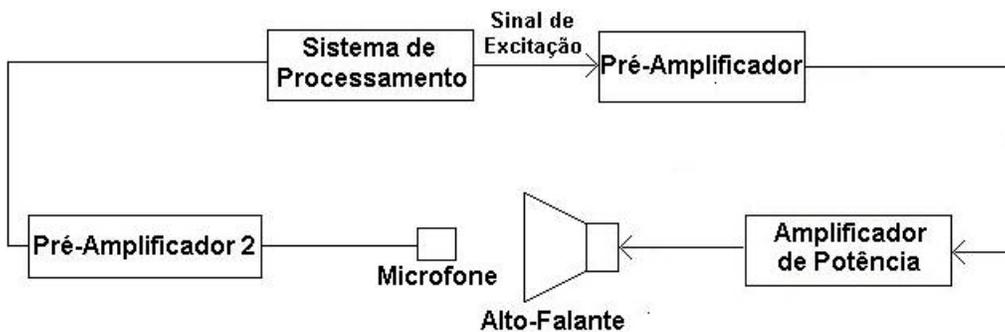


Figura 36. Diagrama em blocos.

O diagrama ilustrado pela figura 37 representa todas as etapas do sistema de processamento e também aquisição e amplificação do sinal de referência.

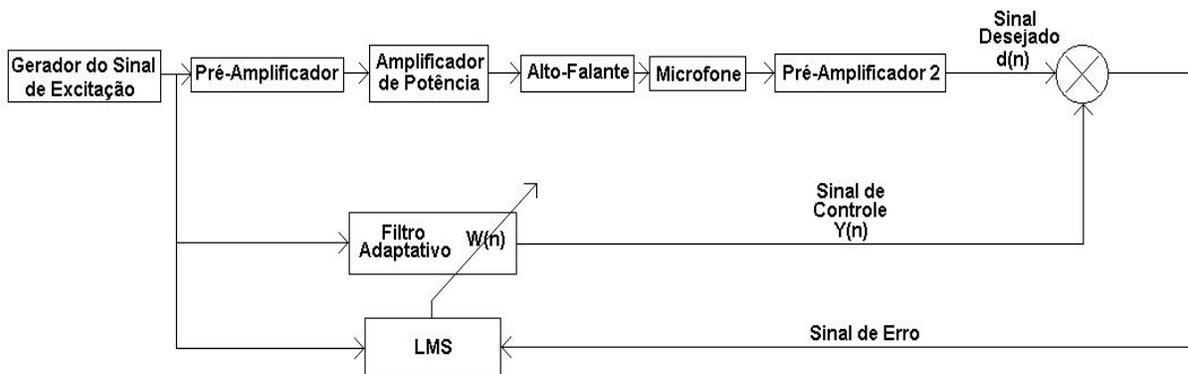


Figura 37. Diagrama em blocos detalhado.

7.1.1 Etapa de Aquisição e Amplificação do Sinal de Referência

A parte superior esquerda da figura 36 possui um gerador de sinal de excitação, este passará por uma etapa de pré-amplificação e após por um amplificador de potência, o qual enviará o referido sinal para o alto-falante. A seguir o sinal emitido pelo alto-falante será captado por um microfone que o enviará para um segundo pré-amplificador (pré-amplificador 2), possibilitando que o sinal seja adquirido.

7.1.2 Etapa de Ajuste do Filtro Adaptativo pelo Algoritmo NLMS

O filtro adaptativo processa o mesmo sinal de excitação enviado ao alto-falante, produzindo o sinal $y(n)$ (sinal de controle). Este sinal é comparado (subtraído) do sinal captado pelo microfone $d(n)$ (sinal desejado), resultando no sinal de erro. A cada amostra adquirida pelo conversor AD, os coeficientes do filtro adaptativo são ajustados. Quando, em média, o sinal de erro puder ser considerado muito pequeno, entende-se que os parâmetros do filtro adaptativo representam, em um certo nível de precisão, o sistema amplificador de potência – alto-falante – pré-amplificador.

7.2 Sistema de Pré-Amplificação dos Microfones de Aquisição

O circuito amplificador para o microfone é constituído de três estágios, baseados em amplificadores operacionais, como mostra a figura 38. Este circuito foi desenvolvido e implementado em [16] e é descrito a seguir.

O primeiro estágio do circuito implementado, composto pelos operacionais U1-U2-U3, é uma sugestão encontrada em [2] para o condicionamento do sinal proveniente do microfone de eletreto. Este circuito é responsável pela polarização do microfone e amplificação e filtragem do sinal.

Os dois estágios seguintes U4-U5 e U6-U7 são responsáveis por uma amplificação extra do sinal captado pelo microfone. Os operacionais utilizados foram do tipo LM 324 visto que a alimentação destes circuitos pode ser unipolar (0-12V). Isto decorre do fato de desejarmos um sistema que possa ser alimentado por uma única bateria automotiva, permitindo assim, a portabilidade do sistema.

As saídas dos operacionais U6 e U7 são conectadas às entradas dos conversores analógico-digitais da placa EZ-Kit Lite [3].

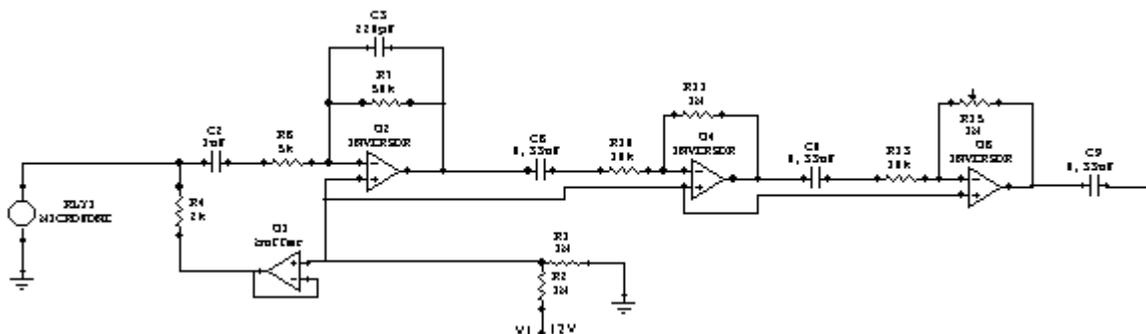


Figura 38. Esquemático do circuito amplificador para o microfone [16].

7.3 Pré -amplificador para o Alto-Falante

O circuito usado para a pré-amplificação do sinal de anti-ruído (produzido pelo sistema de controle) é baseado no amplificador de potência da Philips TDA-1013B [15], conforme a figura 39. O objetivo principal desta etapa é permitir o acoplamento entre o conversor digital analógico da placa Ez-kit Lite com o amplificador de potência descrito no item 5.4. Este circuito foi desenvolvido e implementado por [16].

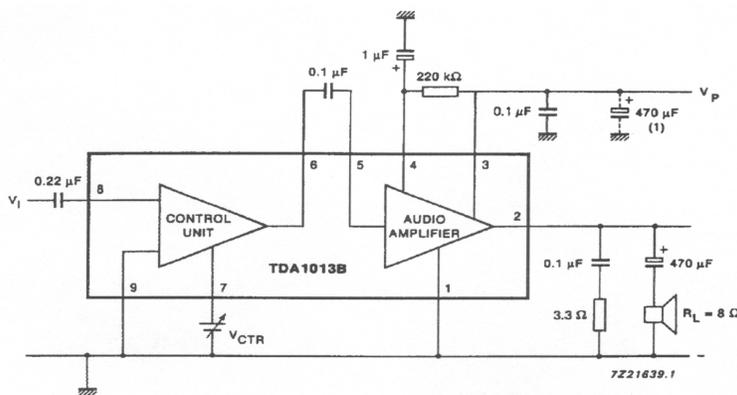


Figura 39. Circuito de pré-amplificação do sinal de anti-ruído.

Este circuito foi escolhido pela facilidade para alteração de ganho/atenuação através da modificação da tensão de referência do pino 7. Esta característica permitirá futuramente a implementação de um controle automático de ganho. Outra vantagem é sua alta impedância de entrada. A figura 40 apresenta a curva da tensão no pino 7 em relação ao ganho(dB - deciBéis) aplicado sobre o sinal.

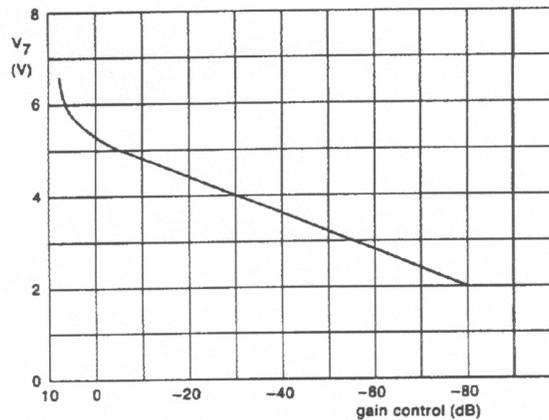


Figura 40. Gráfico do ganho em relação à tensão aplicada ao pino 7.

A tensão de referência aplicada ao pino 7 é obtida através de um divisor resistivo aplicado sobre a fonte de tensão de alimentação (figura 41).

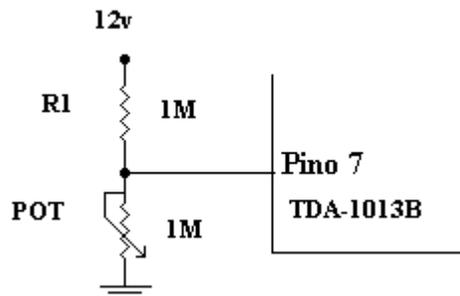


Figura 41. Divisor de tensão usado para controle de ganho no pino 7.

7.4 Amplificador de Potência e Alto-Falantes

Na saída do módulo de pré-amplificação do sinal de anti-ruído (item 5.3) é utilizado um amplificador de potência comercial de uso automotivo, marca Cowatts, de 600 W e, finalmente, este amplificador é acoplado a um alto-falante do tipo *woofer*, marca Bravox, modelo BA6SS, com potência de 140 W.

7.5 Controlador Adaptativo

O controlador adaptativo utilizado é o algoritmo LMS Normalizado. Este algoritmo foi implementado em linguagem C na placa Ez-Kit Lite.

7.6 Programação da Placa Ez-Kit Lite

A placa Ez-Kit Lite é programável em linguagem C. Para que a mesma funcione corretamente é necessário que diversos elementos sejam definidos e adequadamente implementados, entre estes:

- a) programação dos temporizadores;
- b) programação dos canais de entrada;
- c) rotinas de comunicação de dados com o computador pessoal;
- d) parâmetros do controlador adaptativo (tamanho, passo de convergência, etc);
- e) rotinas de interrupção.

7.7 O Sistema Implementado

Na parte inferior direita da bancada da figura 42 pode-se visualizar a placa Ez-Kit Lite que vai gerar o e receber um sinal de excitação. Na placa de circuito impresso no centro da bancada, encontram-se as duas etapas de pré-amplificação. No centro e acima está o amplificador de potência, do seu lado direito uma fonte de tensão contínua de 12V. Do seu lado esquerdo, o alto-falante e o microfone de eletreto e finalmente, ao lado da bancada, um microcomputador utilizado para a visualização dos resultados.

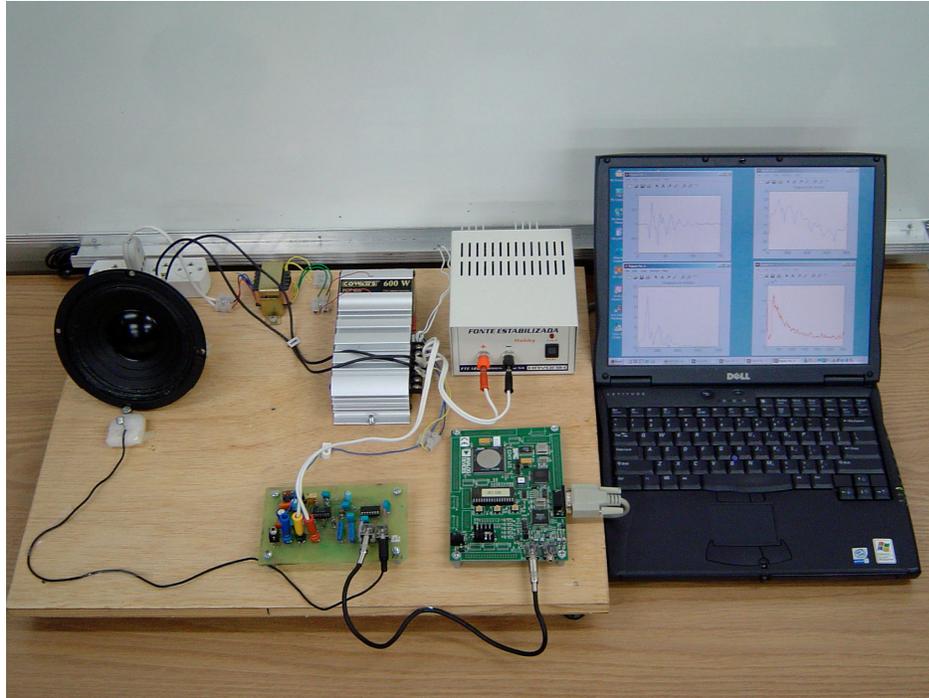


Figura 42. O sistema implementado.

8 RESULTADOS

A partir do sistema descrito na seção anterior foram realizados diversos testes para avaliar a capacidade do sistema no teste de um alto-falante. Quatro resultados representativos foram escolhidos e a seguir são apresentados.

O estímulo elétrico produzido pela placa EZ-Kit Lite é um ruído branco Gaussiano com componentes até 8 kHz, visto que essa é a máxima frequência que o *woofer* (tipo de alto-falante usado em nosso projeto) pode trabalhar com adequada eficiência.

O algoritmo adaptativo escolhido é o NLMS que atualiza os coeficientes de uma estrutura de atraso característica de um filtro do tipo FIR (*finite impulse response*) com 150 coeficientes. A frequência de amostragem utilizada foi 16 kHz.

8.1 Determinação da Resposta ao Impulso

A figura 43 mostra o valor dos coeficientes (eixo vertical) após a sua convergência, em função do tempo de reverberação (eixo horizontal) (150 coeficientes \times 1/16000 Hz = 0,0094 segundos) para apenas uma realização.

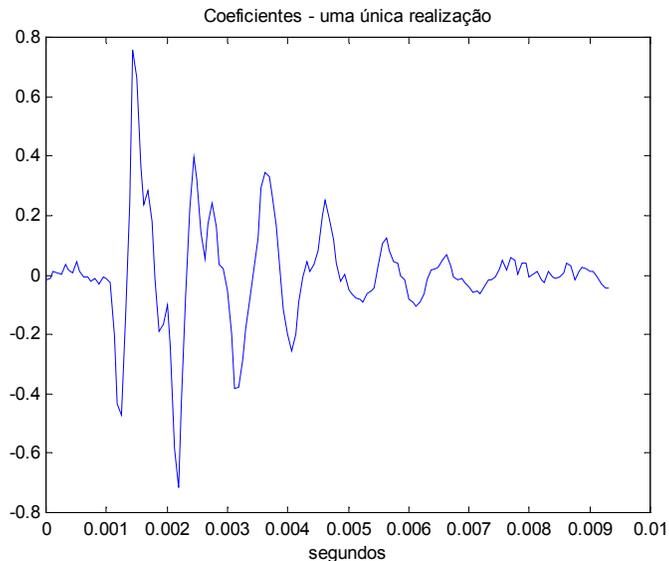


Figura 43. Coeficientes (150) em regime permanente para uma realização.

A figura 44 mostra o gráfico da média de 50 realizações (promediações) realizadas para diferentes sinais de excitação porém com as mesmas características estatísticas (média e variância).

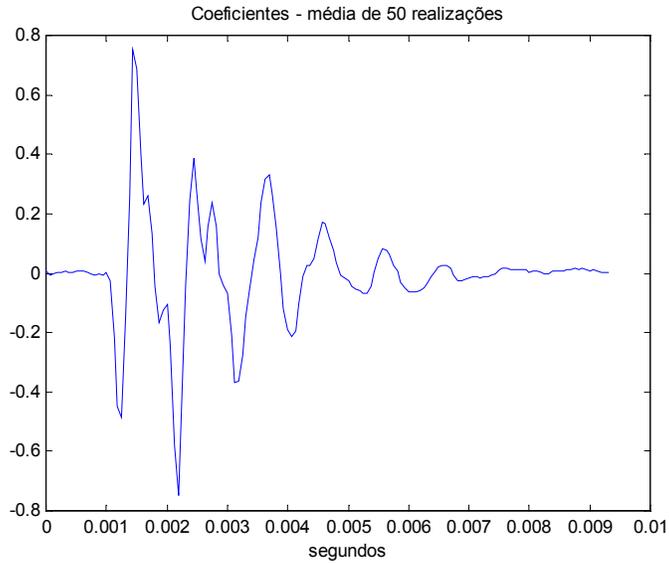


Figura 44. Coeficientes (150) em regime permanente para uma a média de 50 realizações.

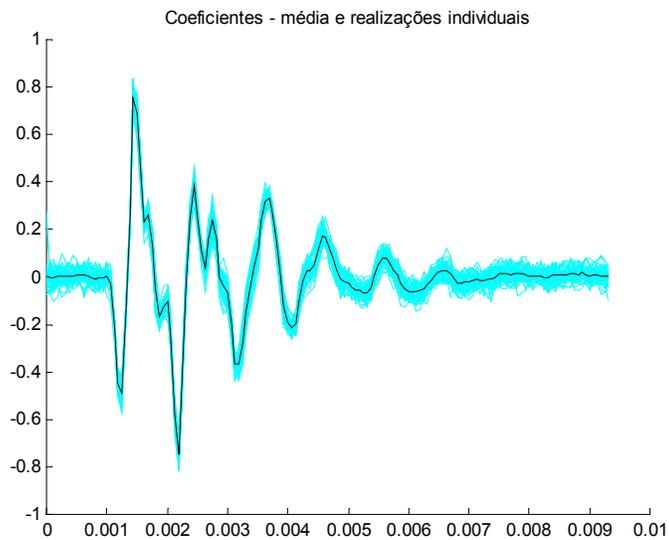


Figura 45. Coeficientes (150) em regime permanente: preto: média de 50 realizações, azul: realizações individuais.

As figuras 45 e 46 mostram a comparação entre as várias realizações individuais (50 para a figura 45 e 4 para a figura 46) e a média das 50. Essa comparação é feita para mostrar que nas condições em que foram feitos os testes no alto-falante, os resultados obtidos possuem uma precisão adequada mesmo realizando-se um único processo de adaptação.

Coeficientes - (1) Média de 50 promediações (2)-(5) uma única realização

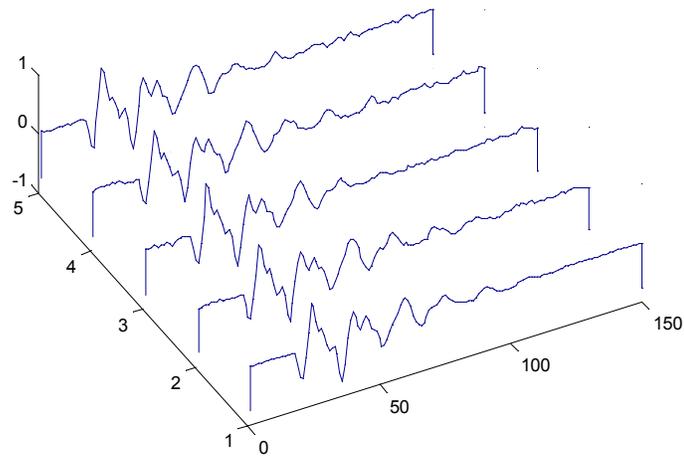


Figura 46. Coeficientes (150) em regime permanente: (1) média de 50 realizações, (2-5): realizações individuais..

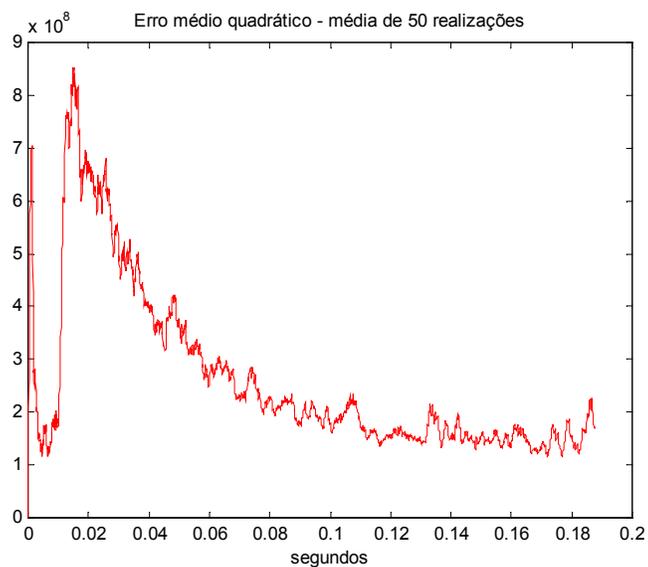


Figura 47. Erro médio quadrático em função do tempo de adaptação.

Na figura 45 em azul claro é possível visualizar as 50 realizações individuais e em preto a sua média. Vemos claramente que a variabilidade de cada uma das realizações é muito pequena com relação à média.

Na figura 46 apresenta-se uma visualização tridimensional de 4 realizações individuais (gráficos 4 a 5) e da média das 50 realizações (gráfico 1) para os 150 coeficientes.

8.2 Convergência do Processo de Adaptação

A figura 47 apresenta o gráfico do erro médio quadrático em função do tempo de adaptação. Pode-se verificar que em cerca de 0,16 segundos o filtro adaptativo entra em regime permanente.

8.3 Resposta em Frequência

As figuras 48 e 49 mostram, de forma ilustrativa, uma comparação da resposta em frequência de um *woofer* comercial (do mesmo tipo mas de marca diferente do alto-falante avaliado) com a resposta em frequência obtida através da aplicação da transformada de Fourier da resposta ao impulso média (seção 8.1).

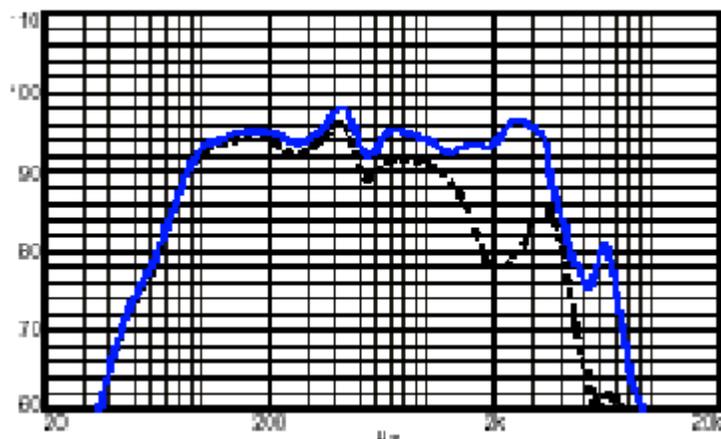


Figura 48. Resposta em frequência do *woofer* comercial obtida na da folha de dados de fabricante nacional.

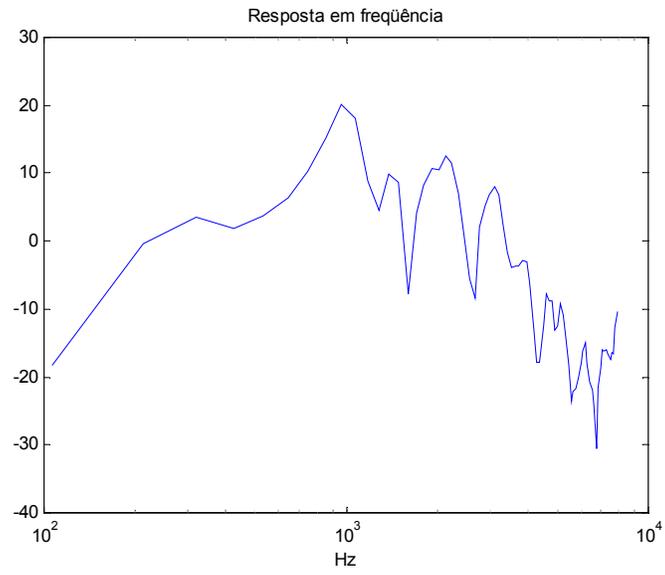


Figura 49. Resposta em frequência obtida através do sistema desenvolvido.

9 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Ao longo deste trabalho foram discutidos os diversos componentes e características desejáveis para um sistema de controle de qualidade de alto-falantes. As bases físicas e matemáticas foram analisadas, resultando na proposta de um protótipo para a implementação prática do sistema.

O sistema construído faz uso de técnicas de filtragem adaptativa como algoritmo de controle. Esta estratégia foi implementada em uma placa de aquisição de sinais baseada em um processador digital de sinais comercial. O *hardware* analógico necessário foi desenvolvido em [16] e adaptado para as necessidades deste trabalho. O programa foi implementado em linguagem C, sendo responsável pelo gerenciamento do processo de geração e aquisição dos sinais, temporização, adaptação dos coeficientes do filtro adaptativo e pela comunicação de dados com um computador pessoal.

Os diversos testes realizados demonstram que a proposta aqui sugerida é promissora em decorrência de sua robustez e velocidade.

10 PROPOSTAS PARA CONTINUAÇÃO DO TRABALHO

Dentre as várias possibilidades, parece-nos que o estudo da robustez do sistema quanto à interferência de sinais acústicos externos seria o caminho natural para a seqüência deste projeto. Estudos quanto a utilização de algoritmos de passo variável também seriam interessantes de forma que estimativas mais acuradas seriam possíveis.

Uma terceira e também importante alternativa seria a estimação dos parâmetros do modelo Thiele Small a partir da resposta ao impulso associada com outras informações.

11 BIBLIOGRAFIA

[1] Kuo, S. M., Panahi, I., Chung, K.M., Horner T., Nadeski M. e Chyan J. (1996), Design of Active Noise Control Systems With the TMS320 Family, Texas Instruments.

[2] Brito, D.S. e Barros, A.K. (2002), “Influência de Ruídos de Frequências muito Baixas na Estimativa de Sinais Quasi-periódicos pelo Algoritmo LMS”, XIV Congresso Brasileiro de Automática.

[3] Born, R.S. (2000), Filtros Adaptativos Aplicados a Sinais Biomédicos, Monografia, Universidade Federal de Pelotas.

[4] ADSP 2106x Sharc User’s Manual, second edition, Analog Devices, 1996.

- [5] Ez-Kit Lite, ADSP 2106x Sharc, Reference Manual, Analog Devices, 1997.
- [6] AD1847, Serial-Port 16 bit Soundport Stereo Codec, Analog Devices, 1996.
- [7] <http://www.grupozug.com.br/ENGEL/alto-falante.htm>
- [8] <http://www.eletrica.ufpr.br/edu/ie99/trab2/alysson/partesdoaltofalante.htm>
- [9] <http://www.geocities.com/Baja/4676/caixas.html>
- [10] Silva, H.S., Poltosi, L. (1997), “Medição dos Parâmetros Thiele-Small de Alto-Falantes, com Diferentes Instrumentos”, Relatório Técnico, Selenium, páginas 1-22.
- [11] Braga, N. C., “O que são eletretos”, Revista Saber Eletrônica, páginas 56-58.
- [12] <http://br.geocities.com/saladefisica>
- [13] Pertence Júnior, A. (1996), Amplificadores Operacionais e filtros ativos, quinta edição.
- [14] Sedra, A. D. e Smith, K. C. (2000), Microeletrônica, quinta edição, McGraw-Hill.
- [15] TDA 1013B, 4W Audio Power Amplifier with DC Volume Control, Philips Semiconductors, 1994.
- [16] Goulart (2002), “Implementação e Avaliação de um Sistema de Controle Ativo de Ruído Acústico”, Relatório de Iniciação Científica, Universidade Católica de Pelotas.

12 APRECIACÃO CRÍTICA

Ao longo deste período o aluno demonstrou assiduidade, interesse e capacidade para desenvolver um projeto de pesquisa sob orientação. Demonstrou também capacidade de trabalho em grupo

Pelotas, 9 de dezembro de 2003.

Rafael da Cruz Haical
(bolsista)

Márcio Holsbach Costa
(orientador)